

981067



Tielaitos

Tien pohja- ja päällysrakenteiden tutkimusohjelma (TPPT)

Sitomattomien materiaalien moduulit

Vuoden 1995 kokeet



Tielaitoksen
selvityksiä

34/1996

Helsinki 1996

Geokeskus

08 TIEL

Tielaitoksen selvityksiä
34/96

Tien pohja- ja päällysrakenteiden tutkimusohjelma

Sitomattomien materiaalien moduulit
Vuoden 1995 kokeet

Tielaitos
Geokeskus

Helsinki 1996

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-236-1
TIEL 3200402
Oy Edita Ab
Helsinki 1997

Julkaisun myynti:
Tielaitos, painotuotteiden myynti
Telefax 0204 44 2202

Joutsenmerkin arvoinen paperi

Tielaitos
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 44 150

Asiasanat sitomaton, kiviaines, muodonmuutos, resilient-moduuli, sekanttimoduuli, dynaaminen, kolmiaksaalikoe

TIIVISTELMÄ

TPPT-projekti M12 "Sitomattomien materiaalien moduulit" on jatkoa TTKK:n geotekniikan laboratoriossa vuosina 1992 - 1994 käynnissä olleelle tien sitomattomissa rakennekerroksissa käytettävien karkearakeisten kiviainesten muodonmuutosominaisuuksia käsitelleelle tutkimusprojektille. Projektin tavoitteena on tutkimusvuosien 1994 - 1995 aikana ollut toisaalta aiempia kuormituskoesarjoja täydentävän dynaamisen kolmiaksaalikoesarjan tekeminen ja toisaalta sekä aikaisemman koetulosaaineiston että täydentävän kuormituskoesarjan tulosten yksityiskohtainen analysointi kiviainesten palautuvan muodonmuutuskäyttäytymisen osalta.

Käsillä olevassa tutkimusraportin ensimmäisessä osassa esitetään täydentävän koevaiheen yhteydessä tehtyjen 28 isomittakaavaisen dynaamisen kolmiaksaalikokeen keskeisimmät tulokset. Täydentävistä kokeista 11 tehtiin viidestä eri havaintotiekohteesta noudatetuille kantavan kerroksen murskeille ja 15 kiviaineksille, joiden rakeisuusjakautumat oli rakennettu halutulla tavalla tielaitoksen suunnitteluohjeissa annettuja sitomattomien kerrosten materiaalien ohjealueita vastaaviksi. Kokeet tehtiin TTKK:n geotekniikan laboratorion käytössä olevalla dynaamisella kolmiaksaalilaitteistolla pääasiassa 200 mm näytehalkaisijaa käyttäen.

Havaintotiekohteiden näytemateriaaleilla keskeisimmäksi muodonmuutosmoduulien eroja selittäväksi tekijäksi todettiin kiviaineksen tiiviystila. Tästä johtuen havaintotiekohteiden pudotuspainomittauksista takaisinlaskettuihin moduuli-arvoihin tehtävissä vertailuissa kriittinen tekijä tulee olemaan ennen muuta kenttäkohteista Troxler-laitteen avulla mitattujen tiheysarvojen oikeellisuus ja niiden vastaavuus pudotuspainomittausten aikaiseen tilanteeseen.

Tielaitoksen suunnitteluohjeissa annettujen rakeisuusohjealueiden mukaisiksi suhteitetuilla näytemateriaaleilla saadut tulokset osoittavat, että rakeisuusjakautumaan perustuva muodonmuutosmoduulin arviointimenettely antaa periaatteessa laboratoriomittausten kanssa yhdensuuntaisia tuloksia. Tuloksien vastaavuus edellyttää kuitenkin myös erilaisiin materiaaleihin tyypillisissä suomalaisessa tierakenteessa liikennekuormitustilanteen yhteydessä kohdistuvan jännitystilän huomioon ottamista. Näin ollen pelkkään rakeisuusjakautumaan perustuva muodonmuutosmoduulin arviointimenettely ei toimi, jos tietyn tyyppisen materiaalin paikka tierakenteessa muuttuu tai tien rakenneratkaisu on muulla tavoin perinteisestä poikkeava. Eräissä tapauksissa, kuten esimerkiksi roikkuvan rakeisuuskäyrän omaavalla kalliomurskeella, suunnitteluohjeen mukainen arviointimenettely näyttäisi myös selvästi aliarvioivan kiviaineksen muodonmuutosmoduulia.

Käytettävän näyttekoon vaikutuksen testaamiseksi tehdyt kokeet osoittavat, että karkearakeiselle kiviainekselle tehtävän dynaamisen kolmiaksaalikokeen tulos ei ainakaan kovin merkittävästi riipu siitä, onko kuormituskoenäytteen halkaisija 200 mm vai 300 mm. Oletettavasti näyttekoon vaikutus on myös sitä vähäisempi, mitä pienempi karkeimpien lajitteiden osuus kuormituskoenäytteessä on.

Key words unbound, aggregate, deformation, resilient modulus, secant modulus, dynamic, triaxial

ABSTRACT

TPPT project M12, "Moduli values of unbound materials", is a continuation of the research project dealing with deformation properties of coarse grained granular materials used in the unbound pavement layers that was going on in the Laboratory of Geotechnical Engineering at Tampere University of Technology (TUT) in 1992 - 1994. During the years 1994 - 1995, the aim of the project was to supplement the earlier test series by performing a small number of large-scale dynamic triaxial tests and to make a detailed analysis of the results of both the earlier test series and the supplementary tests concerning the resilient deformation behaviour of the test materials.

In the first part of the research report at hand the main results of 28 large-scale dynamic triaxial tests performed during the supplementary test series are presented. Eleven of those tests were done with base course materials of five different LTPP observation road sections and fifteen with test materials whose grain size distribution had been prepared to correspond with the existing praxis design codes of the National Road Administration. The tests were performed at the dynamic triaxial testing facility of the TUT Laboratory of Geotechnical Engineering primarily using a test specimen diameter of 200 mm.

As far the test materials from the LTPP observation road sections are concerned, the most important factor to explain the differences in the values of deformation modulus was found to be the test material density. As a result, the reliability of the density values determined by means of the Troxler device will be one of the most critical aspects when comparing the moduli values determined in the laboratory to those back calculated from the falling weight deflectometer measurements performed on site.

The results obtained with the test materials corresponding to the National Road Administration design codes indicated that the moduli estimates obtained from the codes are in principal agreement with the values determined in the laboratory tests. A prerequisite for that is, however, that the level of stress acting on each type of layer material in a typical Finnish road structure is taken into account. This means that the moduli estimates based on the grain size distribution alone are not correct, if a certain type of material is used in a pavement layer which is different from the normal one, or the pavement structure is in some other way different from the traditional construction. In some cases, as with poorly graded crushed rock materials, the moduli estimates made according to the existing design codes also seem to underestimate the deformation modulus of the aggregate.

The tests that were performed to investigate the effect of specimen size indicated that in the results of dynamic triaxial test there is not any remarkable difference regardless if the test specimen diameter is either 200 mm or 300 mm. Presumably the effect is also the smaller the lower is the proportion of the coarsest grains in the test specimen.

ESIPUHE

VTT:n tie- ja geotekniikan laboratorio tilasi "Tien pohja- ja päällysrakenteet" - tutkimusohjelmaan TPPT:hen kuuluvan projektin M12 (vuonna 1994 projekti 120.10) "Sitomattomien materiaalien moduulit" TTKK:n geotekniikan laboratorioilta kesäkuussa 1994. Tutkimusohjelman yleisistä rahoitusraameista johtuen tilaus jakaantui neljälle vuodelle eli projektin on tarkoitus päättyä vuonna 1997.

Tilattu projekti on jatkoa TTKK:n geotekniikan laboratorion vuosina 1992 - 1994 tielaitoksen geokeskuksen toimeksiannosta tekemälle tutkimukselle, joka käsitteli karkearakeisten kiviainesten muodonmuutoskäyttäytymistä syklisen kuormituksen alaisena /3,4,5/. Tästä johtuen tutkimusprojektin toimintasuunnitelma pyrittiin sopeuttamaan TPPT-hankkeen kokonaistavoitteisiin siten, että projektissa hyödynnetään mahdollisimman paljon TTKK:ssa aiemmin samaan aihepiiriin kohdistunutta tutkimusta.

Laaditussa toimintasuunnitelmassa kahden ensimmäisen tutkimusvuoden tavoitteiksi asetettiin:

- **Olemassa olevan koetulosaineiston yksityiskohtainen analysointi materiaalien palautuvan muodonmuutoskäyttäytymisen osalta.** Analysoinnin tavoitteena oli selvittää karkearakeisten kiviainesten muodonmuutosominaisuuksiin keskeisimmin vaikuttavat muuttujat ja niiden merkitys. Edelleen tavoitteena oli myös kehittää menettely, jonka avulla erilaisten kiviainesten muodonmuutosmoduulit pystyttäisiin käytännön tarpeita vastaavalla tarkkuustasolla arvioimaan niiden laatua ja fysikaalista tilaa kuvaavien helposti mitattavissa olevien suureiden perusteella.
- **Laboratorio- ja in-situ -mittausten välisen vastaavuuden selvittäminen.** Tähän tavoitteeseen liittyen projektissa ohjelmoitiin tehtäväksi noin 10 - 15 isomittakaavaista dynaamista kolmiaksaalikoetta valituista havaintotiekohteista otetuille näytemateriaaleille. Mittausmenetelmien vastaavuutta tarkastellaan havaintotiemateriaaleille laboratoriossa määritettyjä muodonmuutosmoduuleita ja samoissa havaintotiekohteissa tehdyistä pudotuspainomittauksista takaisinlaskemalla saatuja moduuli-arvoja vertaamalla. Vertailujen tekeminen ei kuitenkaan sisälly nyt puheena olevaan projektiin M12.
- **Muiden täydentävien dynaamisten kolmiaksaalikokeiden tekeminen.** Havaintotiekohteiden näytemateriaaleille tehtävien kuormituskokeiden lisäksi projektin tarkennetussa toimintasuunnitelmassa toiset noin 10 - 15 täydentävää dynaamista kolmiaksaalikoetta ohjelmoitiin tehtäviksi näytteille, joiden testauksen arvioitiin parhaiten hyödyntävän

muodonmuutoskäyttäytymistä kuvaavien mallien muodostamista ja tarkentamista.

Tässä tutkimusraportissa esitellään projektin M12 "Sitomattomien materiaalien moduulit" yhteydessä suoritettujen täydentävien dynaamisten kolmiaksaaliko-keiden keskeisimmät tulokset. Projektin liittyvässä toisessa osaraportissa esitellään puolestaan muodonmuutosmoduulien arviointimenettely, joka on muodostettu sekä TTKK:n geotekniikan laboratoriossa aiemmin suoritettuihin kuormituskoesarjoihin että tämän projektin yhteydessä tehtyjen täydentävien dynaamisten kolmiaksaaliko-keiden tuloksiin pohjautuen /6/.

Vuoden 1995 alusta käyttöön otetussa TPPT-tutkimusohjelman toteutusorganisaatiossa projekti M12 "Sitomattomien materiaalien moduulit" sisältyy "Materiaalitekniikka" -osa-alueeseen, johon liittyviä tutkimusprojekteja koordinoi TkL Matti Huhtala VTT/tie- ja geotekniikasta. TTKK:n geotekniikan laboratoriossa projektin päävastuullisena tutkijana on toiminut TkL Pauli Kolisoja, joka on myös vastannut tämän tutkimusraportin kirjoittamisesta.

Sisältö

1	KUORMITUSKOKEIDEN SUORITUSTEKNIikka	5
1.1	Kuormituskoelaitteisto	5
1.2	Näytteiden valmistelu	6
1.3	Näytteiden kuormitustapa	7
2	TESTATUT NÄYTEMATERIAALIT	9
2.1	Havaintotiekohteiden materiaalit	9
2.2	Muiden täydentävien kokeiden näytemateriaalit	11
3	KUORMITUSKOENÄYTTEIDEN OMINAISUUDET	15
3.1	Kuormitettujen näytteiden määrä	15
3.2	Kuormituskoenäytteiden rakeisuudet	16
3.3	Kuormituskoenäytteiden tiiviys- ja kosteustilat	17
4	DYNAAMISTEN KUORMITUSKOKEIDEN TULOKSET	20
4.1	Koetulosten esittäminen	20
4.2	Koetulokset havaintotiemateriaaleilla	21
4.3	Koetulokset muilla näytemateriaaleilla	22
5	STAATTISTEN KUORMITUSKOKEIDEN TULOKSET	23
5.1	Koetulosten esittäminen	23
5.2	Koetulokset havaintotiemateriaaleilla	23
5.3	Koetulokset muilla näytemateriaaleilla	24
6	KOETULOSTEN TARKASTELUA	25
6.1	Havaintotiekohteiden näytemateriaalit	25
6.2	Tielaitoksen ohjealueiden mukaiset näytemateriaalit	28
6.2.1	Suodatinhiekkä	28
6.2.2	Jakavan kerroksen materiaalit	30
6.2.3	Kantavan kerroksen materiaalit	33
6.2.4	Yhteenveto	36
6.3	Näyteköön vaikutus	39
6.4	Vertailu CBR-kokeen tuloksiin	42

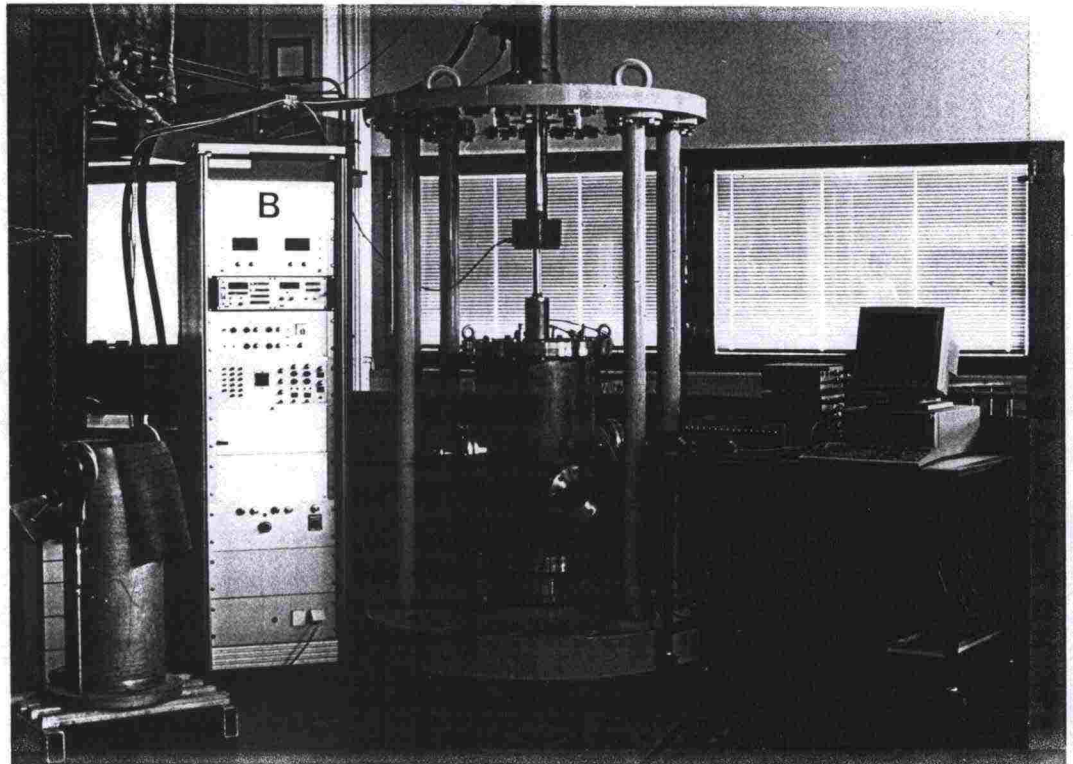
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	45
8	KIRJALLISUUSLUETTELO	47
9	LIITTEET	49

1. KUORMITUSKOKEIDEN SUORITUSTEKNIikka

1.1 Kuormituskoelaitteisto

Kuormituskoelaitteistona "Sitomattomien materiaalien moduulit" -projektin yhteydessä käytettiin samaa TTKK:n geotekniikan laboratoriossa rakennettua dynaamista kolmiaksaalilaitteistoa, jota oli käytetty samaan aihepiiriin liittyneissä aiemmissakin kuormituskoesarjoissa TTKK:lla (kuva 1.1). Kuormituskoelaitteiston ominaisuuksia onkin kuvattu yksityiskohtaisemmin aiempien tutkimusvaiheiden yhteydessä ilmestyneissä julkaisuissa /4,5/.

Merkittävin kuormituskoenäytteistä tehtäviin mittauksiin liittyvä muutos aikaisempiin koesarjoihin verrattuna oli näytteen pinnalta sen aksiaalista muodonmuutosta mittaavien antureiden määrän lisääminen kahdesta neljään. Tällä pyrittiin ennen muuta mittaustulosten hajonnan tasaamiseen ja tätä kautta tarvittavien rinnakkaiskokeiden määrän vähentämiseen.



Kuva 1.1. Kuormituskoekäytössä käytetty dynaaminen kolmiaksaalilaitteisto.

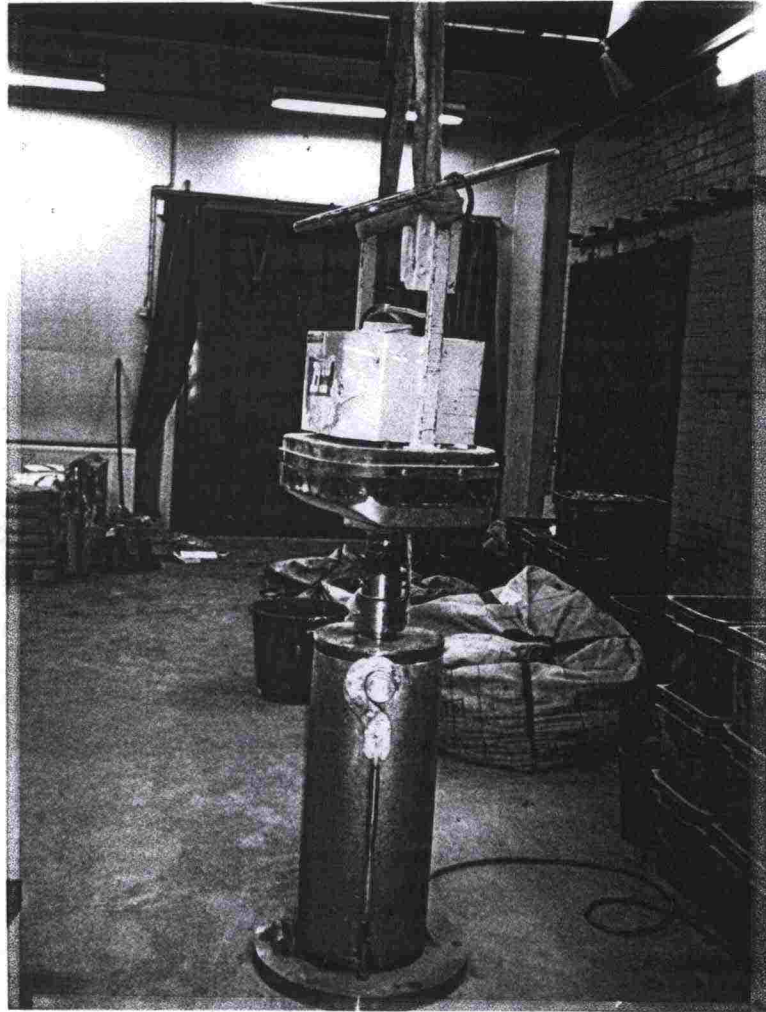
Toinen huomionarvoinen näytteen pinnalta tapahtuvaa aksiaalisen muodonmuutoksen mittausta koskeva seikka liittyy koesarjan yhteydessä käytettyihin näytekokoihin. Aiemmissa - 300 mm näytehalkaisijalla tehdyissä - koesarjoissa koesellin sisäpuolinen muodonmuutosmittaus oli nimittäin aina tehty näytekorkeuden keskimmäisestä kolmanneksesta 200 mm:n matkalta. Koska täydentävän koesarjan näytteistä pääosa tehtiin kuitenkin 200 mm:n näytehalkaisijaa ja noin 400 mm:n näytekorkeutta käyttäen, tuli näytteen pinnalta tapahtuvan muodonmuutosmittauksen mittausväliksi näytekorkeuden kaksi keskimmäistä neljänestä eikä keskimmäinen kolmannes kuten 300 mm:n näytteillä. Kuten kappaleessa 6.3 myöhemmin todetaan ei tällä kuitenkaan näyttäisi olleen ainakaan kovin merkittävää vaikutusta kokeista saatuihin mittaustuloksiin.

1.2 Näytteiden valmistelu

Kuormituslaitteistojen tavoin myös kuormituskoenäytteiden valmistelutekniikka pysyi täydentäviä dynaamisia kolmiaksaalikokeita tehtäessä aikaisempien tutkimusvaiheiden mukaisena /4,5/. Näin ollen näytteet tiivistettiin kerroksittain 100 kg:n painoista tärylevyä ja sen pohjaan kiinnitettyä sullontalevyä käyttäen (kuva 1.2). Pienempään näytekokoon siirtymisestä johtuen sullontamuotti sekä osittain myös sullontaan käytetty tärytinkalusto jouduttiin kuitenkin rakentamaan uudelleen.

Pääsääntöisesti maksimiraeekooltaan enintään 32 mm olevat näytemateriaalit sullottiin viiden senttimetrin paksuisina kerroksina. Näytemateriaalin murskaantumisen välttämiseksi alin tiivistyskerros sullottiin kuitenkin yleensä 100 mm paksuisena.

Kahdella havaintotiekohteiden näytemateriaalilla (näytemateriaalit 1113 ja 1142) jonkin verran hankaluuksia näytteiden sullontavaiheessa tuotti suhteellisen alhainen tavoitettävyyden arvo. Käytössä olleella tiivistyskalustolla sullontakerrosten tärytysajat jäivät tällöin hyvin lyhyiksi - pienimmillään vain muutaman sekunnin mittaisiksi. Tästä johtuen näytteiden tiivistilän homogeenisuudesta ei näillä materiaaleilla voitu täysin vakuuttua.



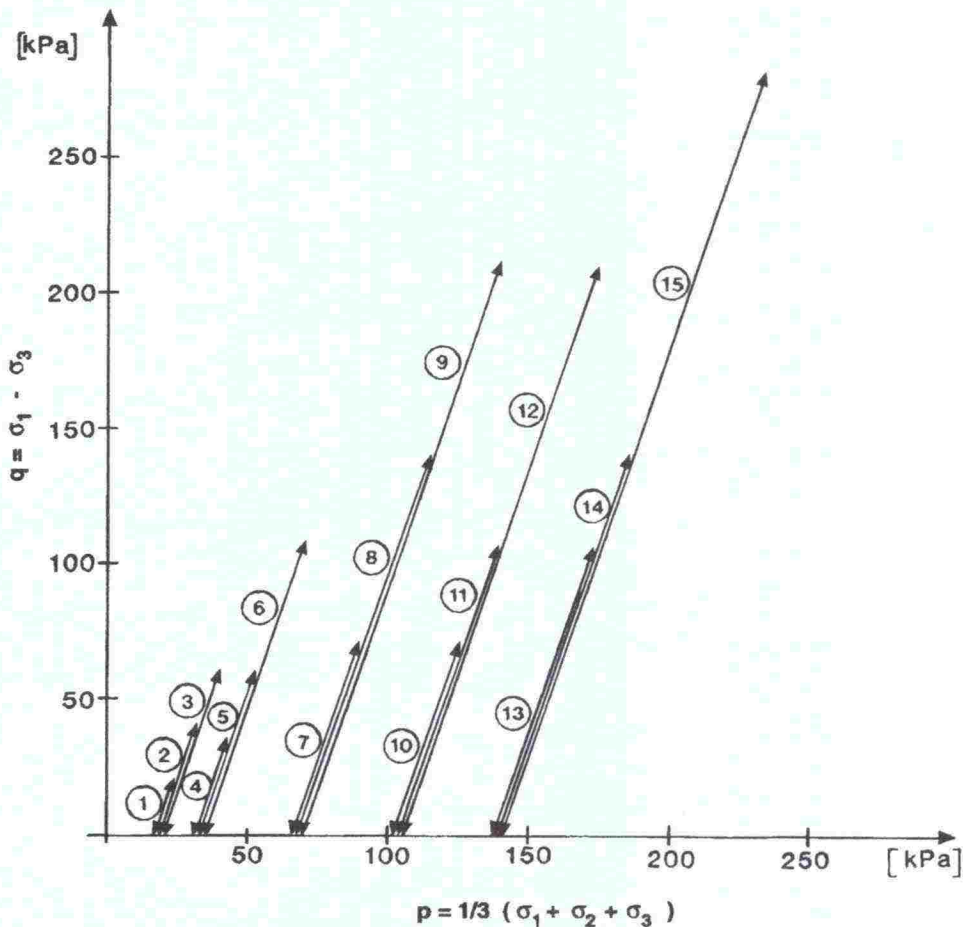
Kuva 1.2. Kuormitukoenäytteiden sullontaan käytetty tärytin ja halkaisijaltaan 300 mm oleva näytteen sullontamuotti.

1.3 Näytteiden kuormitustapa

Myös varsinaisten kuormituskokeiden suorituksessa pyrittiin mahdollisimman tarkasti noudattamaan aiemmissä tutkimusvaiheissa omaksuttuja käytäntöjä. Varsinkin havaintotiekohteiden materiaaleille tehdyissä kokeissa tätä pidettiin tärkeänä siksi, että niiden avulla tavoitteena oli löytää yhteys käytäntöön vakiintuneilla kuormitustavoilla saatavien laboratoriomittaustulosten ja kenttämittaustulosten välille. Koska muut täydentävät kokeet tehtiin pääasiassa tietäytteen suunnitteluohjeissa asetettuja materiaalivaatimuksia vastaaville kiviaineksille, pidettiin vastaavuuden löytämisestä myös niiden ja aikaisemman koetulosaaineiston välille niin ikään hyvin merkityksellisenä tavoitteena.

Edellä esitettyyn viitaten testattiin kuormituskoenäytteiden palautumatonta muodonmuutoskäyttäytymistä edelleen amerikkalaista "SHRP protocol P-46" -kuormitustapasuositusta noudattaen (kuva 1.3) /2/. Kuvan 1.3 mukaisesti kuormitussarja koostui näin ollen 15 erilaisesta aksiaalisen kuormituspulssin ja pulssisarjojen aikana vakiona pysyvän sellipaineen yhdistelmästä. Ennen varsinaisten mittaussarjojen ajamista näytteet esikuormitettiin lisäksi vähintään 500:lla 103 kPa:n (15 psi) sellipaineessa tehdyllä 103 kPa:n suuruisella aksiaalisella kuormituspulssilla.

Koska nyt kyseessä olevan tutkimusvaiheen ensisijaisena tavoitteena oli nimen omaan testattavien materiaalien muodonmuutosmoduulien määrittäminen, ei kuormituskoenäytteille tehty aikaisemmissa tutkimusvaiheissa sovellettua palautumattoman muodonmuutoskäyttäytymisen testisarjaa. Tällä pyrittiin siihen, että näytteissä olisi ollut mahdollisimman vähän palautumattomia muodonmuutoksia, kun niille kuormitussarjan lopuksi tehtiin staattinen kolmi-akksiaalikoe staattisen tilan muodonmuutosparametrien määrittämiseksi.



Kuva 1.3. SHRP protocol P-46:n mukaiset kuormituspulssit pq -jännitystasossa.

2. TESTATUT NÄYTEMATERIAALIT

2.1 Havaintotiekohteiden materiaalit

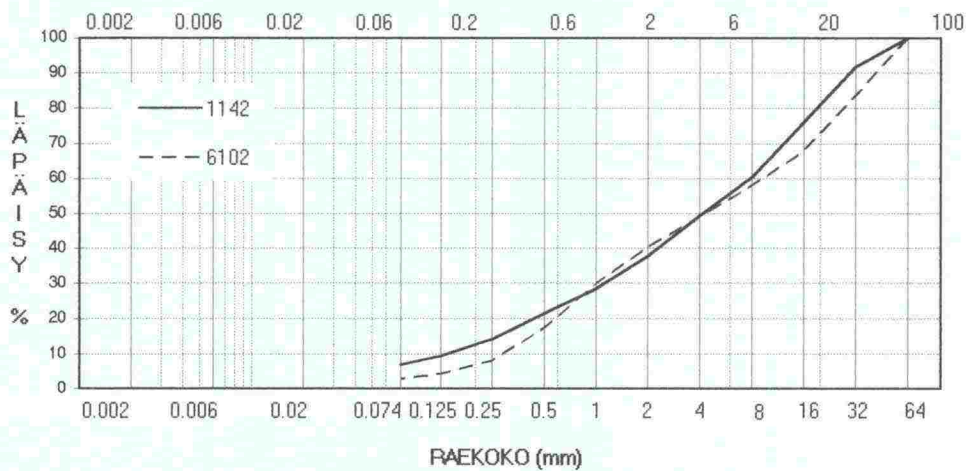
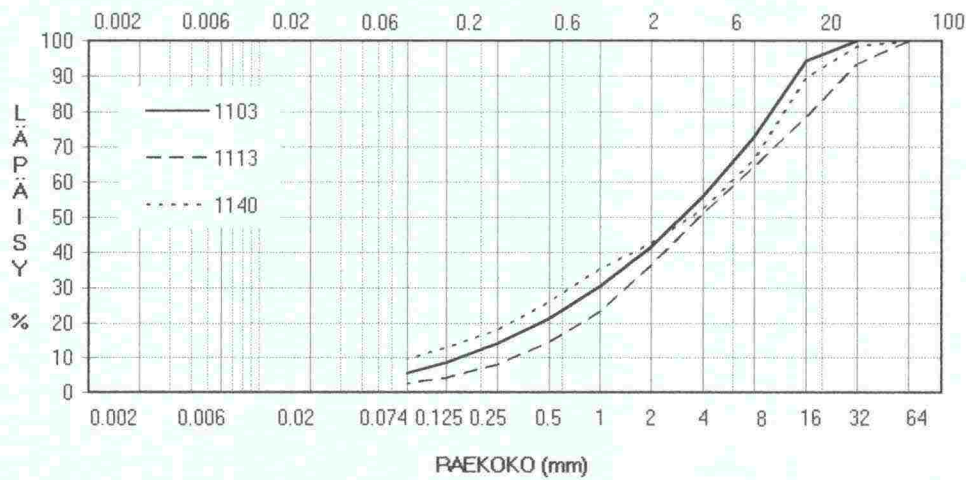
Noin puolet projektin M12 "Sitomattomien materiaalien moduulit" täydentävistä dynaamisista kolmiaksiaalikohteista oli ohjelmoitu tehtäviksi valituista havaintotiekohteista otetuille näytemateriaaleille. Testattavien materiaalien valinta tapahtui VTT:n tie- ja geotekniikan laboratorion toimesta. VTT oli myös huolehtinut näytemateriaalien hankinnasta sekä niiden käyttötilanteen mukaisten vesipitoisuus- ja tiiviyssarvojen määrittämisestä tierakenteissa.

Valittuja näytemateriaaleja oli kaikkiaan viisi kappaletta. Näytemateriaalien tunnuksot sekä niiden Troxler-laitteella määritetyt vesipitoisuudet sekä tiheysarvot on esitetty taulukossa 2.1. VTT:n toimesta materiaaleille ennakoon määritetyt rakeisuusjakautumat on puolestaan esitetty kuvassa 2.1.

Kaikki valituiksi tulleet havaintotiekohteiden materiaalit edustivat erilaisia kantavan kerroksen kiviaineksia. Kappalekuonamursketta sisältänyttä näytemateriaalia 1140 lukuun ottamatta kaikki näytemateriaalit olivat myös kokonaan kalliosta murskaamalla valmistettuja kiviaineksia. Alkuperäisistä näytemateriaaleista ainoastaan materiaali 6102 sisälsi merkittävässä määrin - noin 15 % - rakekooltaan yli 32 mm olevaa kiviainesta. TTKK:lle toimitetuista näytemateriaaleista kaikki yli 32 mm suuruiset kivet oli kuitenkin poistettu.

Taulukko 2.1. Havaintotiekohteiden näytemateriaalit sekä niitä vastaavat rakenteista mitatut vesipitoisuus- ja tiheysarvot.

Tunnus	Tieosa	Vesipitoisuus [%]	Irtotiheys märkänä [t/m ³]	Irtotiheys kuivana [t/m ³]
1103	113/04	1,95	2,130	2,09
1113	132/11	1,95	2,119	2,08
1140	778/02	3,11	2,330	2,26
1142	86/18	3,37	2,142	2,07
6102	53/29	2,14	2,216	2,17



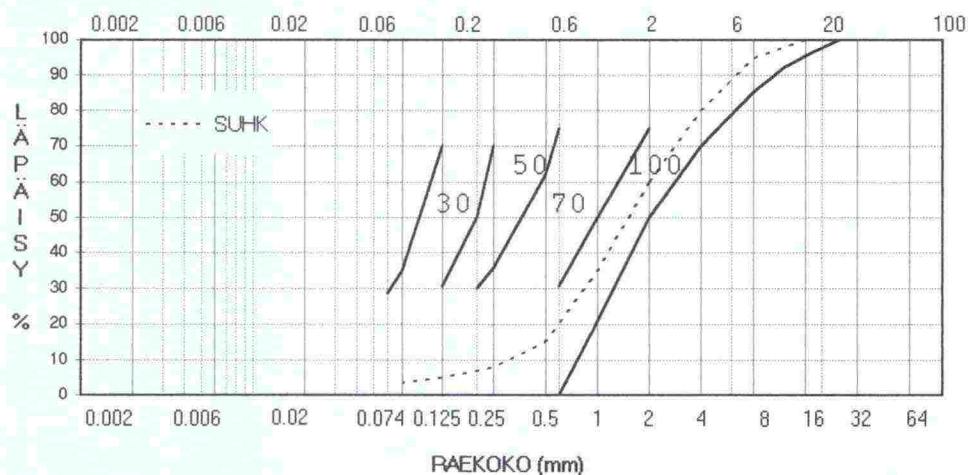
Kuva 2.1. Havaintotiekohteiden näytemateriaalien rakeisuusjakautumat.

Käytettävissä olleiden näytemateriaalien vähäisestä määrästä johtuen kuormituskokeita ei pystytty tekemään TTKK:n geotekniikan laitoksen aiemmissa koesarjoissa sovellettua 300 mm näytehalkaisijaa käyttäen. Niinpä kuormituskokeet tehtiinkin halkaisijaltaan 200 mm ja korkeudeltaan noin 400 mm oleville näytteille. Koska näytemateriaalit eivät sisältäneet yli 32 mm suuruisia rakeita, ei tällä arveltu olevan merkittävää vaikutusta kuormituskokeista saataviin tuloksiin.

2.2 Muiden täydentävien kokeiden näytemateriaalit

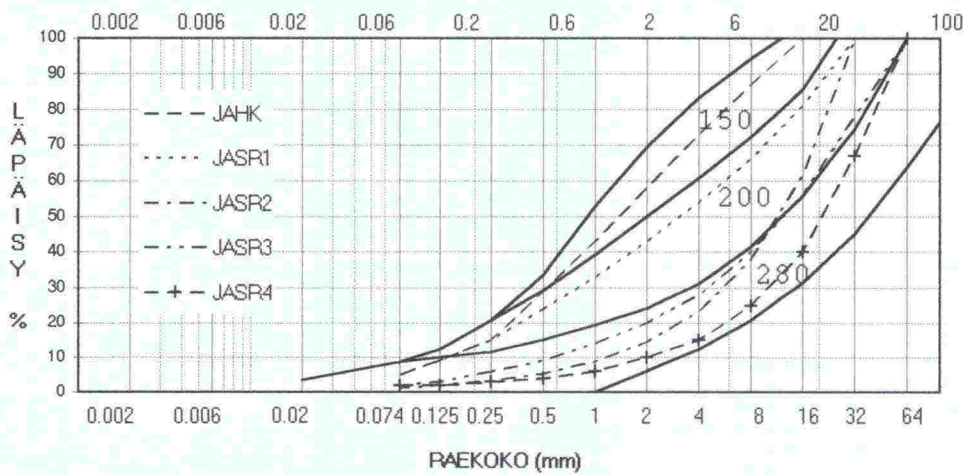
Havaintotiekohteiden materiaaleille tehtävien kuormituskokeiden lisäksi projektin toimintasuunnitelmassa oli varauduttu noin 10 - 15 muun täydentävän dynaamisen kolmiakσιαalikokeen tekemiseen. Tutkittavia näytemateriaaleja ei toimintasuunnitelmassa kuitenkaan määritelty tarkemmin, vaan kokeet todettiin tehtäviksi näytteille, joiden testauksen arvioidaan parhaiten hyödyntävän kiviainesten muodonmuutuskäyttäytymistä kuvaavien mallien muodostamista ja tarkentamista. Osana muodonmuutosominaisuuksien mallinnusta koskevia tarkasteluja näiden kokeiden yksityiskohtaisempi ohjelmointi tehtiinkin TTKK:n geotekniikan laboratorion toimesta.

Pääosa muista täydentävistä dynaamisista kolmiakσιαalikokeista tehtiin materiaaleille, joiden rakeisuuskäyrät pyrittiin sovittamaan voimassa olevissa tielaitoksen suunnitteluohjeissa sitomattomien kerrosten materiaaleille annettuja ohjealueita vastaaviksi [9]. Näytemateriaaleista suodatinkerroksen ohjealueelle sijoittuvan kiviaineksen tavoiterakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 2.2 sekä jakavan ja kantavan kerroksen ohjealueille sijoittuvien kiviainesten tavoiterakeisuuskäyrät vastaavasti kuvissa 2.3 ja 2.4.

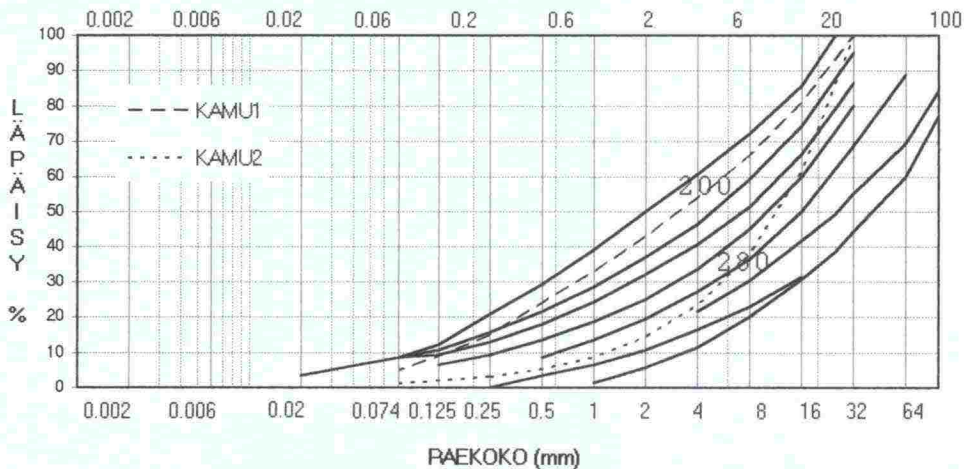


Kuva 2.2. Suodatinkerrosmateriaalin ohjealue sekä sille sovitettu näytemateriaalin rakeisuuskäyrä.

Kuvan 2.2 mukaisen rakeisuuden omaava suodatinhiekkä edustaa materiaalia, jonka E-moduuliarvoksi tielaitoksen suunnitteluohje suosittaa 100 MN/m^2 .



Kuva 2.3. Jakavan kerroksen kiviainesten ohjealue sekä sille sovitetut näyttemateriaalien rakeisuuskäyrät.



Kuva 2.4. Kantavan kerroksen kiviainesten ohjealue sekä sille sovitetut näyttemateriaalien rakeisuuskäyrät.

Kuvan 2.3 mukaisista jakavan kerroksen kiviainesten ohjealueelle sijoittuvista materiaaleista aiemmin suoritettujen kuormitussarjain huomioon ottaen kokonaan uusia ovat rakeisuuskäyriältään kaksi ylintä näyttemateriaalia. Tielaitoksen suunnitteluohjeessa esitetyn arviointimenettelyn mukaisesti näiden materiaalien E-moduuliarvot ovat vastaavasti 150 MN/m^2 ja 200 MN/m^2 . Rakeisuuskäyristä toiseksi ylin on valittu lisäksi siten, että se kulkee myös kantavan kerroksen kallio- ja soramurskemateriaalien alhaisinta E-moduuliarvoa 200 MN/m^2 vastaavalla ohjealueella (kuva 2.4) /9/.

Kolme muuta jakavan ja kantavan kerroksen kiviainesten ohjealueille sijoittuvaa tavoiterakeisuuskäyrää ovat samoja, joiden mukaisia näytemateriaaleja on kuormitettu jo aiempienkin koesarjojen yhteydessä. Koska luonnonkiviainenäytteille kokeita oli kuitenkin tehty vain kahdella karkearakeisimmalla näytemateriaalilla ja niilläkin ilman rinnakkaisnäytteitä, haluttiin luonnonkiviaineksilla ja kalliomurskemateriaaleilla saatavien tulosten vastaavuutta vielä tarkistaa muutamalla täydentävän koevaiheen yhteydessä tehdyllä lisäkokeella.

Kuvien 2.2 ja 2.3 mukaiset luonnonkiviainesta edustavat näytemateriaalit sekoitettiin tielaitoksen Hämeen piirin käytössä olevalta Pälkäneen Kantokylän sora-alueelta noudetusta kiviaineksestä. Ennen halutun rakeisuusjakautuman mukaiseksi suhteittamista alkuperäinen sora-aines kuivattiin ja jaettiin normaalseulasarjan mukaisiin lajitteisiin seulomalla. Kuvan 2.4 mukaiset, kantavan kerroksen ohjealueelle sijoittuvien rakeisuuskäyrien mukaiset materiaalit testattiin puolestaan näytteillä, joiden kiviaines oli Sievin Korianmäen kalliomursketta.

Yhteenvedo tielaitoksen suunnitteluohjeiden mukaisille ohjealueille sovitetuista täydentävien dynaamisten kolmiaksiaalikoekoiden näytemateriaaleista ja niille käytetyistä tunnuksista on esitetty taulukossa 2.2. Tunnukset on johdettu näytemateriaaleja vastaavien rakennekerros-ohjealueiden sekä kyseessä olevien materiaalien maalajinimien perusteella. Materiaaleille, joita on kuormitettu jo aiempien näytesarjojen yhteydessä, on taulukossa esitetty myös niistä aiemmin käytetyt tunnuksat.

Koska huomattava osa täydentävän koevaiheen dynaamisista kolmiaksiaalikoekista tehtiin pienemmällä näytekoolla kuin aikaisemmat kuormituskoesarjat, haluttiin koesarjan yhteydessä myös erikseen testata käytettävän näytekoon mahdollista vaikutusta koetuloksiin. Tätä tutkittiin kuvan 2.4 mukaisella 0 - 32 mm lajittuneella kalliomurskeella (näytemateriaali KAMU2), jota oli aikaisempien koesarjojen yhteydessä testattu 300 mm näytehalkaisijaa käyttäen (aiempi näytetunnus CRS). Nyt samanlaista materiaalia kuormitettiin näytehalkaisijaan 200 mm valmistelluilla näytteillä, joiden tiiviys- ja kosteus-tila pyrittiin saamaan mahdollisimman identtiseksi aikaisemmissä koesarjoissa testattujen näytteiden kanssa.

Taulukko 2.2. Yhteenveto tielaitoksen suunnitteluohjeessa esitettyihin ohjealuesiin sovitetuista näytemateriaaleista.

Näytemateriaalin tunnus	Max raekoko [mm]	Näyte- halk. [mm]	Para- metri n**	Kuva nro
SUHK SUodatinkerr. HieKka	16 (8)	200	-	2.2
JAHK JAKavan kerr. HieKka	16	200	~ 0,25	2.3
JASR1 JAKavan kerr. SoRa 1	32	200	~ 0,3	2.3
JASR2 JAKavan kerr. SoRa 2	32	200	0,7	2.3
JASR3 (NGWM)* JAKavan kerr. SoRa 3	55	300	0,45	2.3
JASR4 (NGPM)* JAKavan kerr. SoRa 4	55	300	0,7	2.3
KAMU1 KAntavan kerr. MUrske 1	32	200	~ 0,3	2.4
KAMU2 (CRSM)* KAntavan kerr. MUrske 2	32	200	0,7	2.4

* Aikaisempien koesarjojen yhteydessä vastaavanlaisesta näytemateriaalista käytetty tunnus.

** Niin kutsutun Fullerin kaavan $P = 100 \cdot (d/d_{\max})^n$ mukainen eksponenttiarvo. Materiaalien JAHK, JASR1 ja KAMU1 rakeisuuskäyrät noudattavat Fullerin kaavaa kuitenkin vain 1 - 2 mm karkeampien lajitteiden osalta.

3. KUORMITUSKOENÄYTTEIDEN OMINAISUUDET

3.1 Kuormitettujen näytteiden määrä

TTKK:ssa aiemmin tehtyjen dynaamisten kolmiaksaalikoesarjojen yhteydessä on yleensä pyritty kolmen rinnakkaisnäytteen kuormittamiseen. Koska nyt suoritettavaksi ohjelmoitujen kokeiden kokonaismäärä oli kuitenkin vain 25 kappaletta ja toisaalta lisäselvitystä vaativia seikkoja oli vielä varsin monia, pyrittiin kokeiden suorituksessa pääsääntöisesti selviämään kahden rinnakkaisnäytteen kuormittamisella. Mahdollisuudet tähän antoi ennen kaikkea kappaleessa 1.1 mainittu pystysiirtymäantureiden määrän lisäys kahdesta neljään. Kolmannen rinnakkaiskokeen tarvetta harkittiin näin ollen tapauskohtaisesti kunkin näytesarjan kohdalla erikseen.

Taulukko 3.1. Täydentävien dynaamisten kolmiaksaalikokeiden toteutuneet näytemäärät.

Näytesarjan tavoite	Näytemater. tunnus	Rinnakkais- näytteitä	Näytteitä yhteensä
Laboratorio- ja in-situ	1103	2	11
-mittaustulosten vertailu	1113	3	
havaintotiekohteiden	1140	2	
näytemateriaaleilla	1142	2	
	6102	2	
Laboratoriomäärittysten ja	SUHK	3	15
rakeisuuskäyrään perustu-	JAHK	2	
vien moduuliarvojen vertailu	JASR1	2	
	JASR2	2	
Murskeen ja luonnonkivi-	JASR3	2	
aineksen vertailu	JASR4	2	
	KAMU1	2	
Näyteköön vaikutuksen tarkistaminen	KAMU2	2	2

Taulukossa 3.1 on esitetty täydentävien dynaamisten kolmiakσιαalikokeiden toteutuneet näytemäärät näytetyypeittäin jaoteltuina. Suoritettujen kuormituskoekokonaismääräksi taulukosta todetaan 28 kappaletta. Havaintotiekohteiden materiaaleilla täydentävistä kokeista tehtiin 11 kappaletta, tielaitoksen ohjealueisiin sovitetuilla näytemateriaaleilla 15 kappaletta ja näytekuon vaikutuksen tarkistamistavoitteeseen liittyen kaksi kappaletta.

3.2 Kuormituskoenäytteiden rakeisuudet

Aiempien kuormituskoesarjojen yhteydessä näytemateriaalien toteutuneita rakeisuuksia kontrolloitiin yleensä jokaisesta kuormituskoenäytteestä otetulla kolmella seulontanäytteellä. Kun seulontanäytteet tällöin otettiin kuormituskoenäyteen ylä-, keski- ja alaosaan, voitiin samalla tehdä havaintoja näytemateriaalin mahdollisesta lajittumisesta näytteen valmistelun ja kuormittamisen aikana. Koska kaikki täydentävät dynaamiset kolmiakσιαalikokeet tehtiin kuitenkin kostealla näytemateriaalilla, jonka ei yleensä ole todettu mainittavasti lajittuvan, otettiin seulontanäytteitä nyt vain yksi kustakin kuormituskoenäytteestä. Havaintotiemateriaalien osalta näin oli pakkokin menetellä, koska käytettävissä olleen näytemateriaalin määrä oli hyvin rajallinen ja pesuseulontamääritys luonteensa mukaisesti tuhoaa aina seulottavan materiaalin alkuperäisen raekokajakautuman.

Täydentävän kuormituskoesarjan näytemateriaaleille tehtyjen pesuseulontojen tulokset on esitetty liitteessä 1. Havaintotiekohteista otettujen materiaalien osalta rakeisuuksien tavoitearvoina on kuvissa esitetty myös VTT:n toimesta kyseisille materiaaleille ennakkoon määritetyt rakeisuusjakautumat, kun niissä on otettu huomioon yli 32 mm suuruisen rakeiden poistaminen kuormituskokeiden näytemateriaaleista.

Havaintotiekohteiden näytemateriaaleilla poikkeamat rakeisuuksien tavoitearvoista todetaan pienimmiksi materiaaleilla 1103 ja 6102 ja suurimmiksi vastavasti näytemateriaaleilla 1113 ja 1142. Syinä poikkeamiin voivat olla toisaalta erot ennakkoseulonnoissa käytettyjen ja TTKK:lle toimitettujen näytemateriaalien rakeisuuksissa ja toisaalta erot kuormituskoenäytteissä käytettyjen ja kuormituskokeiden jälkeisiin kontrolliseulontoihin erotettujen materiaalien rakeisuuksissa. Jälkimmäisen osalta virhemahdollisuuksia lisää se, että pesuseulonnat tehtiin näytemateriaalien säästämiseksi suhteellisen pienistä näyteristä (noin 2,5 - 3,0 kg).

Tielaitoksen suunnitteluohjeiden mukaisiin rakeisuusjakautumiin suhteitetuilla näytemateriaaleilla erot kontrolliseulontojen tulosten ja tavoiterakeisuuksien välillä havaitaan yleisesti ottaen jonkin verran havaintotiemateriaaleilla todettuja eroja pienemmiksi. Karkeimpien lajitteiden osalla ongelmana tässäkin tapauksessa on ilmeisesti ollut lähinnä pesuseulontanäytteiden edustavuus (esim. näytemateriaali JASR4). Toisaalta varsinkin runsaasti hienorakeisia lajitteita sisältävillä näytemateriaaleilla tyypilliseksi piirteeksi todetaan hieman tavoitearvoa korkeampi hienoainesmäärä. Pääasiallisena syynä tähän on ollut erityisesti 0,074 mm - 2 mm suuruisten rakeiden pinnoille kiinnittynyt hienoaines, jonka osuutta näytemateriaaleissa ei näytteiden valmistelun yhteydessä pystytty täysin kontrolloimaan, koska materiaalilajitteita ei pesty.

3.3 Kuormituskoenäytteiden tiiviys- ja kosteustila

Havaintotiekohteiden materiaaleista tehdyt näytteet pyrittiin valmistelemaan mahdollisimman tarkoin alkuperäisistä rakenteista mitattujen tiheys- ja vesipitoisuusarvojen mukaisiksi. Kuten taulukoita 2.1 ja 3.2 vertaamalla todetaan, on tässä myös varsin hyvin onnistuttu. Tiiviyсарvojen suhteen suurimmaksi poikkeama todetaan näytesarjan ensimmäisellä näytteellä 1103_1, jolla informaatiokatkoksesta johtuen kuivairtitiheyden tavoitearvona pidettiin virheellisesti rakenteesta mitattua märkäirtitiheyttä. Vesipitoisuuksien osalta poikkeamat voivat osittain johtua myös pesuseulontanäytteen ottoon ja edustavuuteen liittyvistä virhetekijöistä, koska näytemateriaalin valmisteluvaiheessa siihen sekoitetun veden määrää pystyttiin joka tapauksessa kontrolloimaan varsin tarkasti.

Taulukko 3.2. Havaintotiemateriaaleista tehtyjen näytteiden toteutuneet tiheydet ja vesipitoisuudet.

Näytteen tunnus	Kuivairto- tiheys [t/m ³]	Huokoi- suus [%]	Vesipitoi- suus [%]	Kyllästys- aste [%]	HUOM !
1103_1	2,125	20,1	1,98	21	Virh. tav.tiheys
1103_2	2,084	21,6	1,98	19	
1113_1	2,085	21,9	1,94	18	
1113_2	2,080	22,1	1,95	18	
1113_3	2,080	22,1	1,95	18	
1140_1	2,262	15,3	2,89	43	
1140_2	2,260	15,4	3,11	46	
1142_1	2,077	23,4	3,37	30	Kiviaines käy- tetty uudelleen
1142_2	2,086	23,0	2,68	24	
6102_1	2,162	19,0	2,19	25	
6102_2	2,163	19,0	2,15	24	

Muiden täydentävien dynaamisten kolmiaksaalikokeiden toteutuneet tiivys- ja kosteustilat on esitetty taulukossa 3.3. Tielaitoksen ohjealueiden mukaisiin rakeisuuksiin valmistelluilla näytteillä tiivistäminen tehtiin työmäärällä, jonka kokemukseräisesti oli muilla karkearakeisilla kiviaineksilla todettu johtavan kohtuullisen korkeaan tiivysasteeseen. Tavoitetiivysarvojen valinnassa pyrittiin tällöin tietoisesti välttämään Proctor-sullontakokeeseen sidonnaisia tiivysastetarkasteluja, koska näin karkearekeisilla kiviaineksilla niiden soveltamiseen oli aiemmissa tutkimusvaiheissa todettu liittyvän monia huomattavan suuria ongelmia. Aikaisemmin tehdyissä kuormituskoesarjoissa mukana olleita näytemateriaaleja vastaavilla kiviaineksilla tavoitetiiviyksinä ja -vesipitoisuuksina pidettiin puolestaan aikaisempien kokeiden vastaavia arvoja.

Taulukko 3.3. Muiden täydentävien kuormituskoenäytteiden toteutuneet tiheydet ja vesipitoisuudet.

Näytteen tunnus	Kuivairto- tiheys [t/m ³]	Huokoi- suus [%]	Vesipitoi- suus [%]	Kyllästys- aste [%]	HUOM !
SUHK_1	1,971	26,2	5,42	41	
SUHK_2	2,007	24,8	5,13	41	
SUHK_3	1,995	25,3	5,29	42	
JAHK_1	2,039	23,6	4,22	36	
JAHK_2	2,062	22,8	4,03	37	
JASR1_1	2,155	19,3	3,64	41	
JASR1_2	2,147	19,6	4,05	44	
JASR2_1	2,081	22,0	1,82	17	
JASR2_2	2,086	21,9	1,61	15	
JASR3_1	2,178	18,4	3,05	36	Mater. vanha tunnus NGW
JASR3_2	2,179	18,4	3,00	36	
JASR4_1	2,164	19,0	1,92	22	Mater. vanha tunnus NGP
JASR4_2	2,164	19,0	1,84	21	
KAMU1_1	2,209	20,3	3,25	35	
KAMU1_2	2,232	19,4	3,22	37	
KAMU2_1	2,080	24,9	1,84	15	Mater. vanha tunnus CRS
KAMU2_2	2,080	24,9	1,82	15	

4. DYNAAMISTEN KUORMITUSKOKEIDEN TULOKSET

4.1 Koetulosten esittäminen

Dynaamisista kolmiaksaalikokeista saatujen tulosten esittämiseen käytetään tässä yhteydessä aiempien tutkimusvaiheiden tapaan resilient-moduulin käsitettä. Kuormituskoenäytteeseen kohdistuvan aksiaalisen kuorman ja tästä aiheutuvan muodonmuutoksen perusteella resilient-moduuli määritellään kaavan 4.1 mukaisesti:

$$M_r = \frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon^e} \quad (4.1)$$

missä

M_r	on	resilient-moduuli
Δq	on	kuormituspulssia vastaava aksiaalisen kuorman vaihteluväli
$\Delta \varepsilon^e$	on	näytteen palautuva aksiaalinen muodonmuutos

Näytekohtaiset mittaustulokset SHRP protocol P-46:n mukaisesti suoritetuista kuormitussarjoista on esitetty liitteessä 2. Näytteille määritetyt resilient-moduulin arvot on tällöin esitetty näytteeseen aksiaalisen kuormituksen huippuarvon kohdalla vaikuttaneiden pääjännitysten summan $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_3 + \Delta q$ funktiona. Jäljempänä esitettävissä yhteenvetotuloksissa resilient-moduulin riippuvuutta jännitystilasta kuvataan myös pääjännitysten summan funktiona kaavan 4.2 mukaisella approksimaatiolla:

$$M_r = K_1 \theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \quad (4.2)$$

missä

M_r	on	resilient-moduuli
θ	on	pääjännitysten summa, kun aksiaalinen kuormituspulssi on maksimiarvossaan
θ_0	on	vertailujännitys (100 kPa)
K_1, K_2	ovat	materiaaliparametreja

4.2 Koetulokset havaintotiemateriaaleilla

Yhteenveto havaintotiekohteiden materiaaleille tehtyjen dynaamisten kolmiaksaalikohteiden tuloksista on esitetty taulukossa 4.1. Siihen on koottu materiaalityypeittäin rinnakkaisnäytteiden keskiarvotuloksena määritetyt kaavan 4.2 mukaiset materiaaliparametrit K_1 ja K_2 sekä näitä vastaavat resilient-moduulin esimerkkisarvot muutamalla erilaisella pääjännityssumman arvolla laskettuina.

Näytemateriaalilla 1103 tulokset on taulukossa 4.1 esitetty sekä molempien rinnakkaisnäytteiden keskiarvoon että pelkästään jälkimmäiseen kuormituskoetulokseen perustuvina; ensimmäisen rinnakkaisnäytteen tiheyshän todettiin edellä jonkin verran oikeata tavoitearvoa korkeammaksi. Näytemateriaalilla 1113 taas rinnakkaiskokeista järjestyksessä keskimmäistä ei esitettyissä tuloksissa ole otettu lainkaan huomioon, koska sillä tulos poikkesi selvästi kahdesta muusta rinnakkaisnäytteestä. Kyseisellä näytemateriaalilla pääasiallisin syy koetulosten hajontaan lienee ollut melko alhainen tavoitetiheyssarvo, josta johtuen näytteiden sullominen kauttaaltaan homogeeniseen tiivistilaan oli hankalaa.

Taulukko 4.1. Havaintotiekohteiden näytemateriaalien materiaaliparametrit K_1 ja K_2 sekä muutama näitä vastaava resilient-moduulin esimerkkisarvo.

Näyte	K_1	K_2	R	M_r [MPa]			
				$\theta = 100$ kPa	$\theta = 200$ kPa	$\theta = 300$ kPa	$\theta = 500$ kPa
1103_1	2037	0,565	0,972	204	301	379	506
1103_2	1890 ⁽¹⁾	0,567 ⁽¹⁾	0,992 ⁽¹⁾	189 ⁽¹⁾	280 ⁽¹⁾	352 ⁽¹⁾	471 ⁽¹⁾
1113_1	1516	0,552	0,992	152	222	278	369
1113_3							
1140_1	2781	0,499	0,974	278	393	481	620
1140_2							
1142_1	1673	0,448	0,967	167	228	274	344
1142_2							
6102_1	2829	0,461	0,977	283	389	496	594
6102_2							

¹⁾ Tulos on laskettu pelkästään kokeen 1103_2 perusteella.

4.3 Koetulokset muilla näytemateriaaleilla

Tielaitoksen ohjealueiden mukaisiin rakeisuusjakautumiin suhteitetuilla näytemateriaaleilla saatujen tulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 4.2. Samassa taulukossa on esitetty myös ensi sijassa näytekoon vaikutuksen selvittämiseksi tehtyjen kuormituskokeiden tulokset (näytemateriaali KAMU2).

Taulukko 4.2. Muiden täydentävissä kokeissa kuormitettujen näytemateriaalien materiaaliparametrit K_1 ja K_2 sekä muutama näitä vastaava resiliient-moduulin esimerkkiarvo.

Näyte	K_1	K_2	R	M_r [MPa]			
				$\theta = 100$ kPa	$\theta = 200$ kPa	$\theta = 300$ kPa	$\theta = 500$ kPa
SUHK_1 SUHK_2	1577	0,484	0,952	158	221	268	344
JAHK_1 JAHK_2	1888	0,498	0,922	189	267	326	421
JASR1_1 JASR1_2	2422	0,480	0,952	242	338	410	524
JASR2_1 JASR2_2	2198	0,488	0,906	220	308	376	482
JASR3_1 ⁽¹⁾ JASR3_2 ⁽¹⁾	2244	0,485	0,945	224	314	382	490
JASR4_1 ⁽²⁾ JASR4_2 ⁽²⁾	2387	0,480	0,966	239	333	404	517
KAMU1_1 KAMU1_2	2057	0,577	0,957	206	307	388	521
KAMU2_1 ⁽³⁾ KAMU2_2 ⁽³⁾	2233	0,496	0,953	223	315	385	496

⁽¹⁾ Näytemateriaalin tunnus aiemmissa koesarjoissa: NGW

⁽²⁾ Näytemateriaalin tunnus aiemmissa koesarjoissa: NGP

⁽³⁾ Näytemateriaalin tunnus aiemmissa koesarjoissa: CRS

5. STAATTISTEN KUORMITUSKOKEIDEN TULOKSET

5.1 Koetulosten esittäminen

Täydentävän kolmiaksaalikoesarjan näytteille 50 kPa:n sellipaineessa tehtyjen avoimien kolmiaksaalikokeiden näytekohtaiset kuormitus-muodonmuutoskuvaajat on esitetty liitteessä 3. Esitetyt tulokset perustuvat suoraan kuormituskoenäytteen pinnalta mitattuun aksiaaliseen kuormitukseen ja muodonmuutokseen.

5.2 Koetulokset havaintotiemateriaaleilla

Havaintotiekohteiden näytemateriaaleille tehdyissä staattisissa kolmiaksaalikokeissa näytekohtaisesti mitatut aksiaalisen kuormituksen maksimi-arvot sekä näitä vastaavat aksiaaliset muodonmuutokset on esitetty taulukossa 5.1. Samassa yhteydessä on myös esitetty muutamalle eri jännitystasolle lasketut sekanttimoduulin arvot.

Taulukko 5.1. Staattisten kolmiaksaalikokeiden tulokset havaintotiekohteiden näytemateriaaleilla.

Näyte	$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ [kPa]	ε_{1f} [%]	Staattisen kolmiaksaalikokeen sekanttimoduuli [MPa]		
			$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) =$ 50 kPa ($\theta = 200$)	$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) =$ 150 kPa ($\theta = 300$)	$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) =$ 350 kPa ($\theta = 500$)
1103_1	849	0,45	251	270	327
1103_2	700	0,45	262 ⁽¹⁾	250 ⁽¹⁾	296 ⁽¹⁾
1113_1	524	0,59	163	205	226
1113_3	412	0,37			
1140_1	1161	0,39	227	290	368
1140_2	1101	0,66			
1142_1	449	0,47	145	172	173
1142_2	412	0,57			
6102_1	830	0,30	251	281	356
6102_2	742	0,39			

⁽¹⁾ Tulos on laskettu pelkästään kokeen 1103_2 perusteella.

5.3 Koetulokset muilla näytemateriaaleilla

Muilla kuin havaintotiekohteiden näytemateriaaleille tehtyjen täydentävien staattisten kolmiaksaalikokeiden tulokset on koottu taulukkoon 5.2. Samaan tapaan kuin edellä taulukossa 5.1 siinä on esitetty näytekohtaisesti määritetyt aksiaalisen puristusjännityksen maksimiarvot, näitä vastaavat aksiaaliset muodonmuutokset sekä muutamalle eri jännitystasolle määritetyt sekanttimoduulin arvot.

Taulukko 5.2. Staattisten kolmiaksaalikokeiden tulokset muilla täydentävän kuormituskoesarjan näytemateriaaleilla.

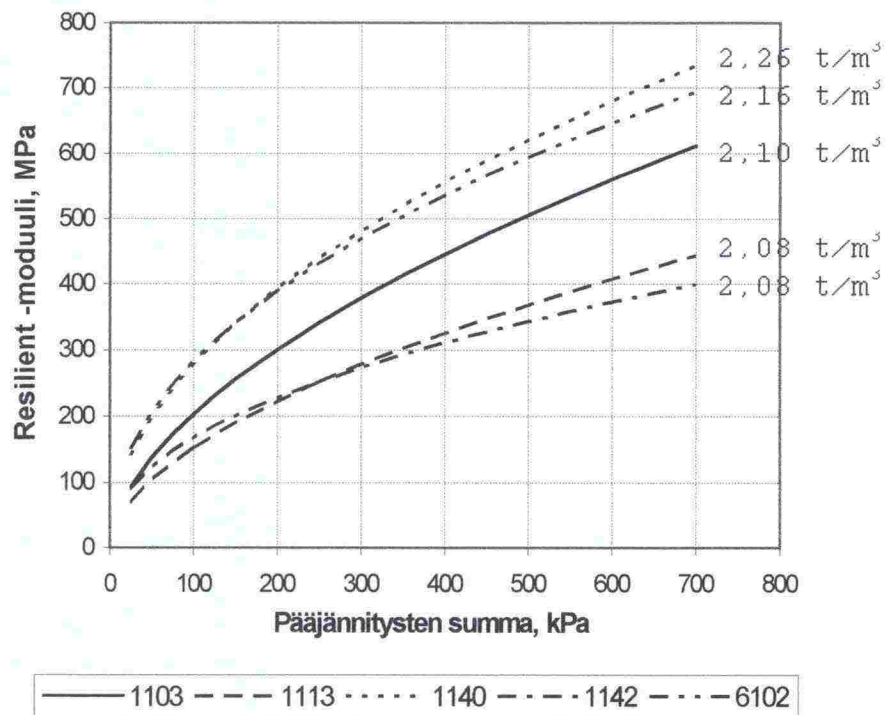
Näyte	$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ [kPa]	ε_{1f} [%]	Staattisen kolmiaksaalikokeen sekanttimoduuli [MPa] $\theta = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) + 3\sigma_3 = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) + 150$		
			$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) =$ 50 kPa ($\theta = 200$)	$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) =$ 150 kPa ($\theta = 300$)	$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) =$ 350 kPa ($\theta = 500$)
SUHK_1	483	0,48	189	196	206
SUHK_2	496	0,31			
JAHK_1	542	0,36	214	222	241
JAHK_2	569	0,34			
JASR1_1	688	0,31	246	270	330
JASR1_2	643	0,27			
JASR2_1	479	0,44	226	268	294
JASR2_2	572	0,33			
JASR3_1	387	0,32	260	256	210
JASR4_1	352	0,23	215	260	195
JASR4_2	429	0,40			
KAMU1_1	1362	0,59	275	302	350
KAMU1_2	1199	0,75			
KAMU2_1	987	0,44	240	286	371
KAMU2_2	1008	0,46			

6. KOETULOSTEN TARKASTELUA

6.1 Havaintotiekohteiden näytemateriaalit

Kuormituskoesarjassa testatut havaintotiekohteiden näytemateriaalit poikkesivat rakeisuusjakautumiltaan suhteellisen vähän toisistaan (kuva 2.1 ja liite 1). Sinänsä tämä ei ole millään tavalla odottamatonta, koska kaikki viisi näytemateriaalia edustivat kantavan kerroksen kiviaineksia. Niinpä varsin hallitsevaksi materiaalien muodonmuutosmoduuleissa todettuja eroja selittäväksi tekijäksi näyttikin nousevan näytemateriaalien tiivystila (kuva 6.1).

Kuvassa 6.1 eri näytemateriaaleille määritettyjä resilient -moduulin arvoja on kuvattu kaavan 4.2 mukaisella approksimaatiolla. Pääsääntöisesti moduuliarvojen todetaan tällöin asettuvan näytemateriaalien kuivairtohiykyksien mukaiseen järjestykseen, joskaan erot eivät kuitenkaan näytä olevan suorassa suhteessa näytteiden tiheyseroihin.

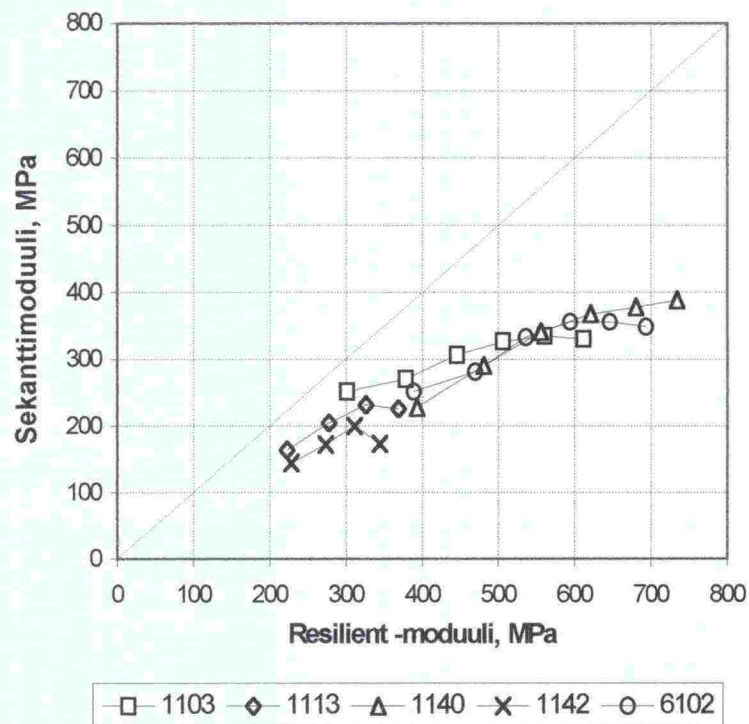


Kuva 6.1. Havaintotiemateriaaleille määritettyjen resilient-moduulien vertailu.

Koska havaintotiekohteiden näytemateriaaleista ei ollut käytettävissä Proctor-sullontojen tai muiden standarditiivistysmenetelmien tuloksia, eikä niitä näytemateriaalien vähäisestä määrästä johtuen ollut myöskään mahdollista tehdä, ei eri materiaalien muodonmuutosmoduuleita voida tässä vaiheessa verrata näytteiden suhteellisiin tiiviyksiin perustuen. Kuormituskoenäytteiden valmistelun yhteydessä havaittujen likimääräisten tärytysaikojen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että näytemateriaalilla 1103 tavoitteena olleen - vain vähän näytemateriaaleja 1113 ja 1142 korkeamman - tiheysarvon saavuttaminen edellytti selvästi kahta viimeksi mainittua kiviainesta suurempaa tiivistystyömäärää. Korkeampi suhteellinen tiiviyssaste olisikin näin ollen varsin luonteva selitys näytemateriaalin 1103 selvästi materiaaleja 1113 ja 1142 korkeammille resilient-moduularvoille.

Varsinaista vertailua dynaamisilla kolmiakselialikokeilla laboratoriossa määritettyjen resilient-moduulien ja havaintotiekohteissa tehdyistä pudotuspainomittauksista takaisinlaskettujen moduularvojen välillä ei tehdä tässä yhteydessä, vaan se tulee tapahtumaan TPPT-projektin E311 "Kuormituskestävyysmallien arviointi havaintotieaineistolla" puitteissa. Niinpä tulosten keskinäisestä vastaavuudesta voidaankin tässä yhteydessä todeta vain se, että **johtopäätösten kannalta erittäin kriittinen tekijä tulee olemaan ennen kaikkea havaintotiekohteissa tehtyjen tiiviyssmittausten oikeellisuus ja niiden vastaavuus pudotuspainomittausten aikaiseen tilanteeseen.**

Kuvassa 6.2 on vielä verrattu havaintotiekohteiden näytemateriaaleille määritettyjä resilient-moduuleita ja samoista näytteistä staattisten kolmiakselialikokeiden yhteydessä mitattuja sekanttimoduuleita keskenään. Vertailussa käytetty koordinaatisto on valittu siten, että kaavan 4.2 mukaisella mallilla kuvatut resilient-moduulin arvot on esitetty vaaka-akselilla ja sekanttimoduulin arvot pystyakselilla. Eri jännitystasoilla kullekin näytemateriaalille määritetyt moduularvoparit kuvautuvat tällöin käyränä, jonka vasemmanpuoleinen alkupiste edustaa alhaisinta tarkasteltavaa jännitystasoa. Tässä tapauksessa alhaisin jännitystaso, jolla vertailun tekeminen on ollut mielekästä, vastaa pääjännityssumman arvoa $\theta = 200$ kPa. Tällöin staattisessa kokeessa vallinnut pääjännitysero on ollut $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = 50$ kPa, koska sellipaineena on käytetty arvoa $\sigma_3 = 50$ kPa ja pääjännityssumma $\theta = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) + 3\sigma_3$. Mainitusta alkuarvosta eteenpäin moduulien vertailu on esitetty kullekin näytemateriaalille 100 kPa:n suuruisin pääjännityssumman eroin.



Kuva 6.2. Havaintotiekohteiden näytemateriaalien resiliient ja sekanttimoduulien vertailu.

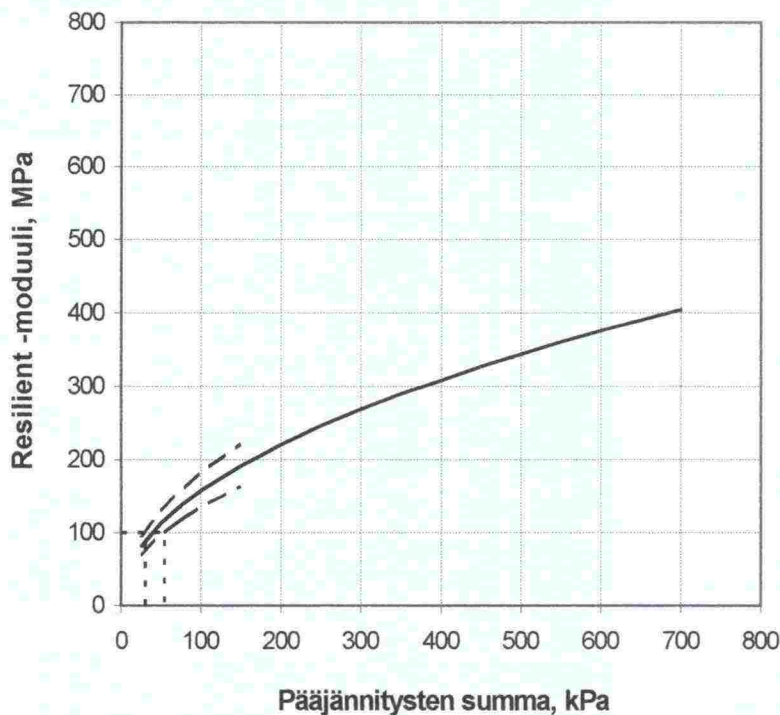
Kuten kuvasta 6.2 todetaan on sekantti- ja resiliient -moduulien suhde kaikilla havaintotiekohteiden näytemateriaalilla ollut varsin samansuuruinen, vaikka erot tiiviydeltään huomattavan erilaisten kuormituskoenäytteiden muodonmuutosmoduulien absoluuttiarvoissa ovatkin varsin suuret.

Eräs seikka, joka kuvassa 6.2 esitettyjä tuloksia tarkasteltaessa on syytä pitää mielessä on se, että kullakin näytemateriaalilla vain kahta vasemmanpuoleisinta havaintopistettä - pääjännityssumman arvoja 200 kPa ja 300 kPa - vastaavat mittaukset on molemmilla kuormitustavoilla tehty toisiaan vastaavalla pysty- ja vaakajännityksen suhteella. Suuremmilla pääjännityssumman arvoilla, joita edustavat käyrien oikeanpuoleisimmat pisteet, staattisen kokeen pääjännityssuhde kasvaa nimittäin selvästi dynaamisen kokeen suurinta pääjännityssuhdetta $\sigma_1/\sigma_3 = 4$ suuremmaksi. Kuvassa 6.2 tästä johtuva sekanttimoduuliarvojen suhteellinen aleneminen näkyy vastaavasti käyrien taipumisena alaspäin, kun niitä pitkin siirrytään oikealle eli suurempia pääjännityssumman arvoja kohti.

6.2 Tielaitoksen ohjealueiden mukaiset näytemateriaalit

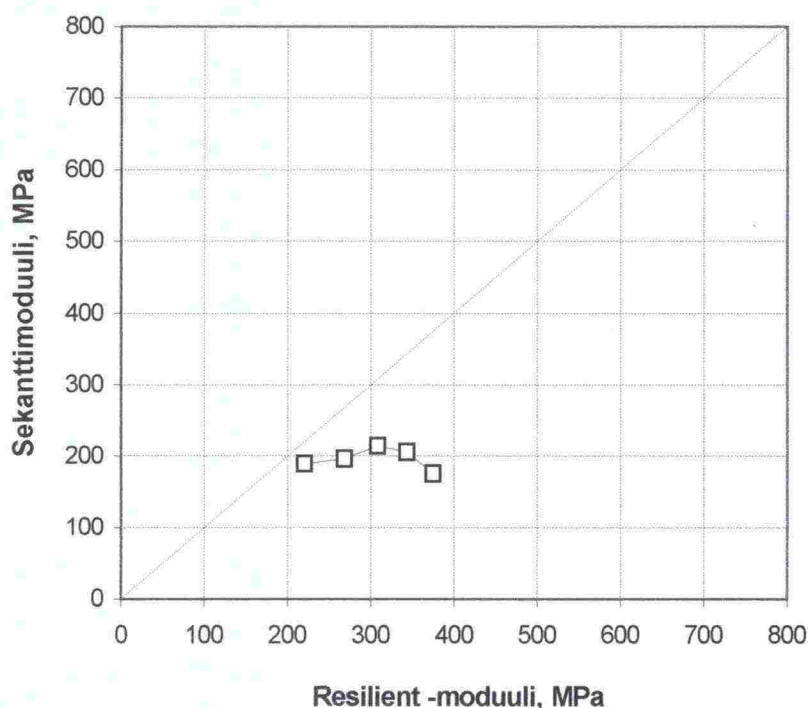
6.2.1 Suodatinhiekkä

Tielaitoksen suunnitteluohjeiden mukaiselle karkealle suodatinhiekkamateriaalille (kuva 2.2 ja liite 1) määritettyjä liitteen 2 mukaisia resilient-moduularvoja vastaava kaavan 4.2 mukainen sovituskäyrä on esitetty kuvassa 6.3. Mittaus-tuloksiin perustuvan sovituskäyrän lisäksi kuvassa on esitetty myös moduuli-arvojen $\pm 15\%$ vaihtelua kuvaavat apukäyrät, joiden väliin jäävän alueen voinee olettaa kattavan todellisissa tierakenteissa esiintyvät tiiviystilan vaihtelut suhteessa kuormituskoenäytteiden tiivyyteen. Sovituskäyrien ekstrapolaation avulla voidaan tällöin arvioida, että suunnitteluohjeessa esitettyä E-moduularvoa 100 MN/m^2 vastaava resilient-moduuli saavutettaisiin kuormituskoenäytteen materiaalilla suunnilleen pääjännityssumman arvolla $\theta \approx 35 - 50 \text{ kPa}$. Tavanomaisessa suomalaisessa tierakenteessa tämä ilmeisesti vastaakin suuruusluokaltaan kohtuullisen hyvin suodatinhiekkakerroksen todellista jännitystasoa liikennekuormitustilanteessa.



Kuva 6.3. Suodatinhiekkamateriaalille määritettyjä resilient-moduularvoja vastaava kaavan 4.2 mukainen sovituskäyrä ja moduularvojen $\pm 15\%$ vaihteluväli.

Suodatinhiekkamateriaalille staattisessa kolmiaksaalikokeessa määritettyjen sekanttimoduuliarvojen vertailu kuvan 6.3 mukaisiin resilient-moduuleihin on puolestaan esitetty kuvassa 6.4. Kuvan mukaisesti sekanttimoduulit todetaan myös tässä tapauksessa kauttaaltaan vastaavalla jännitystasolla määritettyjä resilient -moduuleja alhaisemmiksi. Edellä kuvassa 6.2 esitettyyn kalliomurskemateriaaleilla saatuun tulokseen verrattuna sekanttimoduulin kasvu jännitystason mukana näyttäisi kuitenkin hitaammalta, mistä johtuen muodonmuutosmoduulien suhde muuttuu koko ajan jännitystason - ennen muuta siis pysty- ja vaakasuuntaisen pääjännityksen suhteen - muuttuessa.

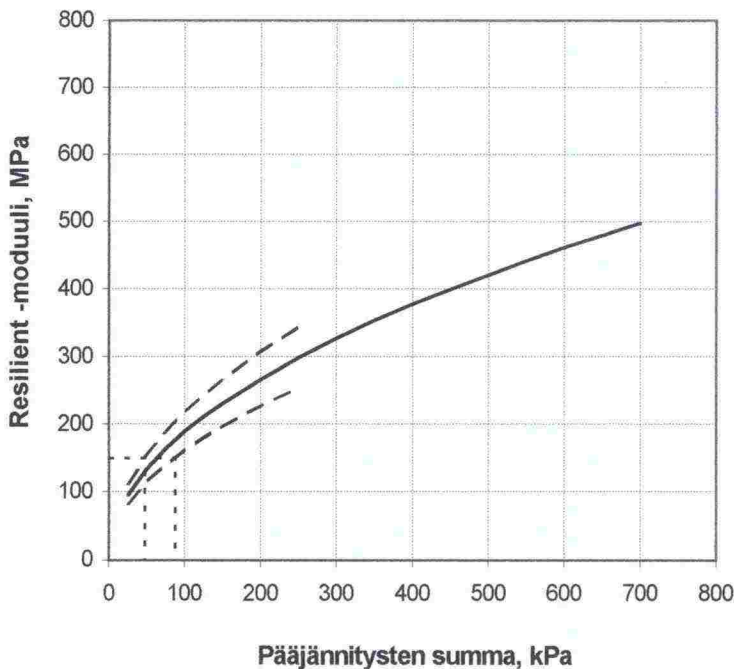


Kuva 6.4. Suodatinhiekkamateriaalille määritettyjen sekantti- ja resilient-moduulien vertailu.

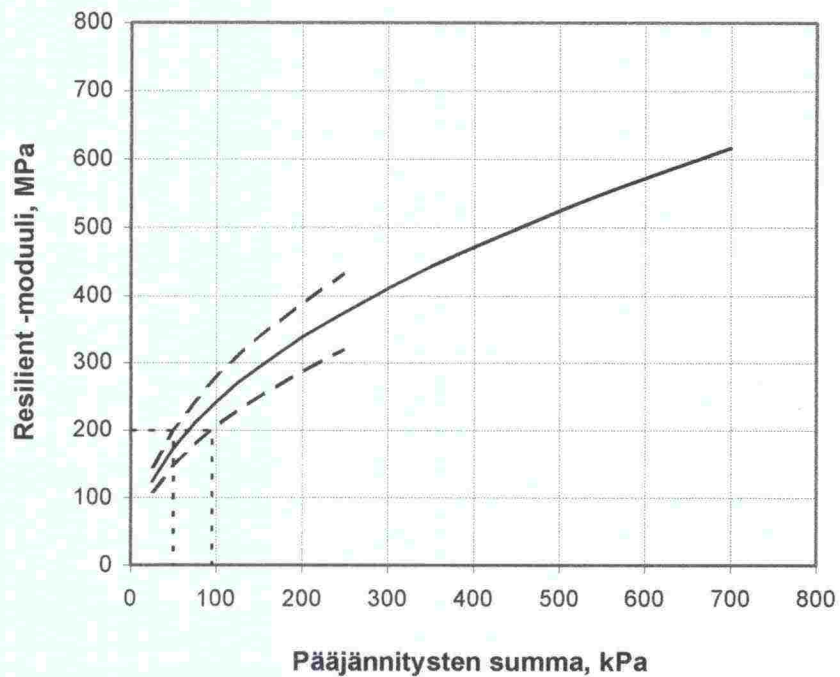
6.2.2 Jakavan kerroksen materiaalit

Jakavan kerroksen kiviainekselle JAHK, jonka E-moduuliarvo tielaitoksen suunnitteluohjeiden mukaisesti on 150 MN/m^2 , määritetyt resiliient -moduulin arvot on kaavan 4.2 mukaisena sovituksena esitetty kuvassa 6.5. Kuvissa 6.6 ja 6.7 on puolestaan esitetty vastaava tulos näytemateriaaleille JASR1 ja JASR2, joiden E-moduuliksi tielaitoksen suunnitteluohjeen perusteella saadaan 200 MN/m^2 .

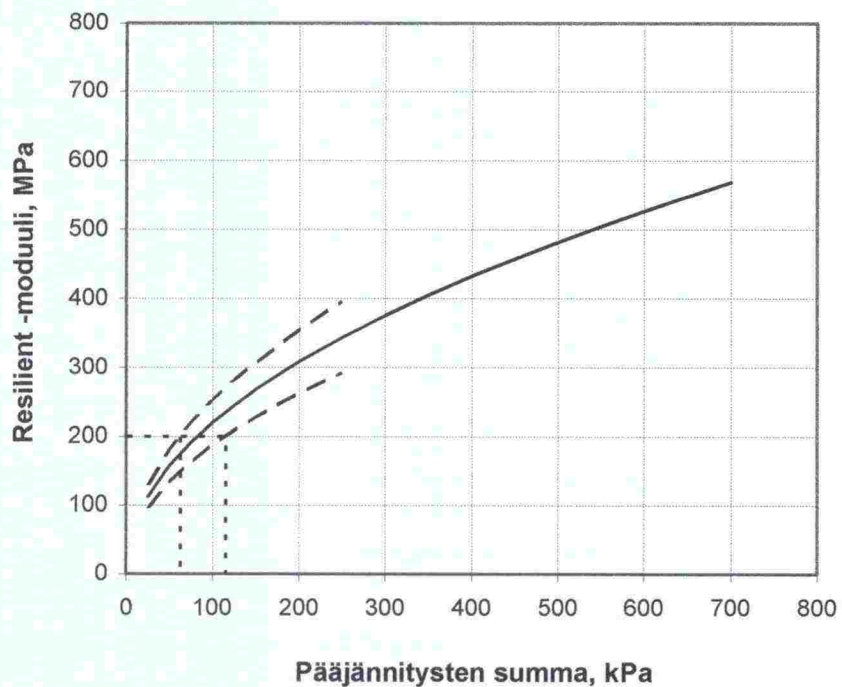
Kuvissa 6.5, 6.6 ja 6.7 on varsinaisten mittaustuloksiin perustuvien approksimaatiokäyrien lisäksi jälleen esitetty moduuliarvoille myös $\pm 15\%$ vaihteluväli, jonka voidaan olettaa vastaavan todellisissa tierakenteissa esiintyvää tiiviysarvojen vaihtelua. Näin tarkasteltuna tielaitoksen suunnitteluohjeessa esitetyt E-moduuliarvoja vastaavat resiliient -moduulit näytetään kyseisillä materiaaleilla saavutettavan suunnilleen pääjännityssumman arvoa $\theta \approx 60 - 90 \text{ kPa}$ vastavalla jännitystasolla.



Kuva 6.5. Näytemateriaalille JAHK määritettyjä resiliient -moduuliarvoja vastaava kaavan 4.2 mukainen sovituskäyrä ja moduuliarvojen $\pm 15\%$ vaihteluväli.



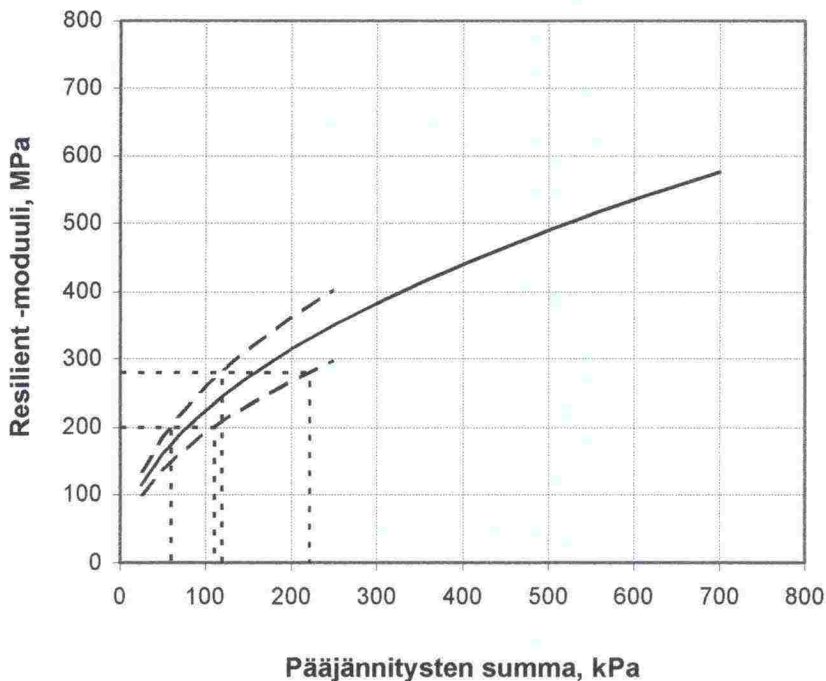
Kuva 6.6. Näyttemateriaalille JASR1 määritettyjä resilient -moduuliarvoja vastaava kaavan 4.2 mukainen sovituskäyrä ja moduuliarvojen $\pm 15\%$ vaihteluväli.



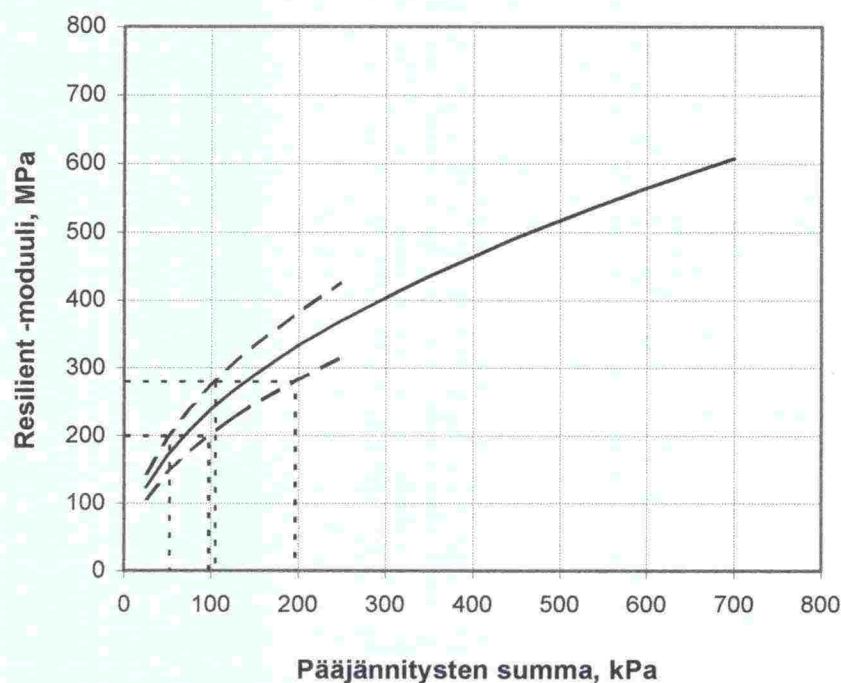
Kuva 6.7. Näyttemateriaalille JASR2 määritettyjä resilient -moduuliarvoja vastaava kaavan 4.2 mukainen sovituskäyrä ja moduuliarvojen $\pm 15\%$ vaihteluväli.

Edelleen kuvissa 6.8 ja 6.9 on mittaustuloksiin perustuvat muodonmuutosmoduulin approksimaatiokuvaajat $\pm 15\%$ vaihteluväleinen esitetty näyttemateriaaleille JASR3 ja JASR4. Nämä materiaalit edustavat tielaitoksen suunniteluohjeessa esitettyihin ohjekäyrästöihin nähden eräänlaisia rajatapauksia. Kummankin materiaalin rakeisuuskäyrät nimittäin kulkevat pääosin E-moduuli-arvoa 280 MN/m^2 vastaavalla ohjealueella, mutta käyrien yläpäättävät päättyvät kuitenkin 200 MN/m^2 alueelle. Lisäksi tilanne on vielä niin, että rakeisuudeltaan suhteistuneemman kiviaineksen JASR3 rakeisuuskäyrä kulkee näyttemateriaalia JASR4 pidemmän matkan E-moduuli-arvoa 200 MN/m^2 vastaavalla ohjealueella.

Kuten kuvista 6.8 ja 6.9 todetaan, vastaa resiliient -moduulin arvo 200 MPa myös näyttemateriaaleilla JASR3 ja JASR4 jännitystasoa, jolla pääjännityssumman arvo on suuruusluokkaa $\theta \approx 60 - 90 \text{ kPa}$. Vastaavasti resiliient -moduulin arvo 280 MPa saavutetaan vasta jännitystasolla, jolla $\theta \approx 130 - 190 \text{ kPa}$. Huomionarvoinen piirre kuvien 6.8 ja 6.9 tuloksissa on myös se, että rakeisuusjakautumien muotoerosta huolimatta molempien näyttemateriaalien muodonmuutosmoduulit ovat suuruusluokaltaan hyvin lähellä toisiaan - itse asiassa lajittuneemmalla kiviaineksella jopa hivenen suhteistunutta materiaalia korkeimmat.



Kuva 6.8. Näyttemateriaalille JASR3 määritettyjä resiliient -moduuli-arvoja vastaava kaavan 4.2 mukainen sovituskäyrä ja moduuli-arvojen $\pm 15\%$ vaihteluväli.

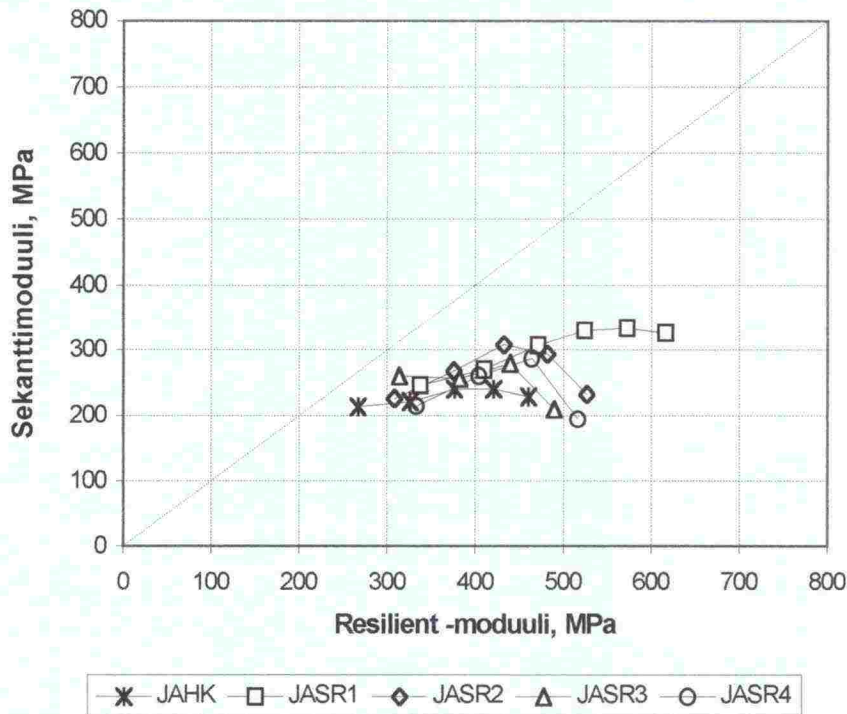


Kuva 6.9. Näyttemateriaalille JASR4 määritettyjä resilient -moduularvoja vastaava kaavan 4.2 mukainen sovituskäyrä ja moduularvojen $\pm 15\%$ vaihteluväli.

Rakeisuudeltaan jakavan kerroksen ohjealueelle sijoittuvien hiekka- ja soramateriaalien sekantti- ja resilient -moduulien vertailu on esitetty kuvassa 6.10. Kuvasta todetaan, että hienorakeisimmalla näyttemateriaalilla JAHK eri jännitystasoilla mitattujen muodonmuutosmoduulien suhde on varsin saman kaltainen kuin edellä kuvassa 6.4 suodatinhiekalle esitetty tuloskin on. Rakeisuudeltaan karkeammilla näyttemateriaaleilla moduulisuhteen käyttäytyminen lähestyy puolestaan havaintotiekohteiden kalliomurskeille edellä kappaleessa 6.1 esitettyä tulosta.

6.2.3 Kantavan kerroksen materiaalit

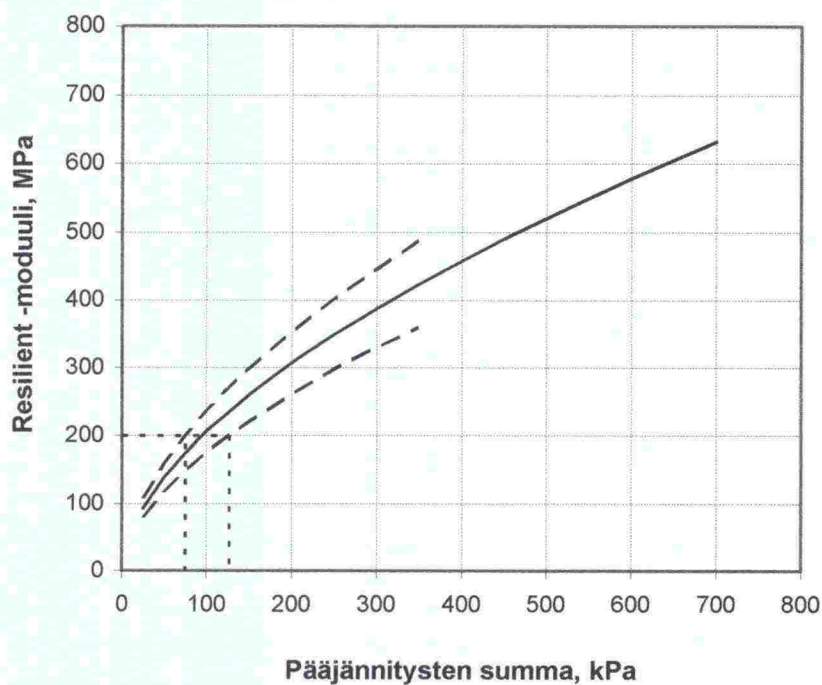
Murskattuja, rakeisuudeltaan kantavan kerroksen ohjealueelle sijoittuvia näyttemateriaaleja täydentävän tutkimusvaiheen kuormituskoesarjassa oli mukana kaksi kappaletta. Näistä hienorakeisempi oli sovitettu E-moduularvoa 200 MN/m^2 vastaavalle ohjealueelle, ja oli rakeisuudeltaan samanlainen kuin luonnonkiviaineksesta valmistettu näyttemateriaali JASR1 (kuvat 2.3 ja 6.6). Rakeisuuskäyrältään lajittuneemman näyttemateriaalin KAMU2 E-moduularvoksi tielaitoksen suunnitteluohjeen perusteella saadaan vastaavasti vain 150 MN/m^2 , koska materiaalin rakeisuuskäyrä ylittää neljä ohjealueen sisäistä rajakäyrää.



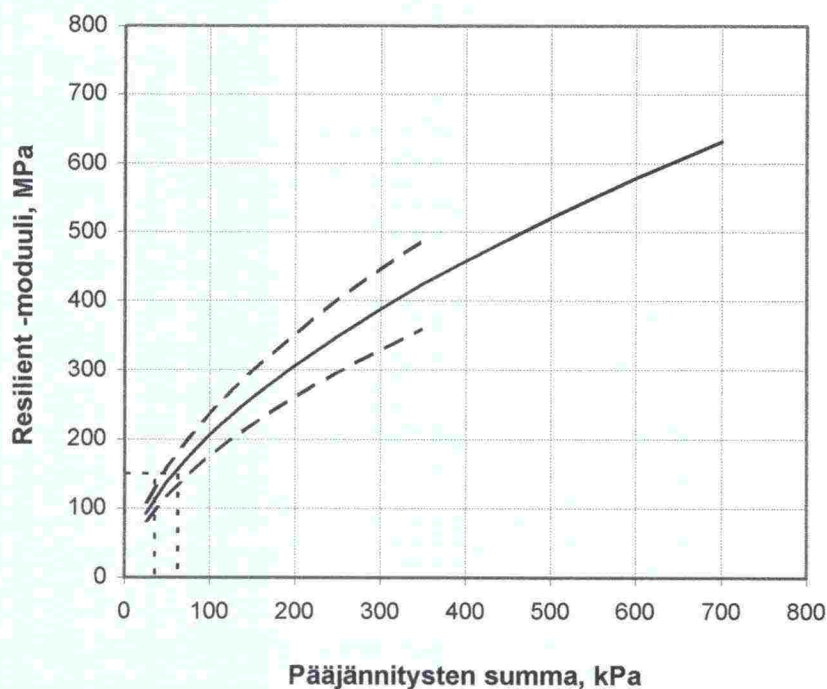
Kuva 6.10. Jakavan kerroksen hiekka- ja soramateriaaleille määritettyjen sekantti- ja resilient -moduulien vertailu.

Kuvissa 6.11 ja 6.12 esitetyistä resilient -moduuliarvoista ja niiden otaksutuista vaihteluväleistä todetaan, että hienorakeisemmalla näytemateriaalilla KAMU1 tielaitoksen suunnitteluohjeen E-moduuliarvoa vastaava resilient -moduuli saavutetaan suunnilleen pääjännityssummaa $\theta \approx 80 - 120$ kPa vastaavalla jännitystasolla. Lajittuneemmalla näytemateriaalilla KAMU2 mitattu moduuliarvo vastaa puolestaan suunnitteluohjeen moduuliarvoa, kun pääjännitysten summa on vain noin $\theta \approx 50$ kPa. Liikennekuormitustilanteessa tierakenteen kantavassa kerroksessa toteutuvat jännitykset huomioon ottaen erityisesti jälkimmäisessä tapauksessa jännitystaso vaikuttaa epärealistisen alhaiselta. Kaiken kaikkiaan näytemateriaalille KAMU2 suunnitteluohjeen perusteella saatava E-moduuliarvo 150 MN/m^2 lieneekin liian alhainen, koska rakeisuusjakautumien muotoerosta huolimatta mitatut resilient -moduuliarvot näytemateriaalilla KAMU1 ja KAMU2 ovat lähes yhtenevät.

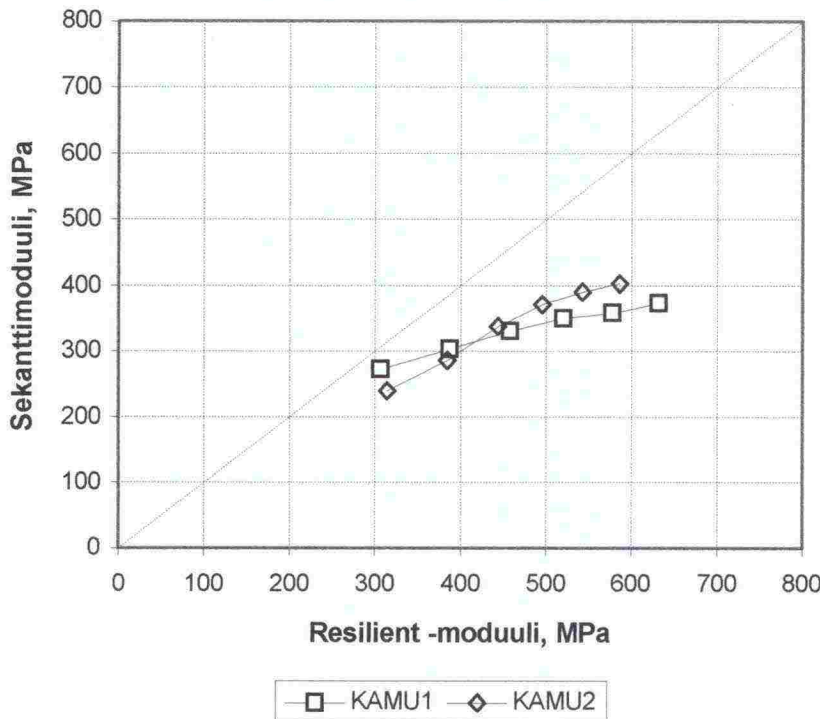
Kuvassa 6.13 kantavan kerroksen kalliomurskeille esitetyn sekantti- ja resilient -moduulien vertailun perusteella muodonmuutosmoduulien suhteen todetaan vastaavan varsin hyvin havaintotiekohteiden kalliomurskeille kappaleessa 6.1 esitettyä tulosta.



Kuva 6.11. Näyttemateriaalille KAMU1 määritettyjä resiliient -moduuliarvoja vastaava kuvan 4.2 mukainen sovituskäyrä ja moduuliarvojen $\pm 15\%$ vaihteluväli.



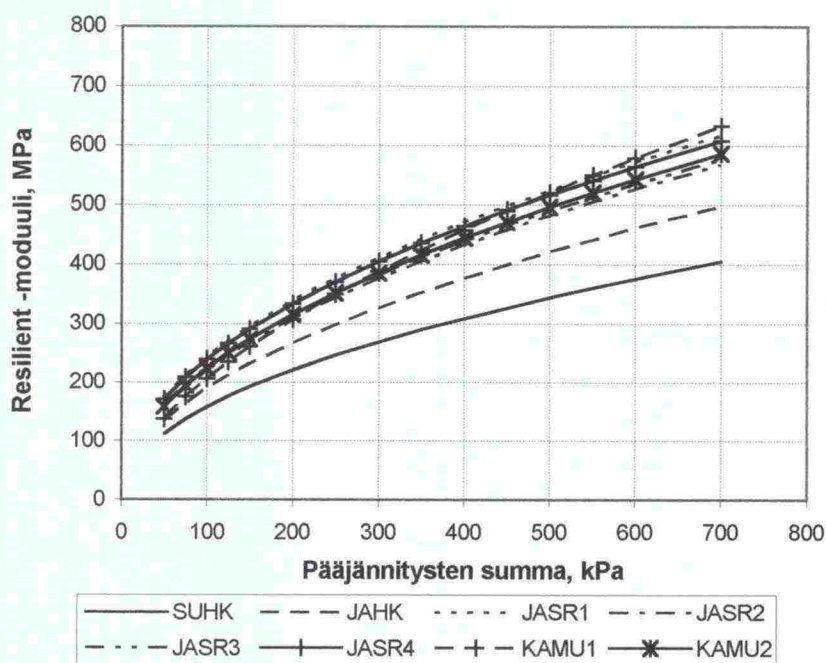
Kuva 6.12. Näyttemateriaalille KAMU2 määritettyjä resiliient -moduuliarvoja vastaava kuvan 4.2 mukainen sovituskäyrä ja moduuliarvojen $\pm 15\%$ vaihteluväli.



Kuva 6.13. Kantavan kerroksen murskemateriaaleille määritettyjen sekantti- ja resilient -moduulien vertailu.

6.2.4 Yhteenveto

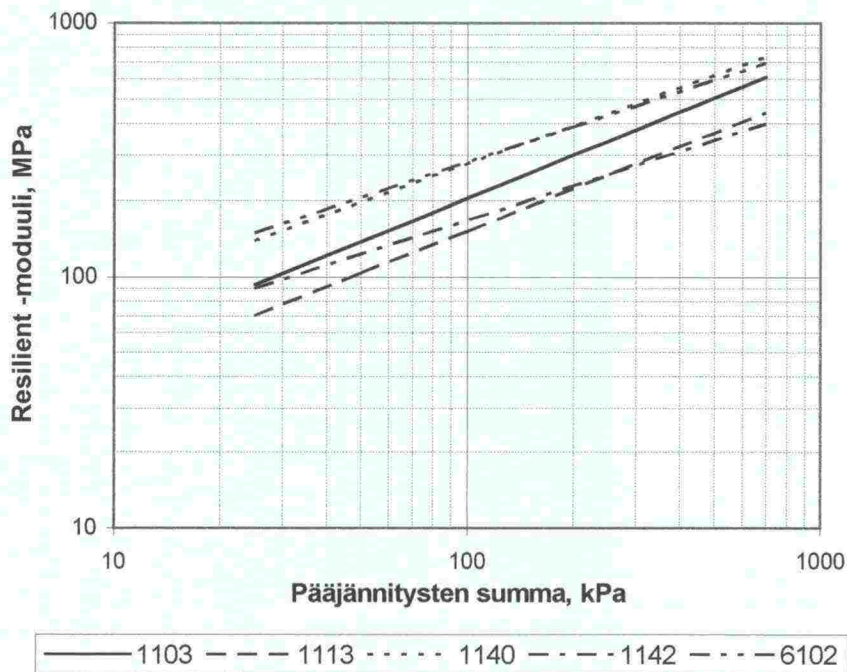
Yhteenvetona kantavan, jakavan ja suodatinkerroksen ohjealueille sijoituville näytemateriaaleille tehdyistä kuormituskokeista kuvassa 6.14 on vielä esitetty kaavan 4.2 mukaiset resilient -moduulikuvaajat kaikille näytemateriaaleille. Kuvasta todetaan, että vertailukelpoisilla jännitystasoilla ainoastaan suodatinhiekan sekä rakeisuudeltaan jakavan kerroksen ohjealueella ylimmäksi sijoittuvan näytemateriaalin JAHK muodonmuutosmoduulit ovat selvästi muita testattuja kiviaineksia alhaisemmat. Erot erilaisten sora- ja kalliomurskemateriaalien välillä näyttävät sen sijaan varsin vähäisiltä. Koska näytemateriaalien suhteelliset tiivyydet eivät kuitenkaan välttämättä ole täysin yhtenevät, voivat näytteiden tiivyyserot esitetyssä tuloksessa jossain määrin kompensoida rakeisuusjakautumien eroista aiheutuvia vaikutuksia. Joka tapauksessa tulos osoittaa kuitenkin varsin selvästi sen, että vaikka tielaitoksen suunnitteluohjeen mukainen muodonmuutosmoduulin arviointimenettely johtaakin yleensä melko realistisiin moduuliarvioihin perinteisen tierakennerratkaisun kyseessä ollen, ei se sellaisenaan toimi, jos tietätyyppisen materiaalin paikka tierakenteessa oleellisesti muuttuu tai rakenneratkaisu on muulla tavoin perinteisestä poikkeava.



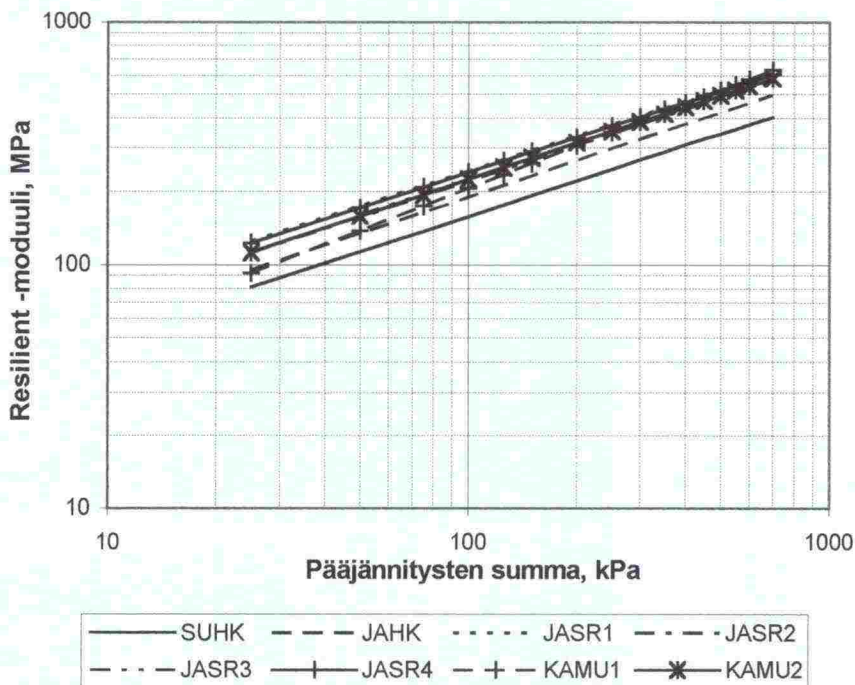
Kuva 6.14. Kantavan, jakavan ja suodatinkerroksen ohjealueille sijoittuvien näytemateriaalien resiliient -moduulien vertailu.

Hyvin useasti resiliient -moduulin riippuvuutta pääjännitysten summan avulla kuvatussa jännitystasosta havainnollistetaan myös logaritmittakaavaan piirretyillä kuvaajilla. Merkittävimpänä erona lineaarisessa mittakaavassa esitettyihin tuloksiin nähden on tällöin se, että kaavaa 4.2 vastaava approksiimaatio kuvautuu tällöin parametrin K_2 määräämässä kaltevuudessa olevaksi suoraksi.

Kuvassa 6.15 erilaisilla havaintotiekohteiden materiaaleilla saatuja koetuloksia vastaavat kaavan 4.2 mukaiset approksimaatiot eli kuvaa 6.1 vastaava informaatio on esitetty logaritmittakaavaan piirretyssä kuvaajassa. Kuvassa 6.16 samanlainen yhteenveto on puolestaan esitetty kantavan, jakavan ja suodatinkerroksen ohjealueille sijoittuvilla näytemateriaaleilla saaduista koetuloksista.



Kuva 6.15. Havaintotiemateriaaleille määritettyjen resiliient-moduulien vertailu logaritmisessa mittakaavassa.



Kuva 6.16. Kantavan, jakavan ja suodatinkerroksen ohjealueille sijoittuvien näyttemateriaalien resiliient -moduulien vertailu logaritmisessa mittakaavassa.

6.3 Näytekoon vaikutus

Koska pääosa täydentävistä dynaamisista kolmiaksaalikokeista tehtiin aiemmista koesarjoista poiketen halkaisijaltaan 200 mm olevilla noin 400 mm korkuisilla näytteillä, haluttiin myös näytekoon mahdollista vaikutusta koetuloksiin nimenomaisesti testata. Tätä varten valmisteltiin kaksi 200 mm:n näytettä kosteasta rakeisuuskäyrältään lajittuneeksi suhteitetusta 0 - 32 mm Sievin kalliomurskeesta (näytemateriaali KAMU2). Samanlaista materiaalia oli nimittäin testattu jo aiempien koesarjojen yhteydessä kolmella näytehalkaisijaltaan 300 mm olevalla rinnakkaisnäytteellä (näytemateriaali CRSM).

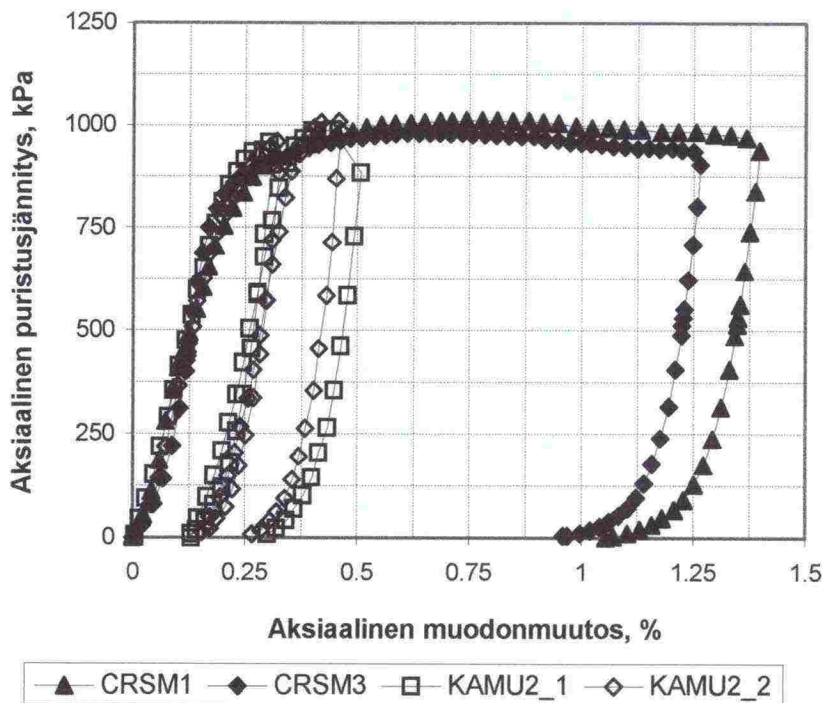
Kuormituskoenäytteiden vertailukelpoisuuden varmistamiseksi niiden kosteus- ja tiivystilat pyrittiin saamaan mahdollisimman identtiseksi aiemmin testattujen 300 mm näytteiden kanssa. Kuten taulukosta 6.1 voidaan todeta, on tässä myös kohtuullisen hyvin onnistuttu. Osaltaan eri tutkimusvaiheissa testattujen 200 mm ja 300 mm näytteiden keskinäistä vertailukelpoisuutta tukevat myös kuvassa 6.17 esitetyt staattisten kolmiaksaalikokeiden tulokset, jotka sekä staattisten murtokuormien että varsinkin kuormitus-muodonmuutoskuvaajien muodon osalta ovat hyvin yhteneväiset.

Taulukko 6.1. Lajittuneesta 0 - 32 mm Sievin kalliomurskeesta valmistettujen kuormituskoenäytteiden tiiviys- ja kosteustilat.

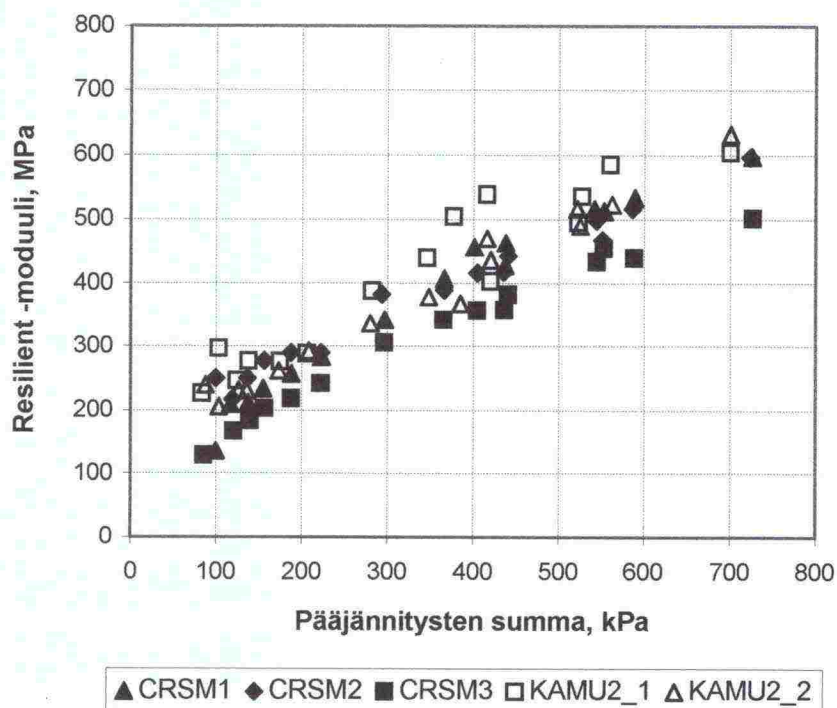
Näytteen tunnus	Kuivairto- tiheys [t/m ³]	Huokoi- suus [%]	Vesipitoi- suus [%]	Kyllästys- aste [%]	HUOM !
CRSM1	2,077	25,0	1,86	15	Vuoden 1993 koesarja (\varnothing 300 mm)
CRSM2	2,083	24,8	1,84	15	
CRSM3	2,066	25,4	1,88	15	
KAMU2_1	2,080	24,9	1,84	15	Täyd. koesarja (\varnothing 200 mm)
KAMU2_2	2,080	24,9	1,82	15	

Kuvassa 6.18 on esitetty kummallakin näytekoolla tehdyistä kuormituskokeista SHRP protocol P-46:n mukaisesti määritetyt resilient-moduulin arvot, jotka jo silmämääräisesti todetaan kohtuullisen hyvin toisiaan vastaaviksi. Kun 300 mm näytekoolla tehdystä kuormituskoesarjasta jätetään kahdesta muusta rinnakkaisnäytteestä jonkin verran poikkeavan kokeen CRSM3 tulos huomioon otta-

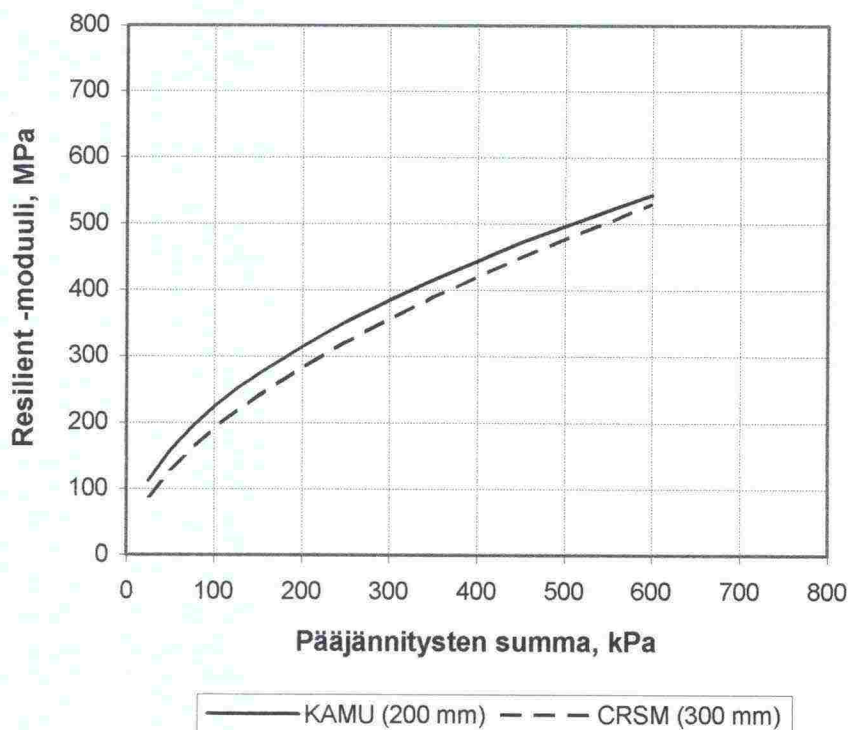
matta ja tämän jälkeen kumpaakin näytekokoja edustavaan pistejoukkoon lasketaan erikseen kaavan 4.2 mukainen sovitus, saadaan kuvan 6.19 mukainen tulos. Tämän perusteella näytesarjojen tulosten vastaavuuden todetaan olevan likimain samaa suuruusluokkaa kuin mikä aiempien koesarjojen yhteydessä on ylipäätään todettu koetulosten toistettavuudeksi /5/. Niinpä saatu tulos näyttäisikin tukevan sitä oletusta, että kokeen lopputulosten kannalta merkittävää eroa ei ole sillä, onko koe tehty 300 mm vai 200 mm näytekokoja käyttäen. Edellytyksenä tälle on luonnollisesti se, että näytekokoja pienennettäessä ei ylitetä yleisesti hyväksyttyä näytemateriaalin maksimiraekoon ja näytehalkaisijan suhdetta noin 1/6 - 1/5. Oletettavasti näytekoon mahdollinen vaikutus on myös sitä vähäisempi mitä pienempi karkeimpien rakeiden suhteellinen osuus kuormituskoenäytteessä on. Täydentävässä koevaiheessa 200 mm näytekokoja käyttäen testatuista materiaaleista vain jakavan kerroksen sora JASR2 oli yhtä karkearakainen kuin näytekoon vaikutuksen testauksessa käytetty näytemateriaali KAMU2 ja kaikki muut olivat tätä vähemmän karkeita lajitteita sisältäviä.



Kuva 6.17. Staattisten kolmiakselikokeiden tulokset lajittuneella 0 - 32 mm Sievin kalliomurskeella.



Kuva 6.18. Lajittuneelle 0 - 32 mm Sievin kalliomurskeelle 200 mm ja 300 mm näytekoolla määritettyjen resiliient-moduulien vertailu.



Kuva 6.19. Kuvassa 6.16 esitetyjä tuloksia vastaavat kaavan 4.2 mukaiset sovituskäyrät.

6.4 Vertailu CBR-kokeen tuloksiin

Suhteellisen pienimittakaavaisena laboratoriotestinä toteutettavaa CBR-koetta on kansainvälisesti hyvin yleisesti käytetty perustana erilaisten maa- ja maa-rakennusmateriaalien muodonmuutosominaisuuksien arviointiin. Niinpä tutkimuksen kuluessa heräsi myös kiinnostus vertailla CBR-kokeen tulosten pohjalta empiirisillä muunnoskaavoilla saatavia moduuliarvioita vastaaville materiaaleille dynaamisen kolmiaksiaalikokeen avulla määritettyihin resiliient-moduulin arvoihin.

Koska CBR-kokeessa käytettävä näytemateriaali saa sisältää vain vähän raekooltaan yli 19,0 mm olevia rakeita /1/, vertailumateriaaleiksi valittiin tielaitoksen suunnitteluohjeen mukaisille ohjealueille suhteitetuista kiviaineksista näytemateriaalit SUHK, JAHK, JASR1 ja KAMU1 (kuvat 2.2, 2.3 ja 2.4). CBR-kokeiden aikana näiden tiiviys- ja kosteustilat pyrittiin saamaan mahdollisimman tarkoin dynaamisten kolmiaksiaalikoekiden aikana vallinneita olosuhteita vastaaviksi (taulukko 3.3).

CBR-kokeet tilattiin Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriolta, jossa ne tehtiin joulukuussa 1995. Kokeiden tuloksena määritetyt CBR-arvot sekä määrittämisen aikana toteutuneet tiiviys- ja kosteusolosuhteet on esitetty taulukossa 6.2. Kuten taulukoita 3.3 ja 6.2 vertaamalla voidaan todetaan, vastaavat kokeiden suoritusolosuhteet kaikilla näytemateriaaleilla varsin hyvin toisiaan.

Taulukko 6.2. Vertailumateriaaleille tehtyjen CBR-kokeiden tulokset

Näytteen tunnus	Tiheys (t/m ³)	Vesipitoisuus (%)	CBR-arvo (%)
SUHK	1,99	5,2	25
JAHK	2,05	3,9	28
JASR1	2,15	3,5	33
KAMU1	2,22	3,2	130

CBR-kokeen tuloksen perusteella saatavien moduuliarvioiden vertailua dynaamisen kolmiaksaalikokeiden tuloksiin vaikeuttaa ensinnäkin se, että erilaisia empiirisiä riippuvuuksia CBR-arvon ja muodonmuutosmoduulin välille on kirjallisuudessa esitetty hyvin monia. Muutamia näistä on koottu esimerkiksi tämän tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa laadittuun kirjallisuusselvitykseen /3/. Toisaalta nämä empiiriset yhtälöt antavat kullekin kiviainekselle vain yhden moduuliarvon eli kiviainesten muodonmuutoskäyttäytyminen oletetaan tällöin vallitsevasta jännitystilasta riippumattomaksi, mitä se dynaamisen kolmiaksaalikokeen tulosten perusteella ei kuitenkaan selvästikään ole.

Vaihtelualueetta, jonka sisälle pääosa erilaisilla CBR-arvoon perustuvilla kaavoilla saatavista moduuliarvioista asettuu, voitaneen kuvata kaavoilla 6.1 ja 6.2. Näistä ensinnä mainittua käytetään muun muassa nk. Shellin mitoitusmenetelyssä /7/ ja jälkimmäinen on puolestaan ollut käytössä muun muassa Suomen tielaitoksessa /8/. Mainittujen kaavojen avulla laskettuja, taulukossa 6.3 esitettyjä moduuliarvioita tarkastelemalla todetaan tällöin heti, että ainakaan sama arviointikaava ei näyttäisi soveltuvat sekä luonnonkiviaineksille että kalliomurskeille. Luonnonkiviaineksilla kaavan 6.1 perusteella lasketut moduuliarvot näyttäisivät nimittäin edustavan dynaamisessa kolmiaksaalikokeessa mitattuja resilient-moduuleita suunnilleen 300 kPa:n suuruista pääjännityssumman arvoa vastaavalla jännitystasolla, mutta kalliomurskeen tapauksessa jo kaavan 6.2 mukainen alaraja-arvokin on selvästi suurempi kuin 300 kPa jännitystasoa vastaava dynaamisesta kolmiaksaalikokeesta mitattu resilient-moduuli. Toisaalta tuloksista on kuitenkin todettavissa, että esimerkiksi näytemateriaaleille SUHK, JAHK ja JASR1 CBR-kokeen perusteella saatavien moduuliarvoitten keskinäinen järjestys on sama kuin dynaamisten kolmiaksaalikokeiden perusteella saatu tulos.

$$E = 10 \cdot CBR \quad (6.1)$$

$$E = 4 \cdot CBR \quad (6.2)$$

Taulukko 6.3. CBR-kokeen tuloksena saatavat moduuliarvot sekä näitä likimäärin vastaavat pääjännityssumman arvot dynaamisten kolmiaksaalikokeiden tuloksissa.

Näytteen tunnus	$E = 10 \cdot \text{CRB}$ (MPa)	$E = 4 \cdot \text{CRB}$ (MPa)
SUHK	250 ($\theta \approx 250$ kPa)	100 ($\theta \approx 45$ kPa)
JAHK	280 ($\theta \approx 220$ kPa)	108 ($\theta \approx 40$ kPa)
JASR1	330 ($\theta \approx 190$ kPa)	132 ($\theta \approx 40$ kPa)
KAMU1	1300 ($\theta > 1000$ kPa)	520 ($\theta \approx 500$ kPa)

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

TPPT-projekti M12 "Sitomattomien materiaalien moduulit" on ollut suoraa jatkoa vuosina 1992 - 1994 TTKK:n geotekniikan laboratoriossa käynnissä olleelle tien sitomattomissa rakennekerroksissa käytettävien karkearakeisten kiviainesten muodonmuutosominaisuuksia käsitelleelle tutkimukselle. Aiemmin suoritettujen kokeiden tulosten yksityiskohtaisen analysoinnin ohella projektin toisena päätehtävänä oli aiempia koesarjoja täydentävien dynaamisten kolmiakσιαaliko-keiden tekeminen.

Kaikkiaan täydentäviä kokeita tehtiin 28 kappaletta. Näistä 11 tehtiin viidestä eri havaintotiekohteesta ylös kaivetuille näyttemateriaaleille ja 15 kiviaineksille, joiden rakeisuusjakautumat oli pyritty rakentamaan siten, että ne sijoittuivat halutulla tavalla tielaitoksen suunnitteluohjeissa annetuille sitomattomien kerros-ten kiviainesten ohjealueille. Tämän lisäksi kaksi kalliomurskenäytettä kuormitettiin eri kokoisilla kuormituskoenäytteillä saatavien tulosten välisen vastaavuuden testaamiseksi.

Koska havaintotiekohteiden näyttemateriaaleilla rakeisuusjakautumaerot olivat suhteellisen vähäisiä, näytti keskeisimmäksi muodonmuutosmoduulien eroja selittäväksi tekijäksi nousevan näytteiden tiivistila. **Niinpä koesarjassa sovellettujen - Troxler-laitteen avulla määritettyjen - tavoitetiiviyksien aiheellisuus tuleekin olemaan erittäin kriittinen tekijä laboratoriossa määritettyjen resilient-moduulien ja pudotuspainomittauksista takaisin-laskennalla saatujen moduuliarvojen välistä vastaavuutta tarkasteltaessa.**

Tielaitoksen suunnitteluohjeiden mukaisiin rakeisuusjakautumiin suhteitetuilla hiekka- ja soramateriaaleilla saatujen koetulosten perusteella todettiin, että suunnitteluohjeessa esitetyt rakeisuusjakautuman muotoon perustuvat E-moduuliarvot ovat periaatteessa oikean suuntaisia. Niinpä hiekkamaalajeiksi luettavilla näyttemateriaaleilla SUHK ja JAHK moduuliarvot jäivät melko selvästi jakavan kerroksen soramateriaaleja alhaisemmiksi. Toisaalta suunnitteluohjeen mukaisiin E-moduuliarvojen eroihin päädytään kuitenkin vain sillä edellytyksellä, että eri kerroksiin käytettäviin materiaaleihin tyypillisessä suomalaisessa tierakenteessa kohdistuva jännitystaso eli materiaalin paikka tierakenteessa otetaan myös huomioon. Johtopäätöksenä tästä onkin se, että kun käytetään perinteisestä tierakenteesta poikkeavia rakenneratkaisuja tai kun perinteisiä materiaaleja käytetään tavanomaisesta poikkeavalla tavalla, ei rakeisuusjakautumaan perustuva muodonmuutosmoduulin arviointimenettely sellaisenaan toimi. Tällöin tierakenteiden mitoituksessa käytettävien muodonmuutosmoduulien tulisikin ehdottomasti perustua kokeellisiin määrittäyksiin, jotta myös jännitystason vaikutus moduuliarvoihin tulisi otetuksi huomioon.

Kahdesta ennakolta määrättyyn rakeisuusjakautumaan rakennetusta kalliomurskemateriaalista erityisesti lajittuneella, maksimiraekooltaan 32 mm olevalla näytemateriaalilla KAMU2 saatu tulos näyttäisi siltä, että telaitoksen suunnitteluohjeessa esitetty menettely aliarvioi selvästi materiaalin muodonmuutosmoduulia. Tällöin on kuitenkin syytä muistaa se, että dynaamisella kolmiakσιαalikokeella mitattu resilient -moduuli edustaa pelkästään materiaalin palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä toistokuormituksessa, eikä ota huomioon esimerkiksi rakeisuuskäyrältään roikkuvan materiaalin mahdollisesti epäedullista palautumatonta muodonmuutuskäyttäytymistä.

Lajittuneella 0 - 32 mm Sievin kalliomurskeella näytehalkaisijoita 200 mm ja 300 mm käyttäen tehtyjä kokeita vertaamalla näyttäisi siltä, että sen paremmin staattisen kuin dynaamisenkaan kolmiakσιαalikokeen tulokset eivät ainakaan kovin merkittävästi riippuneet käytetystä näytekooosta. Niinpä myös muiden 200 mm näytehalkaisijalla tehtyjen kokeiden tuloksia voitaneen pitää vertailukelpoisina aikaisemmissa koesarjoissa 300 mm näytehalkaisijalla saatujen tulosten kanssa. Edellytyksenä tälle on kuitenkin se, että kokeessa ei ylitetä näytemateriaalin maksimiraekoon ja näytehalkaisijan suhteelle yleisesti hyväksyttyä enimmäisarvoa noin $1/6$ - $1/5$ ja että maksimiraekokoa lähellä olevan lajitteen suhteellinen osuus ei ole kohtuuttoman suuri.

Neljälle näytemateriaalille tehdyn CBR-kokeen tulosten perusteella näyttäisi siltä, että CBR-arvon ja dynaamisen kolmiakσιαalikokeen avulla määritetyn resilient -moduulin välinen riippuvuus luonnonkiviaineksilla ja kalliosta murskaamalla valmistetuilla kiviaineksilla on hyvin erilainen. Toisaalta vertailussa mukana olleille kolmelle sora- ja hiekkamateriaalille määritettyjen CBR-arvojen suuruusjärjestys vastaa kuitenkin samoille kiviaineksille mitattujen resilient -moduulien järjestystä.

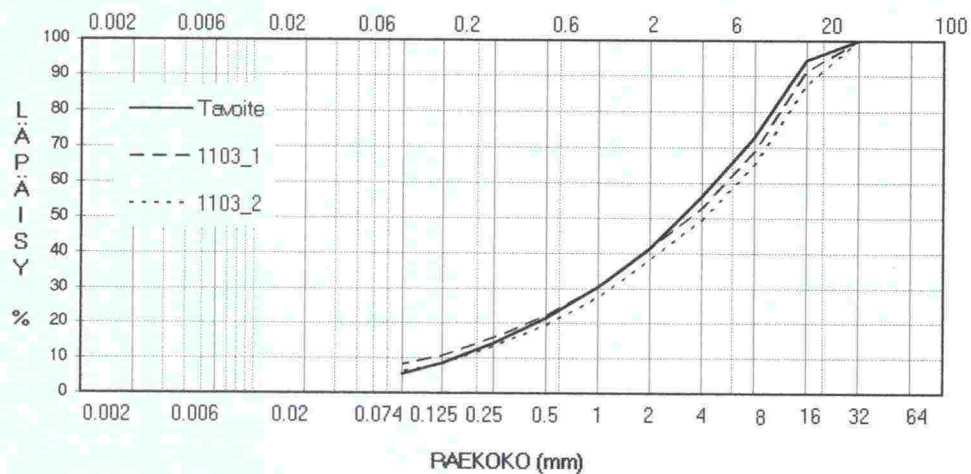
8. KIRJALLISUUSLUETTELO

1. AASTHO T 193 - 81. Standard Method of Test for The California Bearing Ratio. The American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., 1986.
2. AASTHO T 294-92 I. Interim Method of Test for Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils - SHRP Protocol P46. The American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., 1992.
3. Kolisoja, P., Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet - Kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen selvityksiä 38/1993. TIEL 3200163. Helsinki, 1993. 147 s.
4. Kolisoja, P., Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet - Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993. TIEL 3200164. Helsinki, 1993. 71 s.
5. Kolisoja, P., Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet - Vuoden 1993 kuormituskokeet. Tielaitoksen selvityksiä 28/1994. TIEL 3200238. Helsinki, 1994. 119 s.
6. Kolisoja, P., Sitomattomien materiaalien moduulit - Muodonmuutosmoduulin arviointimenettely. Tielaitoksen selvityksiä 44/1996. TIEL 3200412. Helsinki, 1996. 84 s.
7. Shell International Petroleum Company Limited Shell Pavement Design Manual. London, 1978.
8. Tie- ja vesirakennushallitus. Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita. Osa V. Materiaalit, massojen käyttö ja työmenetelmät. Helsinki, 1985.
9. Tie- ja vesirakennushallitus. Teiden suunnittelu. TVL:n ohjeet, Kansio B, osa IV. Tien rakenne. Helsinki, 1985.

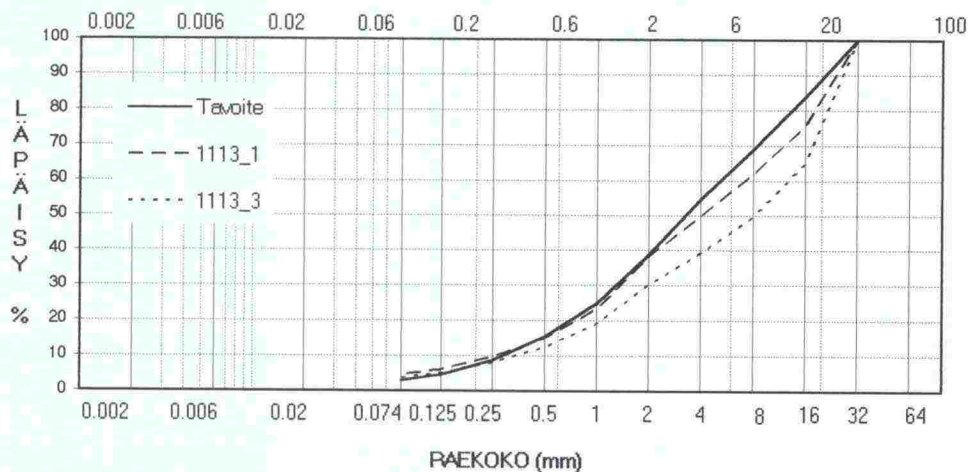
9. LIITTEET

1. Kuormituskokeiden näytemateriaalien rakeisuuskäyrät
2. Kuormituskoeinäytteille "SHRP protocol P46":n mukaisella kuormitus-sarjalla määritetyt resilient -moduulit
3. Kuormituskoeinäytteille tehtyjen staattisten kolmiaksaalikokeiden kuormitus-muodonmuutoskuvaajat

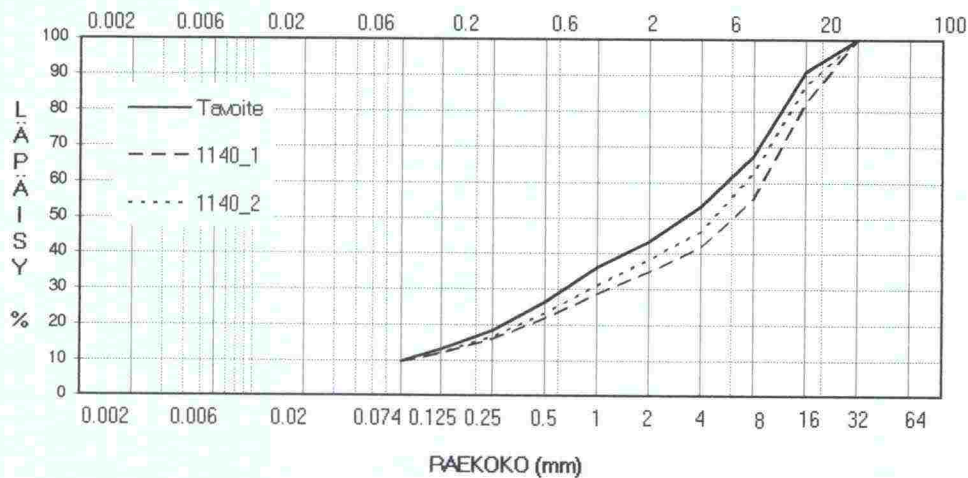
NÄYTEMATERIAALI 1103



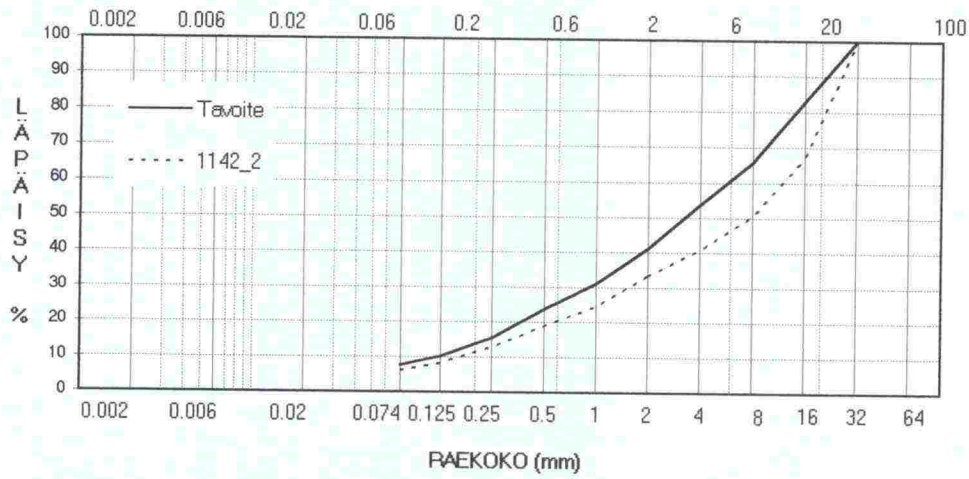
NÄYTEMATERIAALI 1113



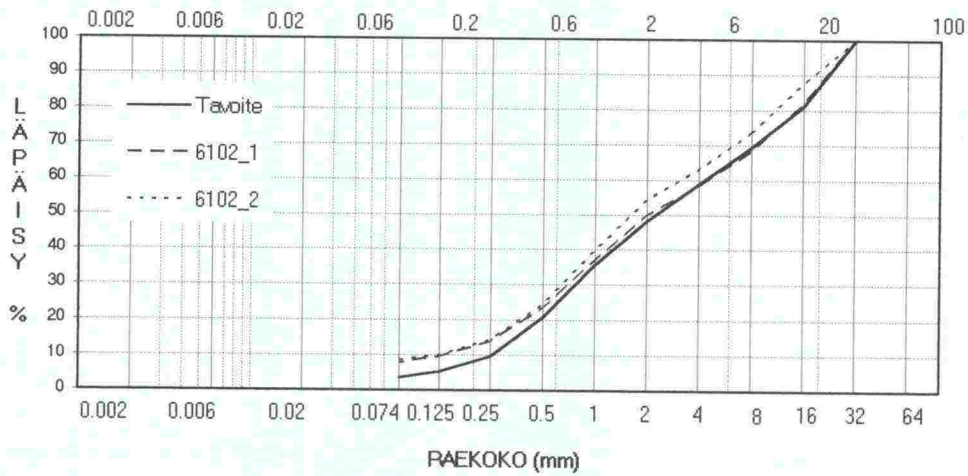
NÄYTEMATERIAALI 1140



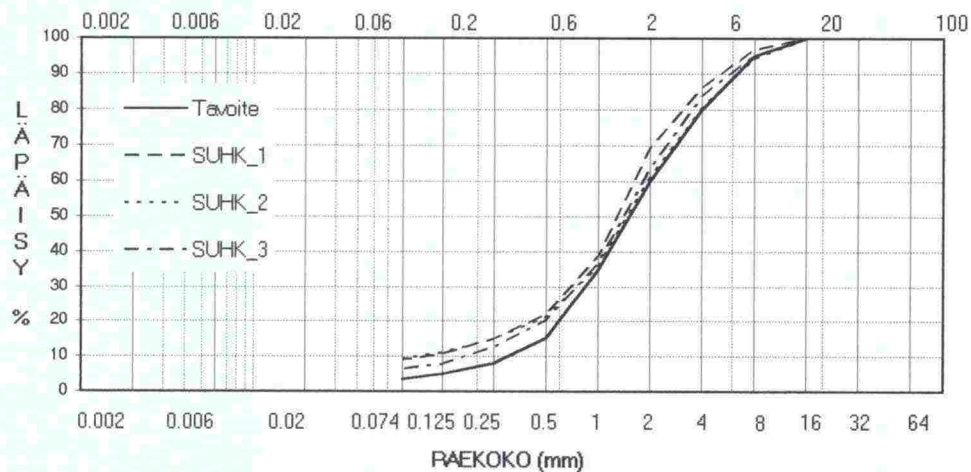
NÄYTEMATERIAALI 1142



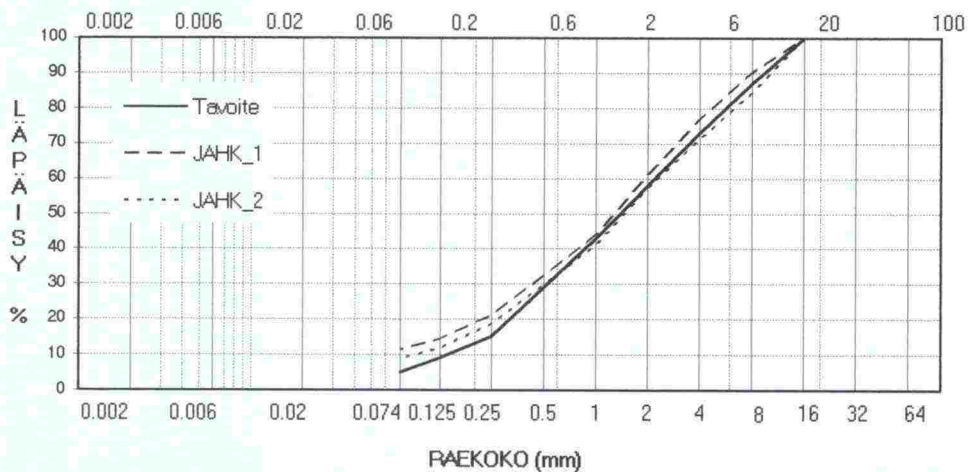
NÄYTEMATERIAALI 6102



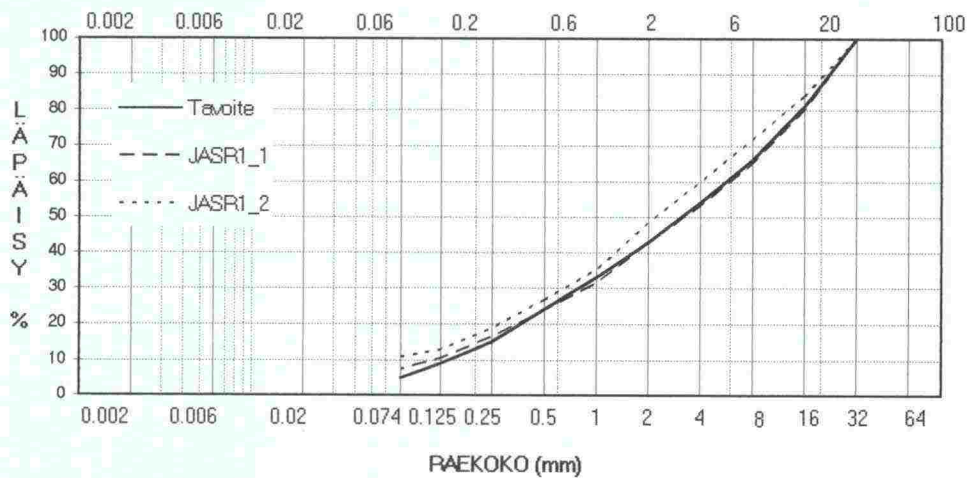
SUODATINKERROKSEN HIEKKA



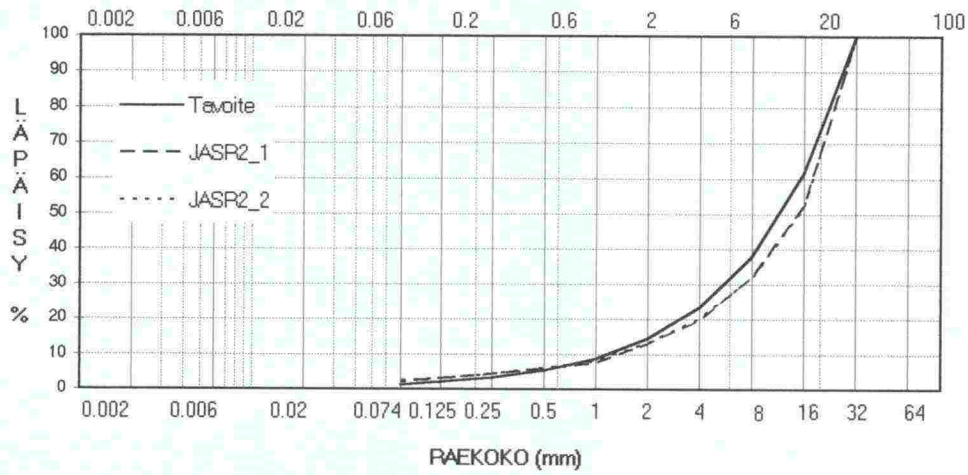
JAKAVAN KERROKSEN HIEKKA



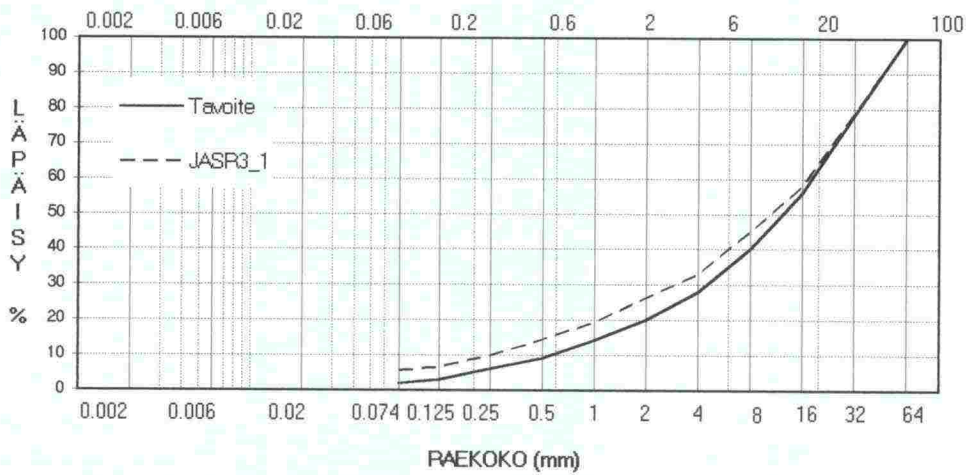
JAKAVAN KERROKSEN SORA 1



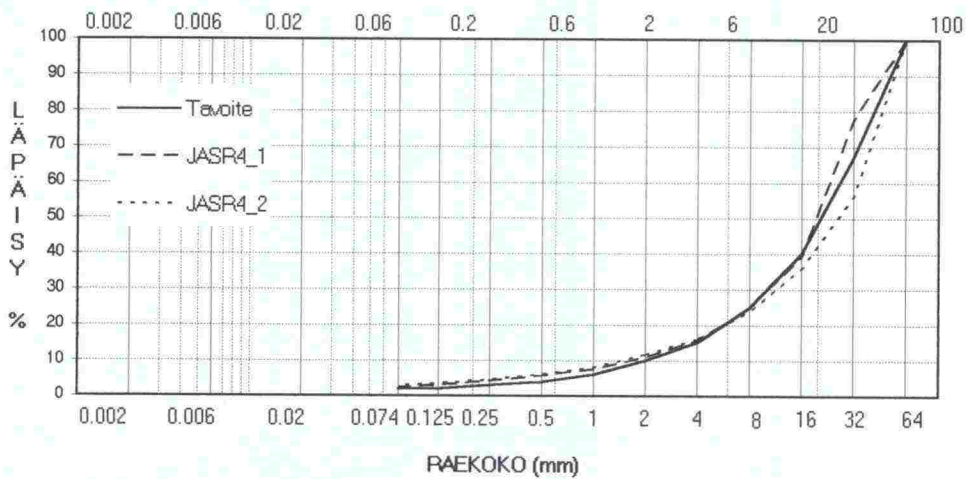
JAKAVAN KERROKSEN SORA 2



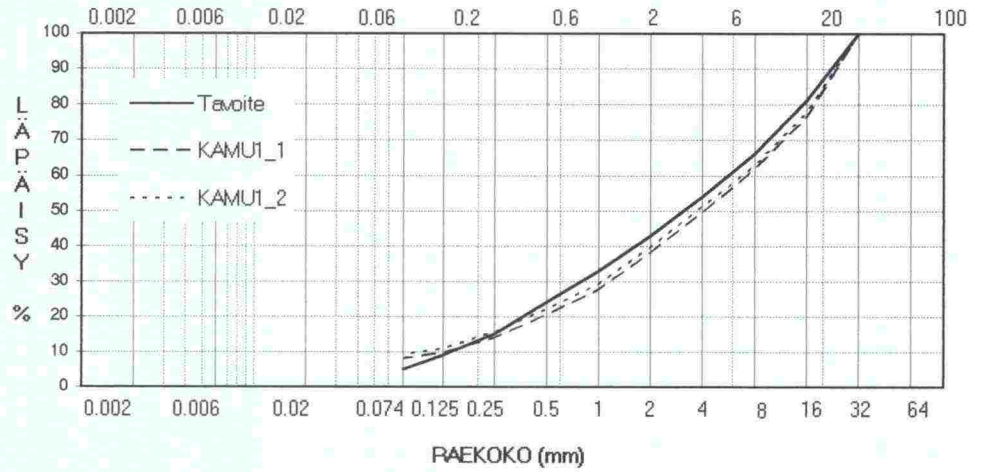
JAKAVAN KERROKSEN SORA 3



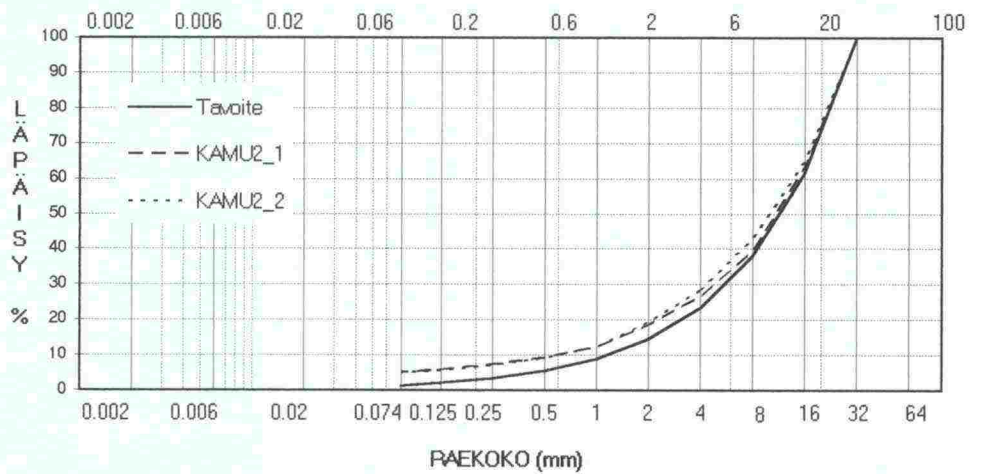
JAKAVAN KERROKSEN SORA 4



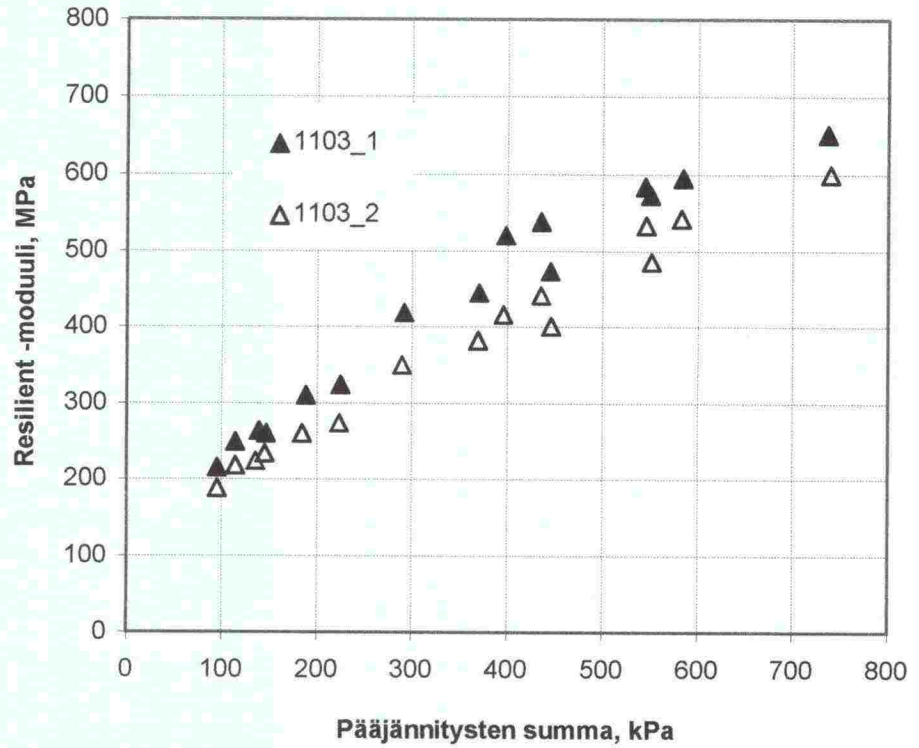
KANTAVAN KERROKSEN MURSKKE 1



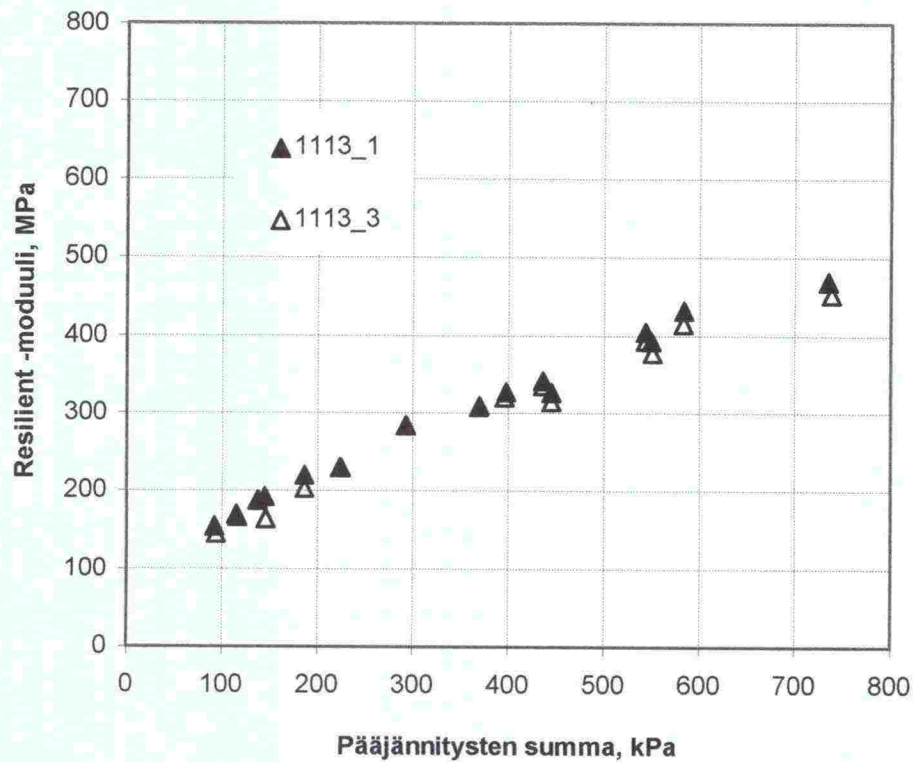
KANTAVAN KERROKSEN MURSKKE 2



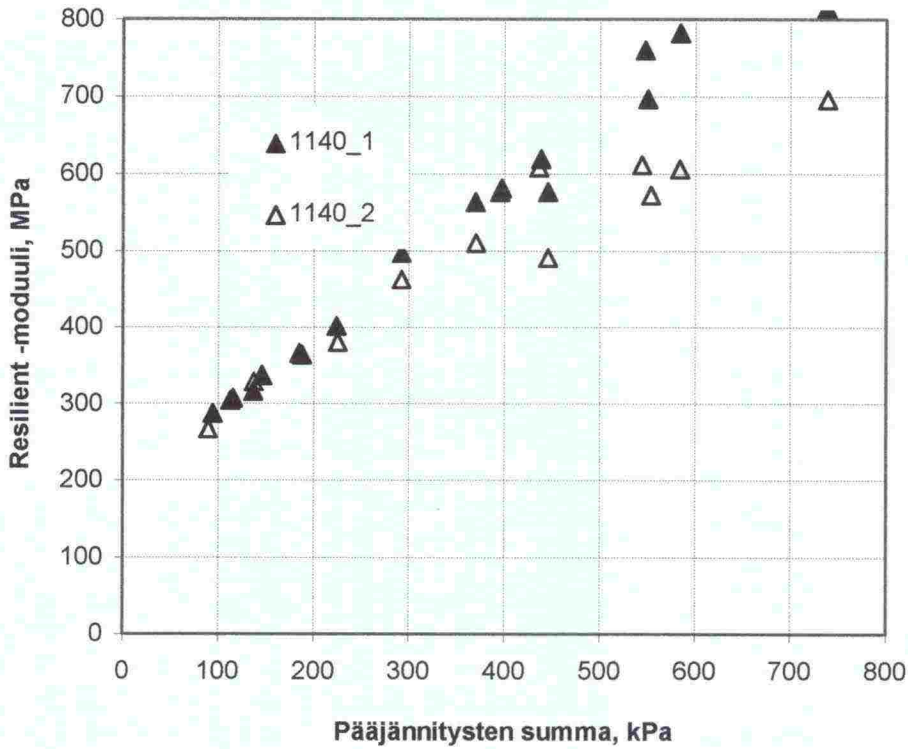
NÄYTEMATERIAALI 1103



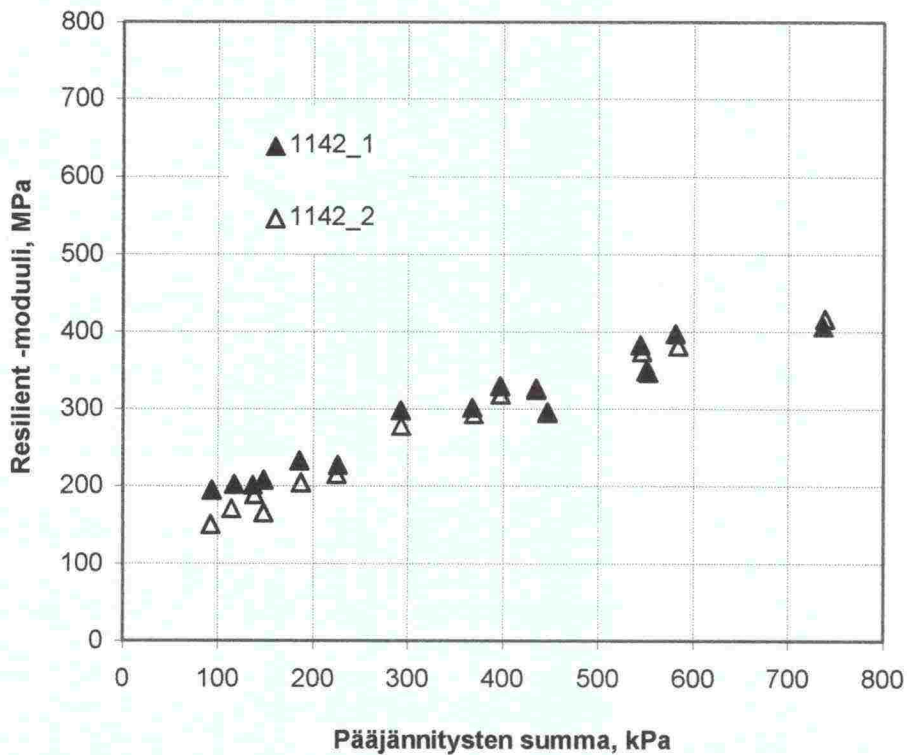
NÄYTEMATERIAALI 1113

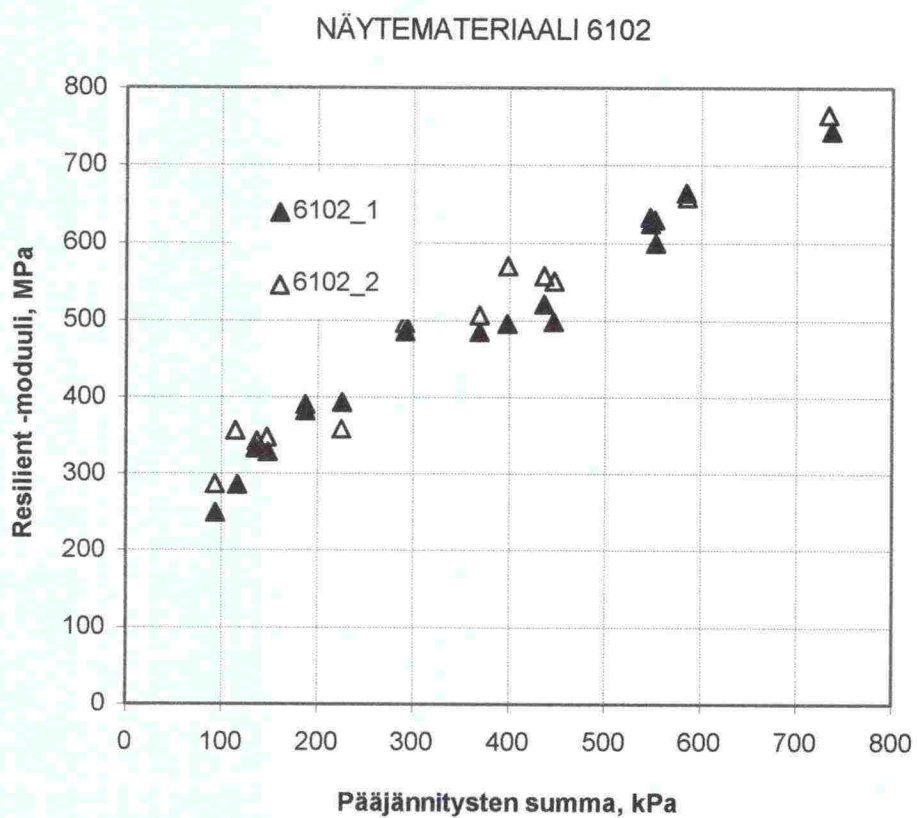


NÄYTEMATERIAALI 1140

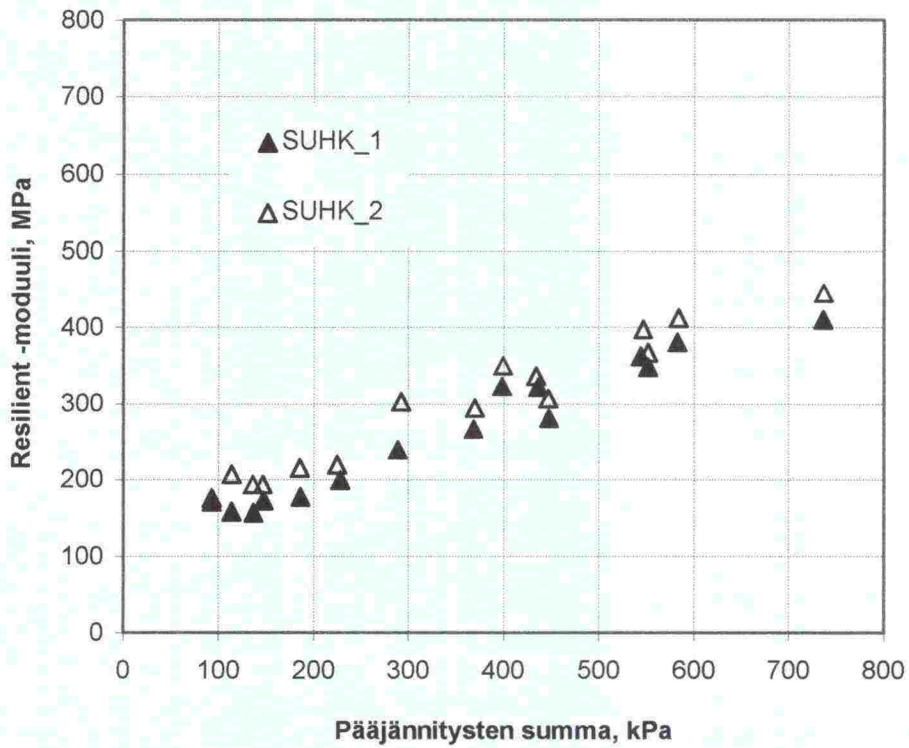


NÄYTEMATERIAALI 1142

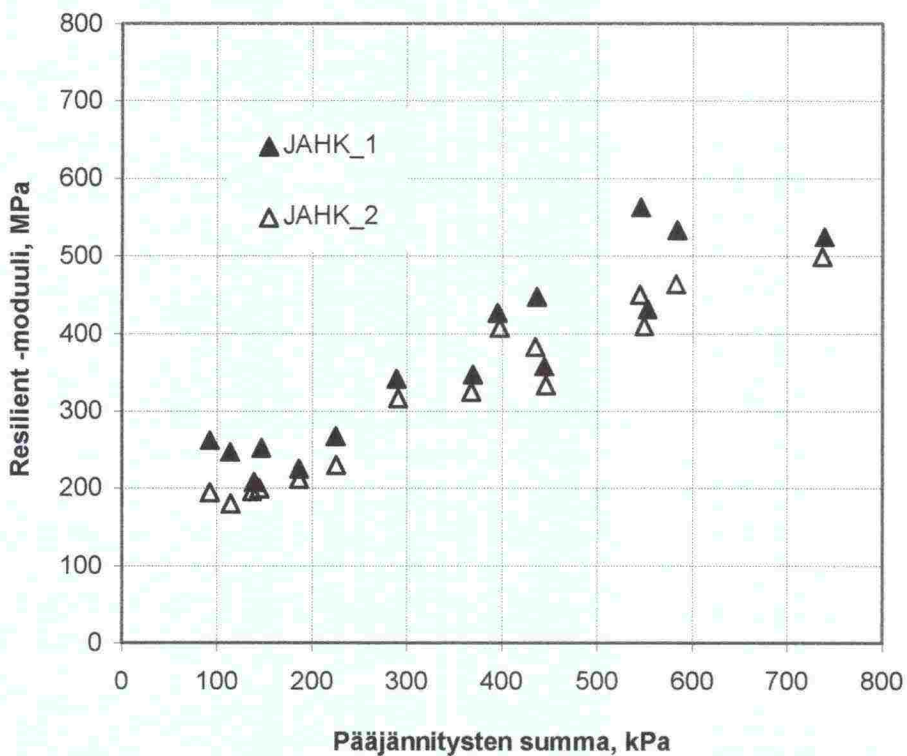




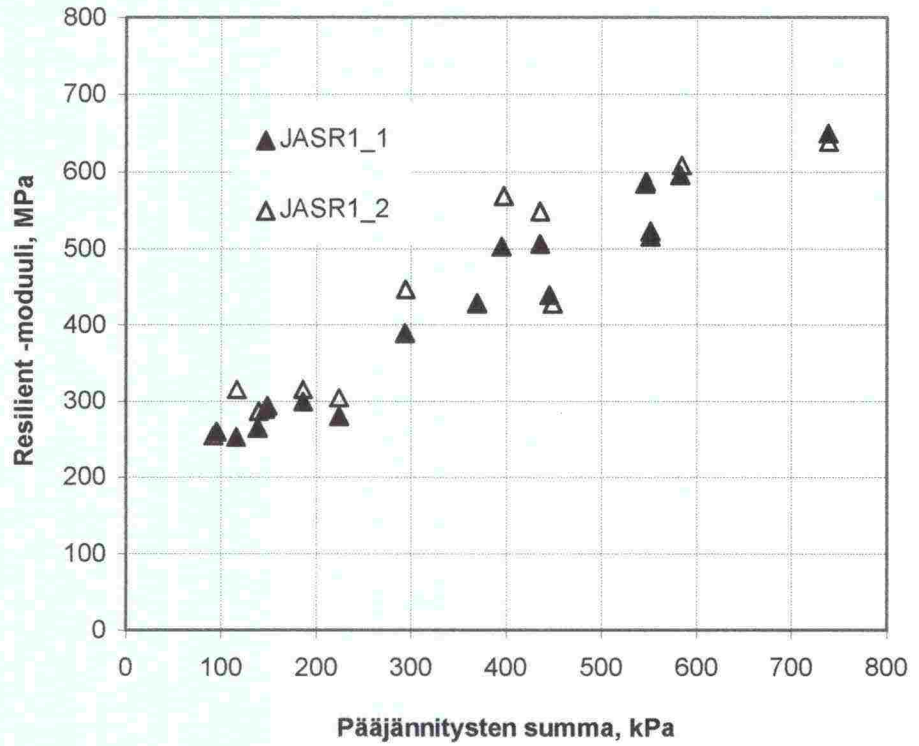
SUODATINKERROKSEN HIEKKA



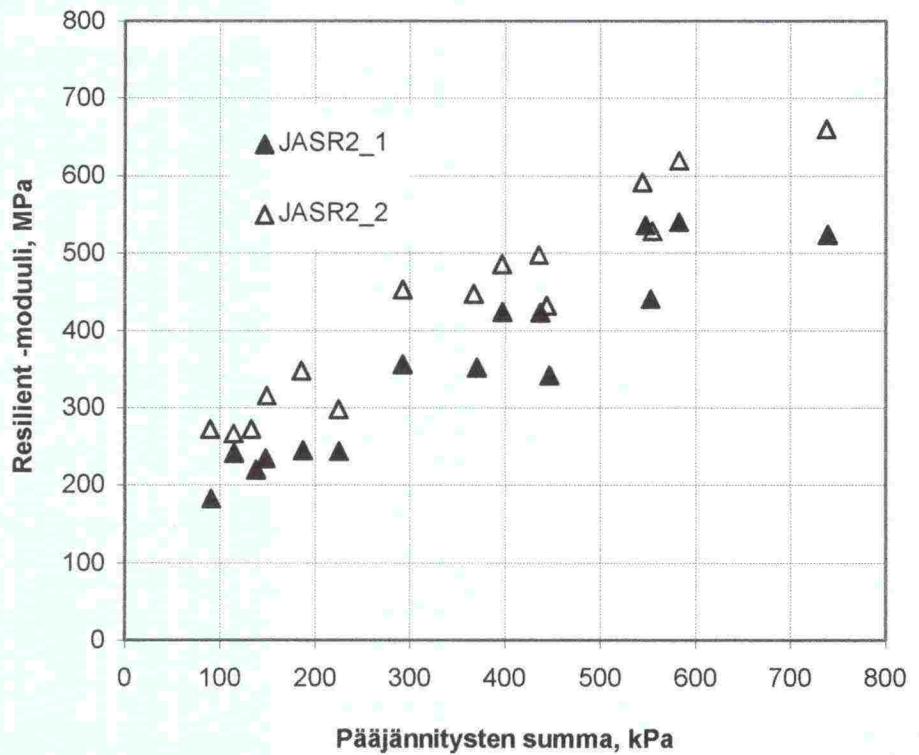
JAKAVAN KERROKSEN HIEKKA



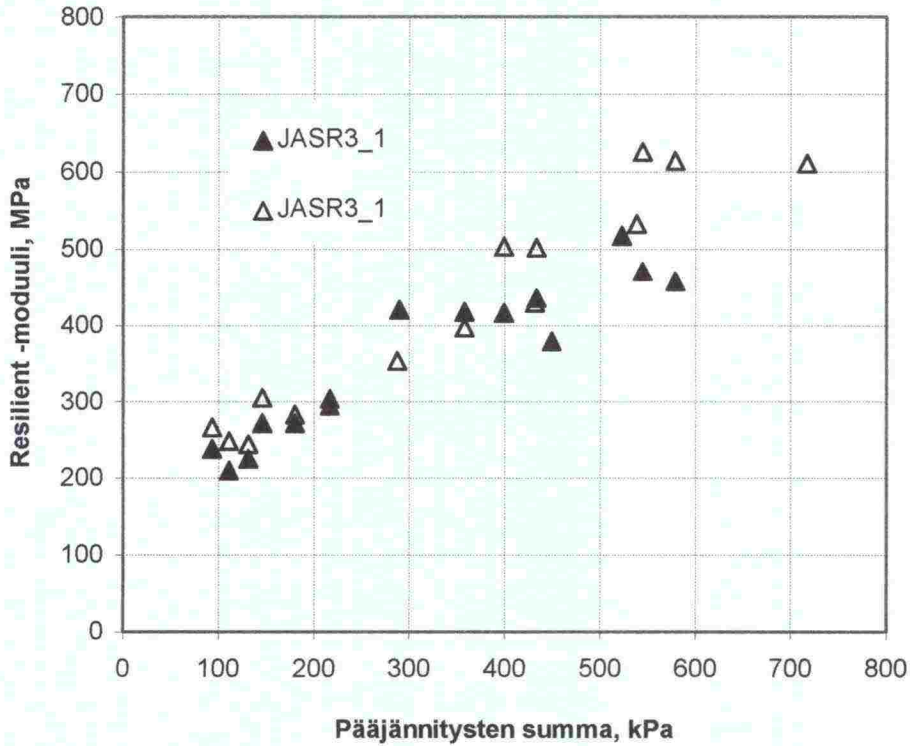
JAKAVAN KERROKSEN SORA 1



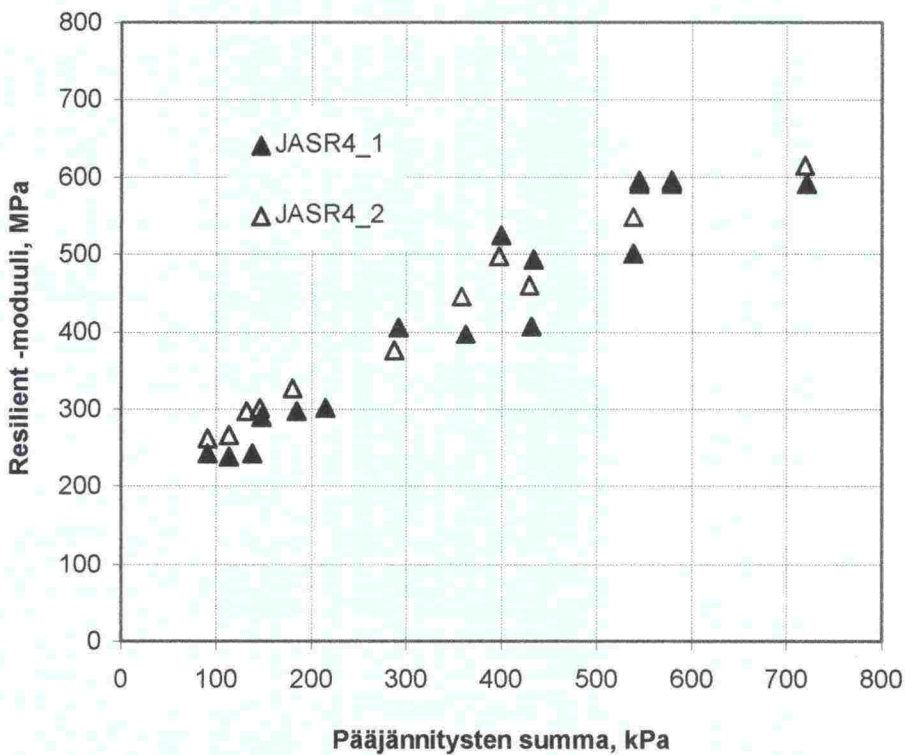
JAKAVAN KERROKSEN SORA 2



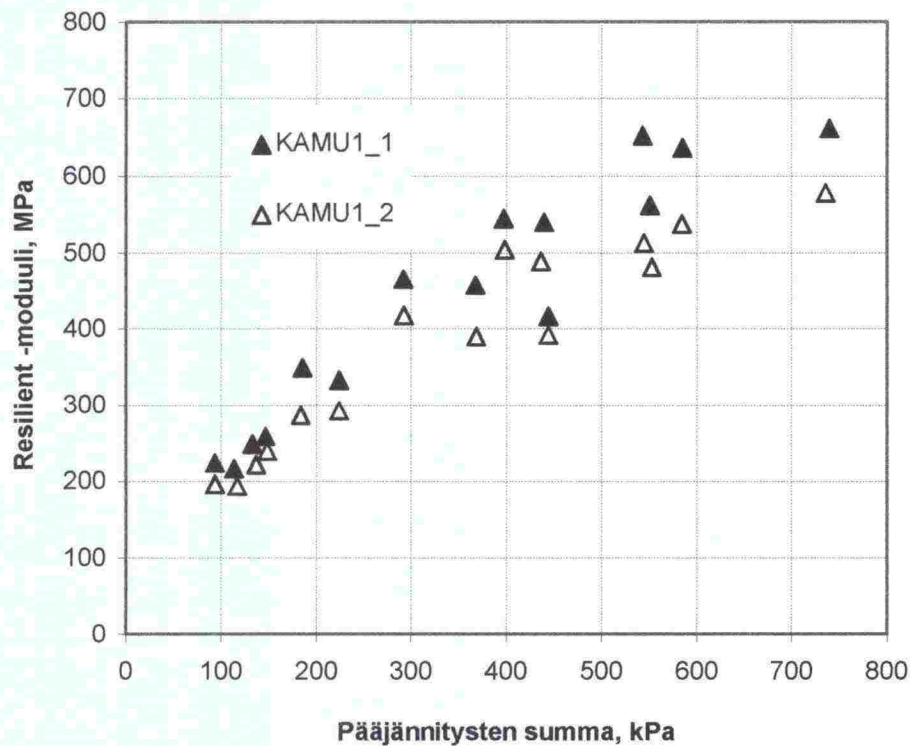
JAKAVAN KERROKSEN SORA 3



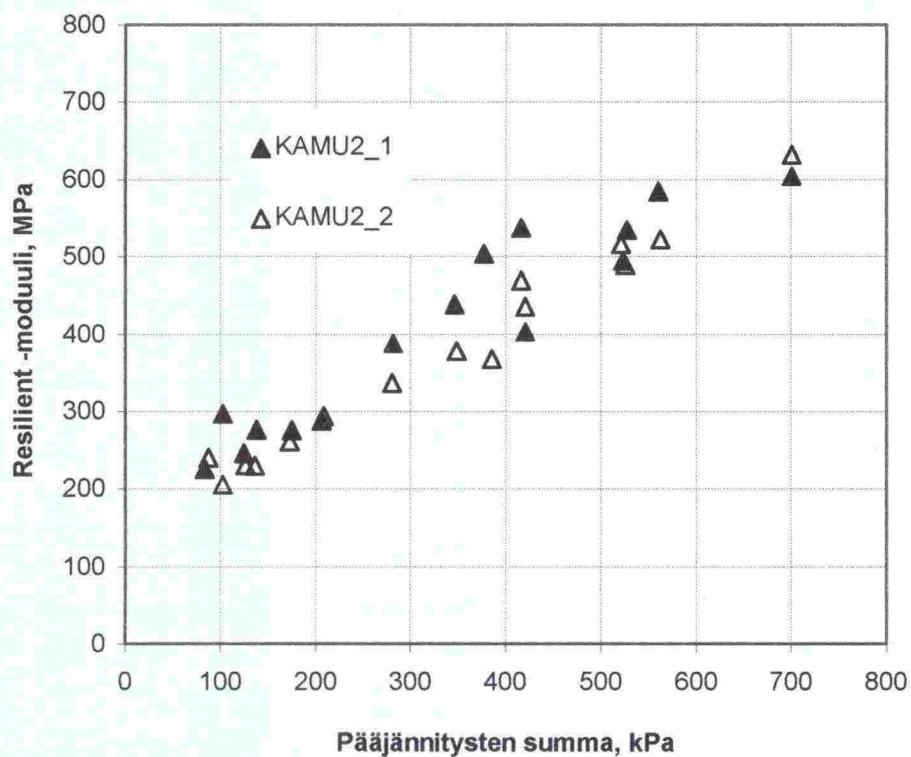
JAKAVAN KERROKSEN SORA 4



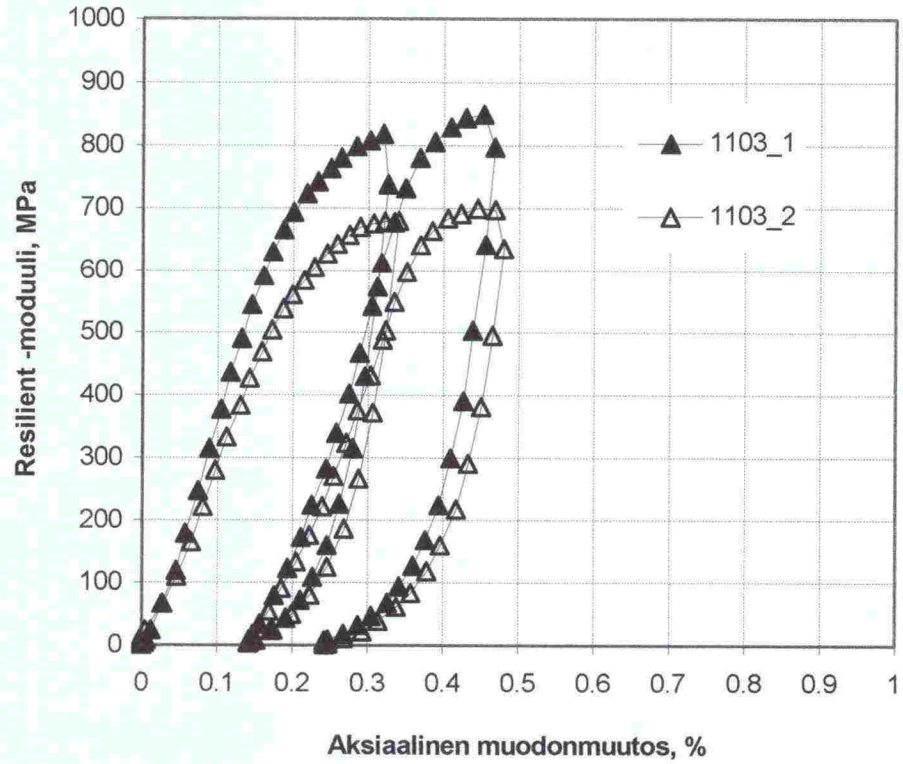
KANTAVAN KERROKSEN MURSKKE 1



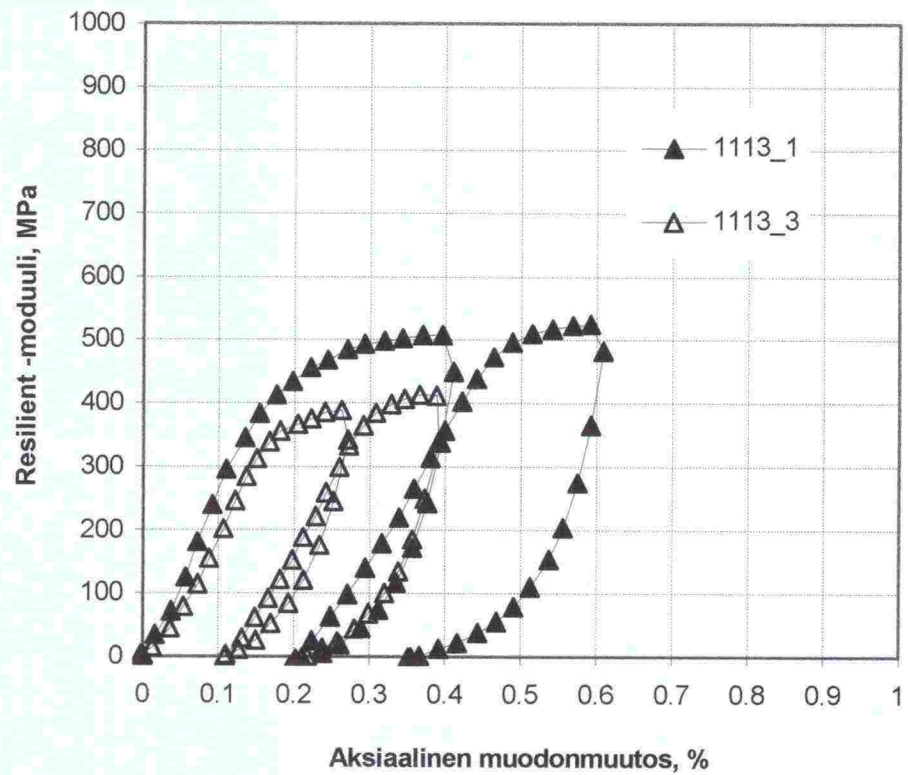
KANTAVAN KERROKSEN MURSKKE 2



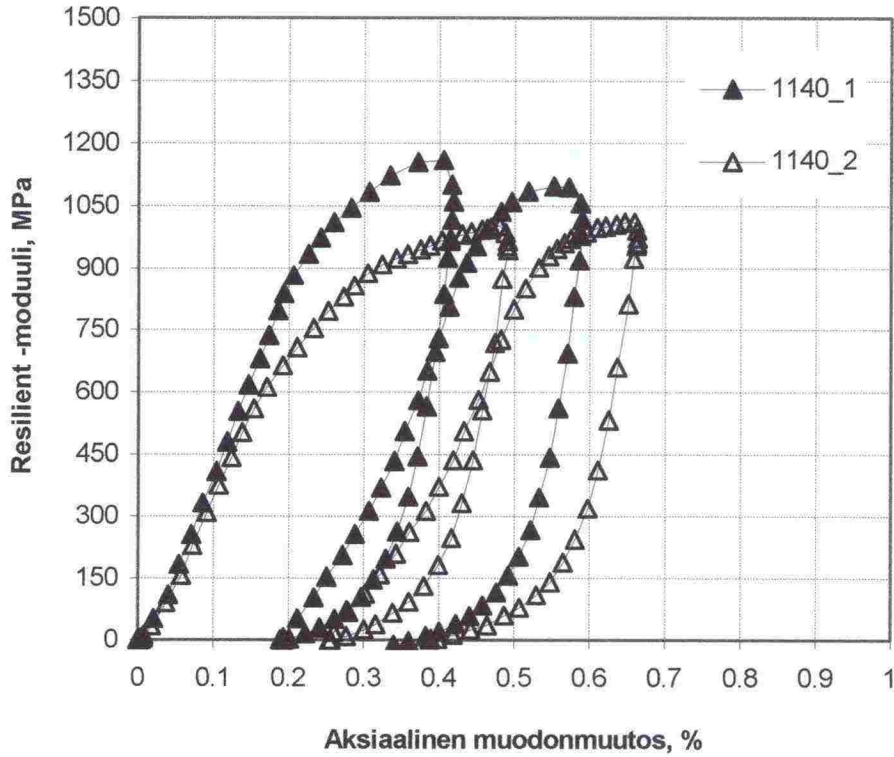
NÄYTEMATERIAALI 1103



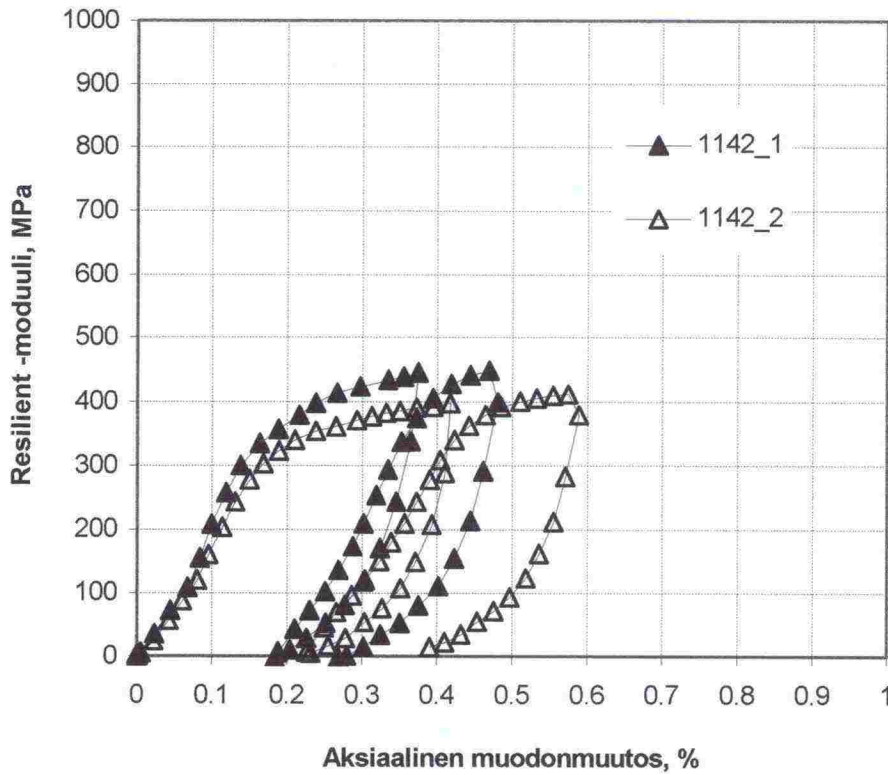
NÄYTEMATERIAALI 1113



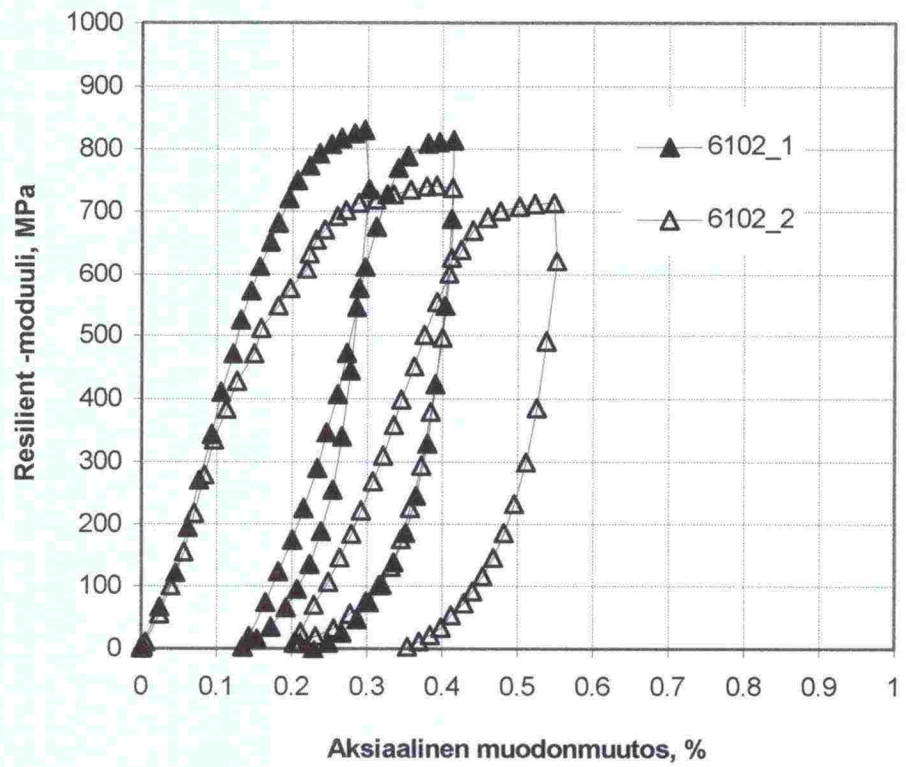
NÄYTEMATERIAALI 1140



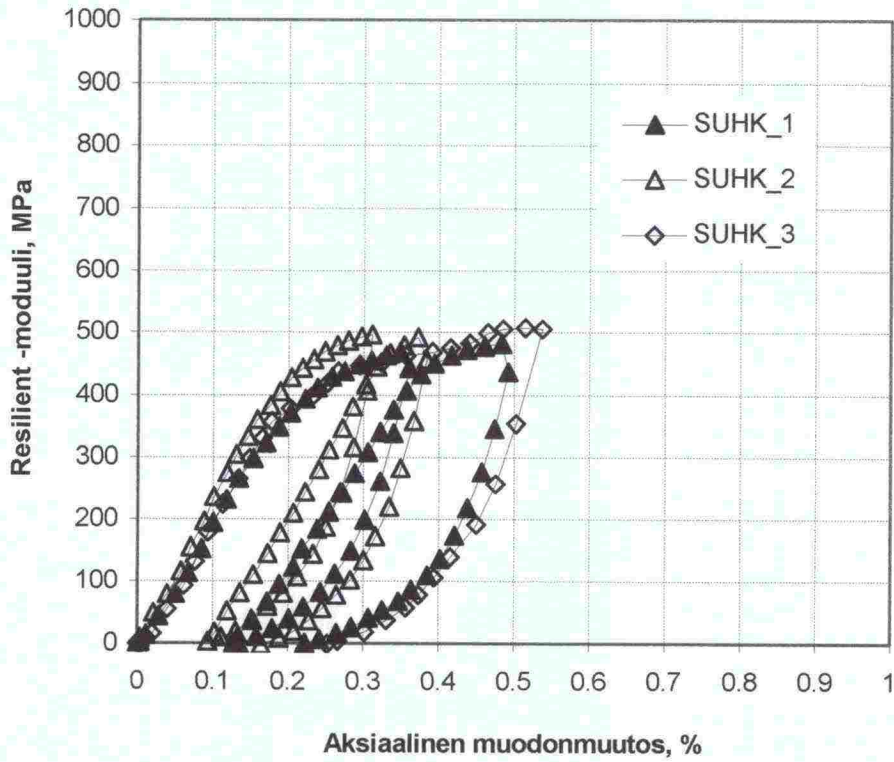
NÄYTEMATERIAALI 1142



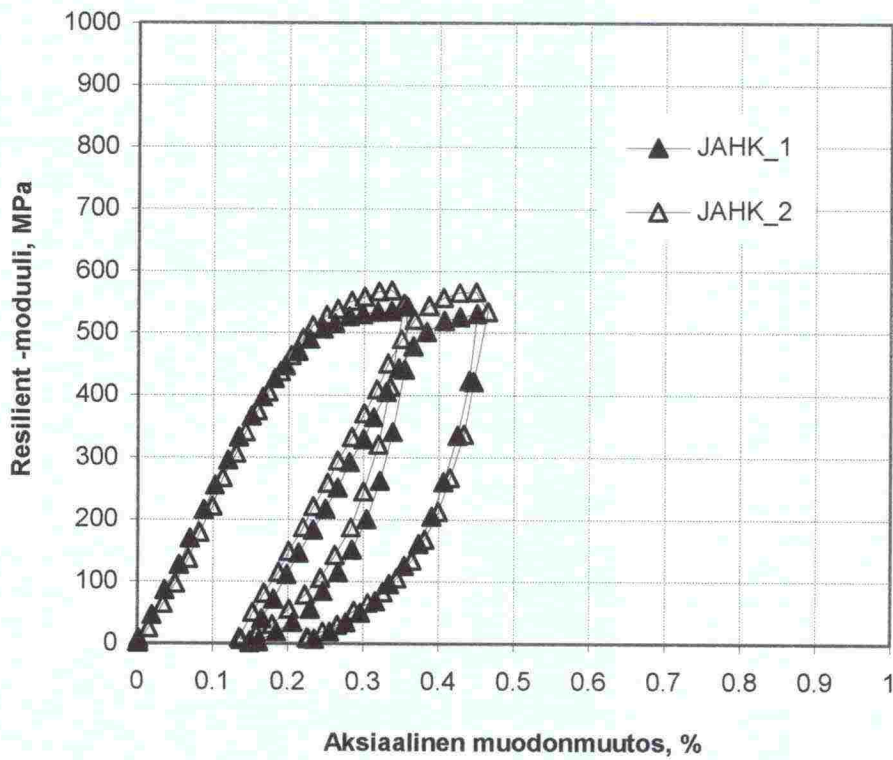
NÄYTEMATERIAALI 6102



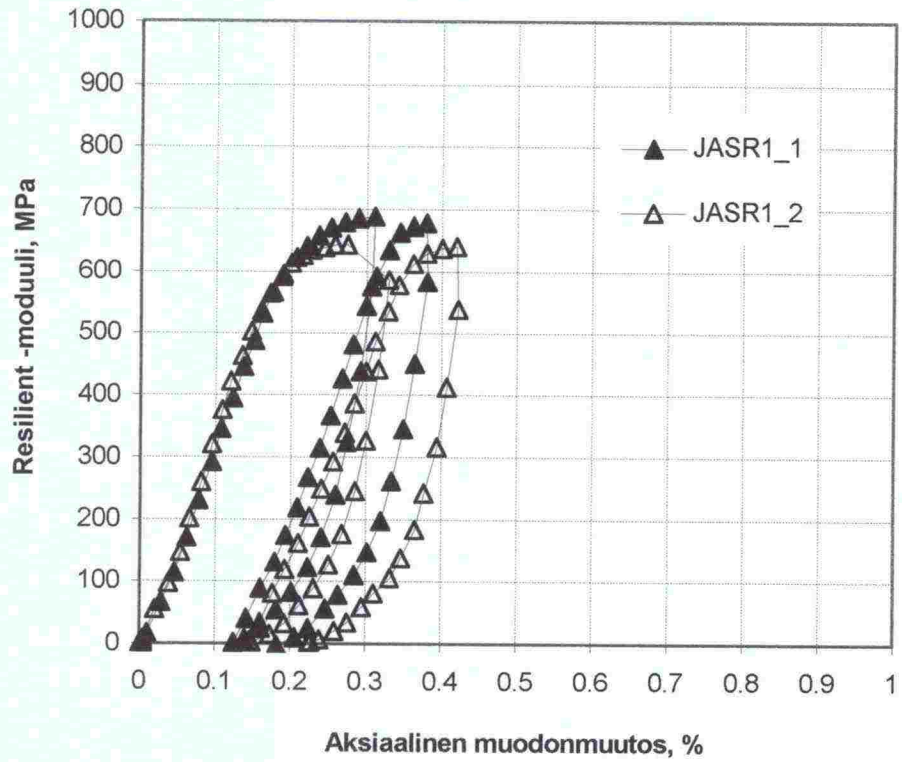
SUODATINKERROKSEN HIEKKA



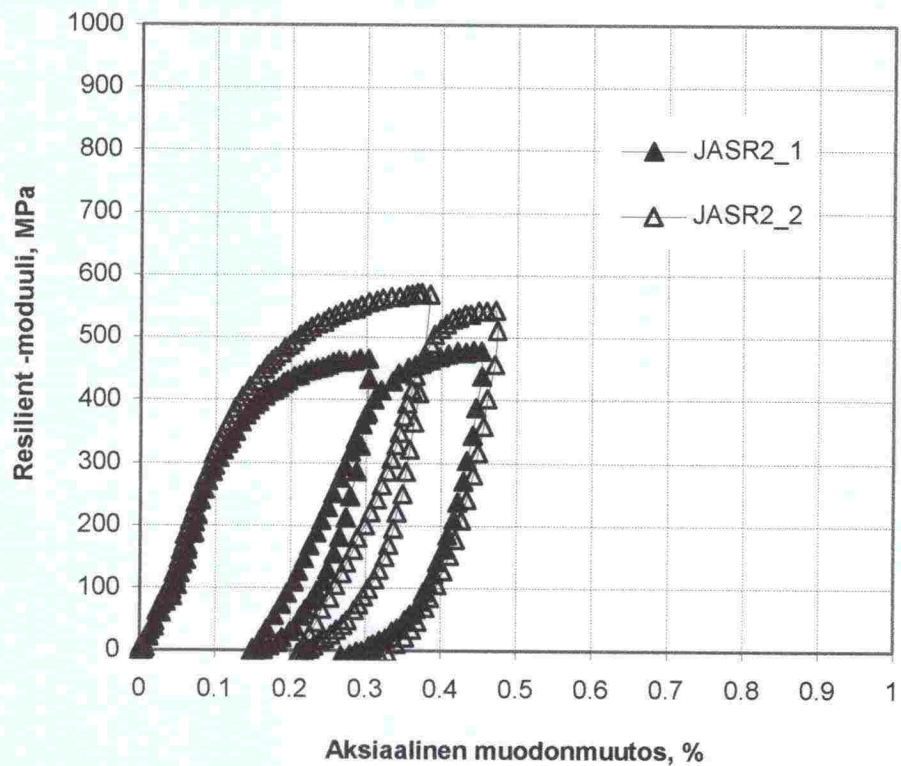
JAKAVAN KERROKSEN HIEKKA



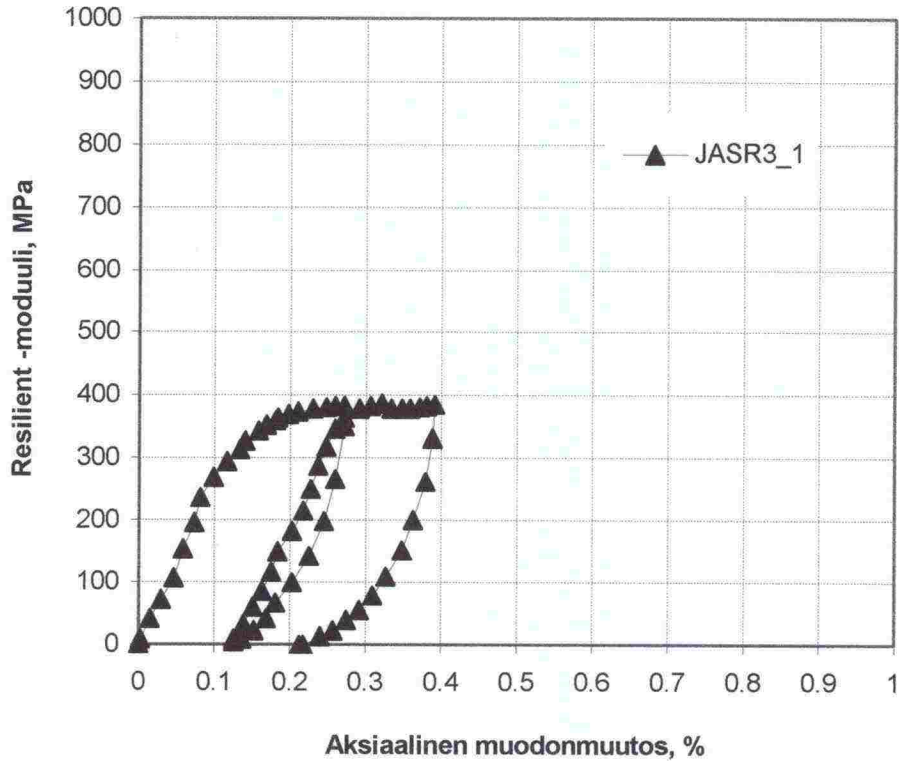
JAKAVAN KERROKSEN SORA 1



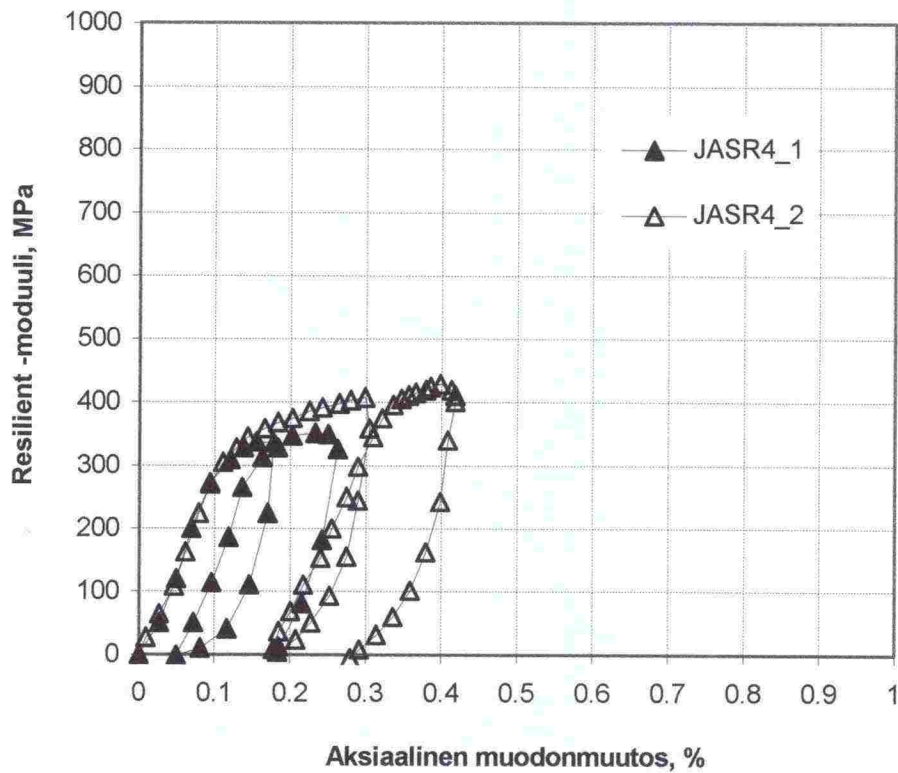
JAKAVAN KERROKSEN SORA 2



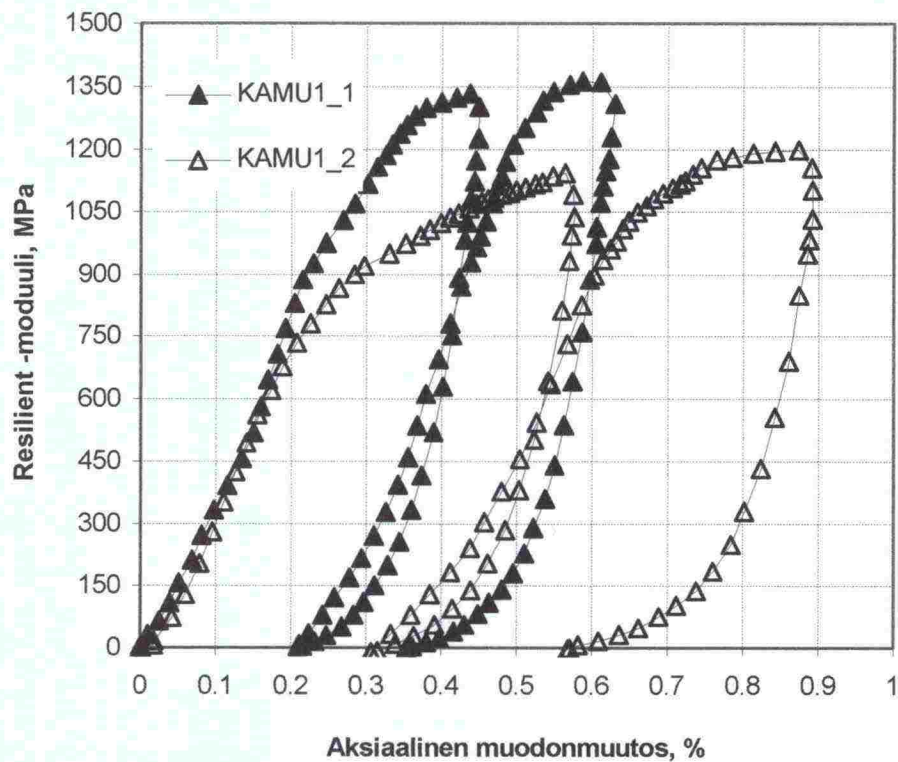
JAKAVAN KERROKSEN SORA 3



JAKAVAN KERROKSEN SORA 4



KANTAVAN KERROKSEN MURSKKE 1



KANTAVAN KERROKSEN MURSKKE 2

