

Leena Korkiala-Tanttu, Pekka Jauhiainen, Pekka Halonen, Rainer Laaksonen,  
Markku Juvankoski, Heikki Kangas, Janne Sikiö

# **Luiskatun tierakenteen urautuminen**

**Kevytpäällystetutkimus  
HVS-Nordic-koerakenteet**

**Tiehallinnon selvityksiä 33/2002**



**Leena Korkiala-Tanttu, Pekka Jauhiainen, Pekka Halonen, Rainer Laaksonen,  
Markku Juvankoski, Heikki Kangas, Janne Sikiö**

# **Luiskatun tierakenteen urautuminen**

**Kevytpäällystetutkimus  
HVS-Nordic-koerakenteet**

**Tiehallinnon selvityksiä 33/2002**



ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-914-5  
TIEH 3200765

Edita Prima Oy  
Helsinki 2002

Julkaisua myy/saatavana:  
Tiehallinto, julkaisumyynti  
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 11

Leena Korkiala-Tanttu, Pekka Jauhiainen, Pekka Halonen, Rainer Laaksonen, Markku Juvankoski, Heikki Kangas, Janne Sikiö. Luiskatun tierakenteen urautuminen. Helsinki 2002. Tiehallinto, Tiehallinnon selvityksiä 33/2002. 64 s. + liitt. ISSN 1457-9871, ISBN 951-726-914-5, TIEH 3200765.

**Asiasanat:** tierakenne, luiskat, kantavuus, deformaatio, vähäliikenteiset tiet  
**Aiheluokka:** 32

## TIIVISTELMÄ

Täysmittakaavaisella HVS-Nordic kuormitustestauksella hankittiin tietoa tie-luiskan 'reunavaikutuksesta' ja rakenteen deformatumisesta. Rakenteet tehtiin Otaniemen teräsbetoniseen tutkimusaltaaseen. Testattavia rakenteita oli kolme: luiskaton, loivaluiskainen (1:3) sekä jyrkkäluiskainen (1:1,5) rakenne. Rakentaminen ja pääosa instrumentoinnista tehtiin syksyllä 2000. Varsinainen testaus ajoittui kesään ja syksyyn 2001. Tutkittavat koerakenteet mitoitettiin vastaamaan alemman luokan tierakennetta. Tutkimusten tilaajana ja rahoittajana toimi Tielaitos, nykyinen Tiehallinto.

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia luiskan ja eri rakennekerrosten käyttäytymistä, kantavuutta sekä deformatumista ja vaurioitumista kuorma-auton pyörän kulkua jäljittelevällä kuormituksella. Koetulosten pääasiallinen käytötarkoitus oli mitoitusten menetelmien ja laskentamallien verifiointi. HVS-tutkimuksella verifiointiin myös laboratoriomittakaavan koetuloksia suhteessa täysmittakaavaisiin kokeisiin.

Koerakenne tehtiin erittäin huolellisesti, pyrkien saavuttamaan materiaaliominaisuuksissa ja kerrospaksuuksissa mahdollisimman tasalaatuinen ja ennalta määritelly lopputulos. Kerrospaksuuksissa saavutettiin varsin hyvät tulokset. Rakenteen tiivistämistuloksissa oli havaittavissa hajontaa, jonka takia kaikki rakenteet eivät olleet yhtä tiiviitä. Rakenteen esikuormitus kuitenkin tiivistä rakenteita, jolloin rakenteiden väliset tiiviyserot tasoittuvat. Rakenteet oli suunniteltu kestäväksi 15 000 standardiakselin ylitystä, eli huomattavasti heikkolaatuisimmiksi kuin Tielaitoksen ohjeiden mukaiset rakenteet. Eri kerrosten pinnalta tehdyt kantavuusmittaukset alittivat siten myös selvästi Tielaitoksen laatuvaatimukset.

Koerakenteet instrumentoitiin huolellisesti. Instrumentointi oli suunniteltu siten, että sillä voitiin arvioida eri kerrosten pysyviä ja hetkellisiä muodonmuutoksia sekä vaak- että pystysuuntaan eri kerroksissa. Rakenteet testattiin käyttäen yhtä kuormittavaa pyörää ns. super singleä. Pyöräkuormaa kasvatettiin portaittain 30:stä 50:een kN. Suurimmalla kuormituksella nostettiin myös veden pintaa rakenteessa.

Suurin osa pysyvistä muodonmuutoksista testatuissa rakenteissa tapahtui ylimmän 500 mm alueella. Huomattavaa on, että muodonmuutoksista suurin osa tai yhtä paljon tapahtui murskekerroksen alaosassa (syvyys 240 - 440 mm) kuin sen ylemmässä osassa (syvyys 40 - 240 mm) ja päällysteessä yhteensä. Myös alla olevissa sora- ja savikerroksissa havaittiin selvää urautumista. Luiskattomassa rakenteessa suhteellisten muodonmuutosten maksimi kehittyi murskekerroksen alaosaan, kun kuormitus kasvoi 40 kN ja siitä suuremmaksi. Sitä vastoin loivaluiskallisissa rakenteissa muodonmuutokset kehittyivät tasaiset koko murskekerrokseen. Jyrkkäluiskaisen rakenteen muodonmuutokset jakaantuivat suhteellisen tasaisesti koko murskekerroksessa. Vasta kun kuormitus oli 50 kN ja vedenpinta oli ylempänä, muodonmuutokset keskittyivät voimakkaammin murskekerroksen yläosaan.

Mittausten mukaan loivaluiskaisen rakenteen vaakasuuntaiset siirtymät olivat suurimmillaan pinnassa ja jyrkällä luiskalla siirtymät keskittyivät alemmas



murskekerrokseen. Jyrkkäluiskainen rakenne oli suurimmilla kuormituksilla jo hyvin lähellä murtorajatilaa ja syntyneet muodonmuutokset olivat suuria. Muodonmuutosten keskittyminen murskekerrokseen osoittaa liukupinnan sijainneen tässä kerroksessa. Sitä vastoin loivaluiskaisessa rakenteessa muodonmuutokset keskittyvät rakenteen yläosiin, joka viittaa liukupinnan sijaintiin ylempänä.

Hetkellisten ja pysyvien vaakasuuntaisten siirtymien suhteet noudattivat mittausten mukaan periaatetta, jossa pysyvät muodonmuutokset kasvoivat hetkellisten muodonmuutosten kasvaessa. Pysyvät siirtymät yhtä ylityskertaa kohti kasvoivat selvästi, kun tietty kynnyсарvo hetkellisissä siirtymissä oli ylitetty. Tämä kynnyсарvo sekä murskeelle että soralle oli noin 100 µm. Pysyvien siirtymien kasvuun vaikuttavat lisäksi merkittävästi vesipitoisuuden muutokset sekä luiskan jyrkkyys. Pystysuuntaisten siirtymien osalta oli havaittavissa samantyyppistä käyttäytymistä, joskaan yhtä selvää taitekohtaa / kynnyсарvoa muodonmuutoskäyttäytymiselle kuin vaakasuuntaisissa siirtymissä ei havaittu.

Sora- ja savikerroksen jäykkyysmoduulit laskettiin takaisinpäin siirtymä- ja jännitystilamittauksista. Erityisesti sorakerroksen tuloksissa oli merkittävää hajontaa. Tulosten perusteella ei ole havaittavissa, että luiskakaltevuus vaikuttaisi moduulien arvoihin yksikäsitteisesti. Varsinkin jyrkkäluiskaisen rakenteen sorakerroksen moduuliarvot olivat suurempia kuin luiskattomalle tai loivaluiskaiselle. Mittaustulosten suurempi hajonta sorakerroksessa viittaa maanpainesellien epävarmaan toimintaan rakeisissa materiaaleissa. Verrattaessa laboratoriokokeista määritettyjä jäykkyysmoduuleja maastomittauksista laskettuihin arvoihin havaittiin, että laboratoriokokeista määritetty jäykkyysmoduuli yliarvioi sorakerroksen ja aliarvioi savikerroksen jäykkyyttä. Tämä saattaa selittyä laskennallisissa tarkasteluissa havaitusta piirteestä, että sorakerroksen muodostui alkuperäistä arviota korkeammat ja savikerrokseen alhaisemmat jännitykset.

Urautumisnopeus kunkin kuormitusportaan sisällä pieneni kaikilla rakennetyypeillä profilometrimittausten mukaan. Tuloksissa oli jonkin verran huojuntaa, mutta keskimäärin trendi oli selvä. Jos materiaalien vesipitoisuudet kasvoivat (rankkasade, vedenpinnan nosto tasot W2 ja W3), kasvoivat myös urautumisnopeudet. Jyrkkäluiskaisessa rakenteessa veden nostaminen kalliomurskekerrokseen (W3) kiihdytti urautumisnopeutta merkittävästi, eikä urautumisnopeus näyttänyt vaimenevan. Tämä viittaa siihen, että rakenne oli murtotilassa tai hyvin lähellä sitä.

Kevytpäällystemitoitusmenettelyä varten mittaustuloksista määritettiin ns. geometriakerroin. Tällä kertoimella voidaan arvioida tien poikkileikkauksen leveyden ja luiskakaltevuuden vaikutusta urautumiseen.

Koekuormitusalueella tehtiin lisäksi erillinen kaksikomponenttigeotekstiilien toimivuustutkimus, josta on laadittu oma tutkimusraporttinsa.



Leena KORKIALA-TANTTU, Pekka JAUHAINEN, Pekka HALONEN, Rainer LAAKSONEN, Markku JUVANKOSKI, Heikki KANGAS, Janne SIKIÖ. Luiskatun tierakenteen urautuminen. [The effect of the steepness of the sideslope on rutting]. Helsinki 2002. Finnish Road Administration, Finnra Reports 33/2002.64 p. + app. ISSN 1457-9871, ISBN 951-726-914-5, TIEH 3200765.

**Keywords:** low-volume road, accelerated pavement test, rutting, permanent deformation

## SUMMARY

The objective of Heavy Vehicle Simulator-tests (HVS) was to study the influence of the road cross section and edge effects to the structural strength and permanent deformations of low-volume roads. The purpose of the test results was to verify design methods and calculation models. The second purpose was to verify laboratory tests in a full-scale model test. The tests were financed by Finnish Road Administration.

The test consisted on three test sections: one without slope, one with 1:3 slope and one with 1:1,5 slope. The test sections were constructed and instrumented in the autumn 2000. The area was insulated during the winter and test was performed one year later. The structures were designed to be equivalent to the structure of a low-volume road. All test sections consist of a thin asphalt layer of 40 mm, a 400 mm base layer of crushed rock and a 200 mm subbase layer of gravel. The gravel includes fine-grained particles, so the capillary rise of water is evident.

Instrumentation and measurements were mainly focused on the dynamic and permanent deformations in pavement layers and slope in both vertical and horizontal direction during test loading. Besides that the water content, pore water and earth pressures were measured. The deformation characteristics were determined with triaxial tests from test samples of each layer. The instrumentation was similar in all sections. Most test instruments seemed to work well during the test and give reliable results.

The tested structures were designed to stand up only about 15 000 passes. The structures were constructed carefully according to the quality requirements of Finnra. The quality of the construction was followed with level control, density and bearing capacity measurements. The thicknesses of the layers were even and they fulfilled the quality requirements clearly. The densities of layers did not totally fulfil the quality requirements. The bearing capacities were only about 20 - 35 % of the Finnra's requirements.

Test parameters and environmental conditions, including the water table regulation, were controlled during the HVS test. All sections were tested identically. At the beginning of test, the water table was 50 mm under the surface of clay subground. At the end of test the water table was elevated to the top of the gravel layer during the test and to the centre of crushed rock. Static and cumulative pore pressures were monitored with transducers. A super single wheel was used as a loading wheel and the load was raised with a step of 10 kN from 30 to 50 kN.

The wheel loaded structure in three different positions: 400 mm, 700 mm and 1000 mm from the edge of the slope. One test step consisted of 600 passes in each position. The pavement response to the moving wheel load with several offsets was measured and finally the pavement performance was evaluated with accelerated testing.

The permanent and dynamic deformations were followed up with Emu-Coil sensors from the lowest part of crushed rock, gravel and from the two top-



most parts of clay (thickness of each 200 mm). The permanent horizontal deformations were also followed from the side slopes. HVS-profilometer measurements were used to monitor the deformations on the asphalt layer. Deformations were measured after each 600 passes.

It was assumed that the asphalt layer (50 mm) did not deform during the test and all deformations happened in unbound layers. The distributions of permanent deformations were calculated for each 200 mm layer. From 63 to 80 % of the permanent deformations happened in the base layer of crushed rock (400 mm) and they were distributed evenly between the upper and lowest 200 mm. The gravel layer underneath deformed about 8 to 13 % and the upper part of the clay layer (400 mm) deformed with 4 - 6 %.

There were significant deformations in sloped structures and it can be assumed that the loading situation in the steepest structure with high water table was quite near to the failure. The damages of the sloped structures were easy to notice and the depths of the ruts were over 40 mm.

A significant part of the relative vertical deformations of the structure with 1:1,5 slope concentrated to the upper 400 mm part of the structure. It is obvious, that the failure surface develops to this part of the structure with the highest deformations and continues towards the slope. The measurements of the horizontal displacements from the side slopes confirm this idea. The horizontal displacements of the gentle slope (1:3) concentrated near the surface, while no clear signs of the failure surface was detected.

The development of the permanent deformations both in vertical and horizontal directions was compared with the dynamic deformations. Dynamic deformations were measured during one loading pulse. The permanent deformations remain quite moderate to some threshold value, but beyond it they grow relatively fast. In the gravel layer the threshold value of dynamic deformation was about 100 micrometer/pass. This threshold value can be compared to the yield strength of a soil. Once the yield strength is exceeded the permanent deformations begin to grow. The structures should be designed in such a way that the yield strength is not exceeded.

To be able to estimate the effect of the cross section to rutting in low-volume roads the factor of geometry is introduced. With the help of this factor the effect of steepness of the slope and also the width of the road to the rutting can be estimated. The basic assumption was that the factor is 1, when the width of the road is 6,5 meters and the steepness of the slope is 1:3.

Besides the above discoveries other noticeable things in the results were:

- The backward calculated resilient moduli of the gravel were a little lower than those defined from the laboratory tests. This means, that the deformations of the layer exceeded the anticipated deformations.
- The backward calculated resilient moduli of the clay layer were a little higher than those defined from the laboratory tests. This means, that the deformations of this layer were under the anticipated deformations.
- The speed of the rutting inside each loading step decelerated while the test proceeded except the case when the water table was raised near the asphalt. In this cases the speed of the rutting accelerated and it is presumable that the loading situation in these cases was near failure.

## ESIPUHE

Kevytpäälysteisten tierakenteiden projekti oli osa Tielaitoksen, nykyisin Tiehallinnon rahoittamaa Tierakenteiden tutkimusohjelmaa. Kevytpäälysteisten tierakenteiden projekti toteutettiin Tiehallinnon ja Tieliikelaitoksen ohjausryhmän valvonnassa Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratorion ja VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan yhteistyönä.

Projektin ohjausryhmän ovat muodostaneet seuraavat henkilöt:

Aarno Valkeisenmäki	Tieliikelaitos, puheenjohtaja
Panu Tolla	Tieliikelaitos
Pertti Virtala	Tiehallinto/Hti
Ismo Iso-Heiniemi	Tiehallinto/Hti
Tuomas Toivonen	Tiehallinto/Hos
Tuomo Kallionpää	Tiehallinto/Hti
Kari Lehtonen	Tiehallinto/Hti
Esko Ehrola	OY, koordinaattori
Jouko Belt	OY
Laura Apilo	VTT
Jouko Törnqvist	VTT
Harri Spoo	VTT
Sami Petäjä	VTT, sihteeri

Tämä osatutkimuksen tavoitteena oli tutkia luiskan ja eri rakennekerrosten käyttäytymistä, kantavuutta sekä deformatumista ja vaurioitumista kuorma-auton kulkua jäljittelevällä HVS kuormituksella.

Tutkimuksen on tehnyt VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Heikki Kangas oli vastuussa tutkimuksen valmistelusta, rakenteiden rakentamisesta ja instrumentoinnista. Rakenteiden kuormittamisesta huolehtivat Pekka Halonen sekä Janne Sikiö. Laboratoriokokeet olivat Rainer Laaksosen ja rakenteiden mallinnukset Flac-ohjelmalla Markku Juvankosken vastuulla. Pekka Jauhiainen sekä Leena Korkiala-Tanttu käsittelivät koetulokset. Raportin laadinnasta ja osatehtävien kokoamisesta vastasi Leena Korkiala-Tanttu.

Espoo, elokuu 2002

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



**Sisältö**

<b>1</b>	<b>YLEISKUVAUS KOEALTAASTA JA KUORMITUKSESTA</b>	<b>13</b>
1.1	Koeallas	13
1.2	Kuormitus HVS-Nordicilla	14
<b>2</b>	<b>RAKENTAMINEN</b>	<b>15</b>
2.1	Testattavat rakenteet	15
2.2	Rakennekerrokset	16
2.3	Pohjaveden pinnan sääntely	17
<b>3</b>	<b>INSTRUMENTOINTI</b>	<b>18</b>
3.1	Johdanto	18
3.2	Rakentamisen aikainen instrumentointi	18
3.3	Rakentamisen jälkeinen instrumentointi	19
<b>4</b>	<b>KOESTUKSET</b>	<b>21</b>
4.1	Rakennemittaukset ennen koestusta	21
4.2	Laboratoriokokeet ja näytteenotot sitomattomille materiaaleille	22
4.2.1	Tehdyt kokeet	22
4.2.2	Jäykkyysmoduuli- ja deformaatiokokeet	23
4.3	Kuormitusohjelma	27
<b>5</b>	<b>MITTAUSTULOKSET</b>	<b>28</b>
5.1	Huokospainemittaukset	28
5.2	Maanpainemittaukset	28
5.3	Asfaltti	28
5.3.1	Kiihtyvyyssanturit	28
5.3.2	Profilometri ja oikolautamittaukset	29
5.3.3	Loadman mittaukset	30
5.4	Kantavan kerroksen murske	30
5.5	Jakava kerros, sora	30
5.6	Pohjamaa savi	30
5.7	Letkupainumamittaukset	30
5.8	Sivusiirtymät	30
5.9	Vauriokartoitukset	31
<b>6</b>	<b>MALLINNUS</b>	<b>31</b>
6.1	Tehtävän määrittäminen	31
6.2	Tarkasteluissa käytetty laskentaohjelma ja laskennan kulku	32
6.3	Materiaaliparametrit ja materiaalimallit	33
6.4	Laskentojen tulokset	34

---

6.5	Tulosten vertailu rakenteissa havaittuihin muodonmuutoksiin ja jännityksiin	35
6.6	Mallinnuksen johtopäätökset ja jatkoselvitystarpeet	43
6.7	Tutkimusaltaan vaikutus rakenteiden muodonmuutoksiin	44
7	<b>TULOSTEN TARKASTELU</b>	<b>44</b>
7.1	Rakentamisen laatu	44
7.2	Pysyvien muodonmuutosten jakaantuminen rakenteessa	47
7.3	Hetkellisten ja pysyvien kokoonpuristumien suhteet	51
7.3.1	Vaakasuuntaiset kokoonpuristumien suhteet	51
7.3.2	Pystysuuntaisten kokoonpuristumien suhteet	53
7.3.3	Rakenteesta takaisinlasketut jäykkyysmoduulit	54
7.4	Erilliset mielenkiintoiset ilmiöt	56
8	<b>GEOM-KERROIN</b>	<b>58</b>
8.1	Tausta	58
8.2	GEOM-kerroin HVS kokeiden perusteella	59
9	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET</b>	<b>63</b>
10	<b>VIITTEET</b>	<b>64</b>
11	<b>LIITTEET</b>	<b>65</b>

---

# 1 YLEISKUVAUS KOEALTAASTA JA KUORMITUKSESTA

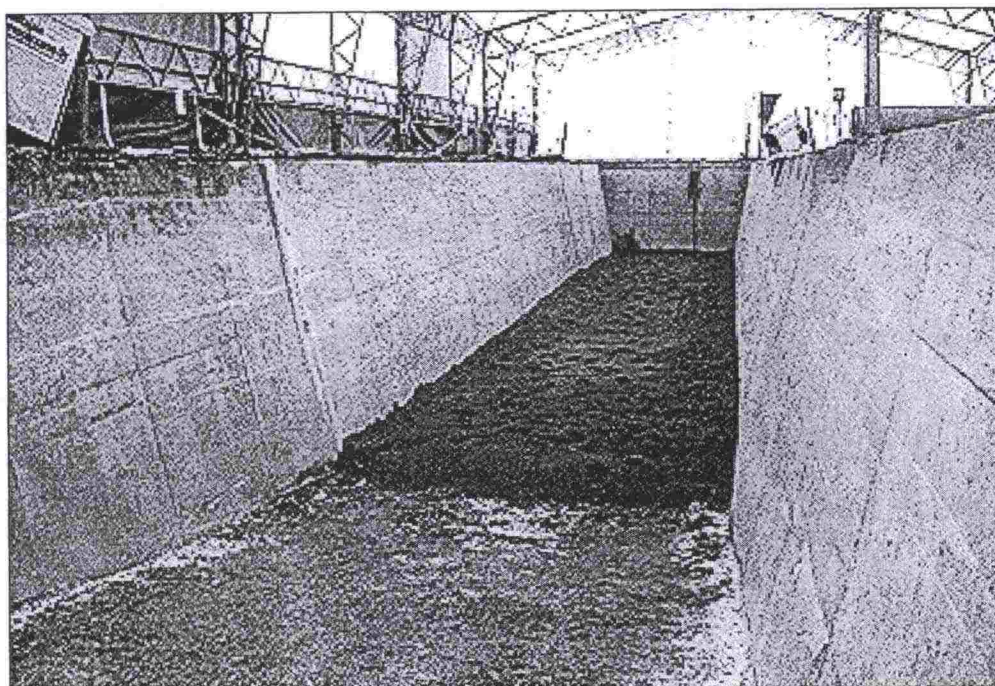
## 1.1 Koeallas

Espoon Otaniemessä on koealtaat HVS-Nordicilla tehtäviä kuormituskokeita varten. Koealueella on sekä betoninen että kallioon louhittu allas. Kevytpäällysterakenteissa käytettiin betoniiallasta (kuvat 1.1 ja 1.3).

Koealtaan seinät ovat teräsbetonia ja niiden yläpinta on maanpinnan tasalla. Koealtaan sisäleveys on yläreunassa (maanpinnan tasossa) 4 m ja pohjalla 3 m. Koealtaan korkeus on 2,5 m. Lisäksi koealtaan päädyssä on kolme kertaa kolmen metrin suuruinen kahden metrin syvennys. Koealtaan seinät ja pohja on lämpöeristetty ulkopuolelta 100 mm lämpöeristeellä.

Koealtaan teräsbetoniseinién paksuus maanpinnan tasossa on 250 mm ja altaan pohjan tasossa 400 tai 350 mm. Altaan pohjan paksuus on 350 - 400 mm. Koealtaassa on kaksi poikittaista liikuntasaumaa.

Altaan päässä on ajoluiska, jossa pohjan leveys muuttuu tasaisesti neljästä metristä kolmeen metriin 16 metrin matkalla. Vedenpintaa koealtaassa voidaan säätää vesijohtoverkosta johdettavalla vedellä.

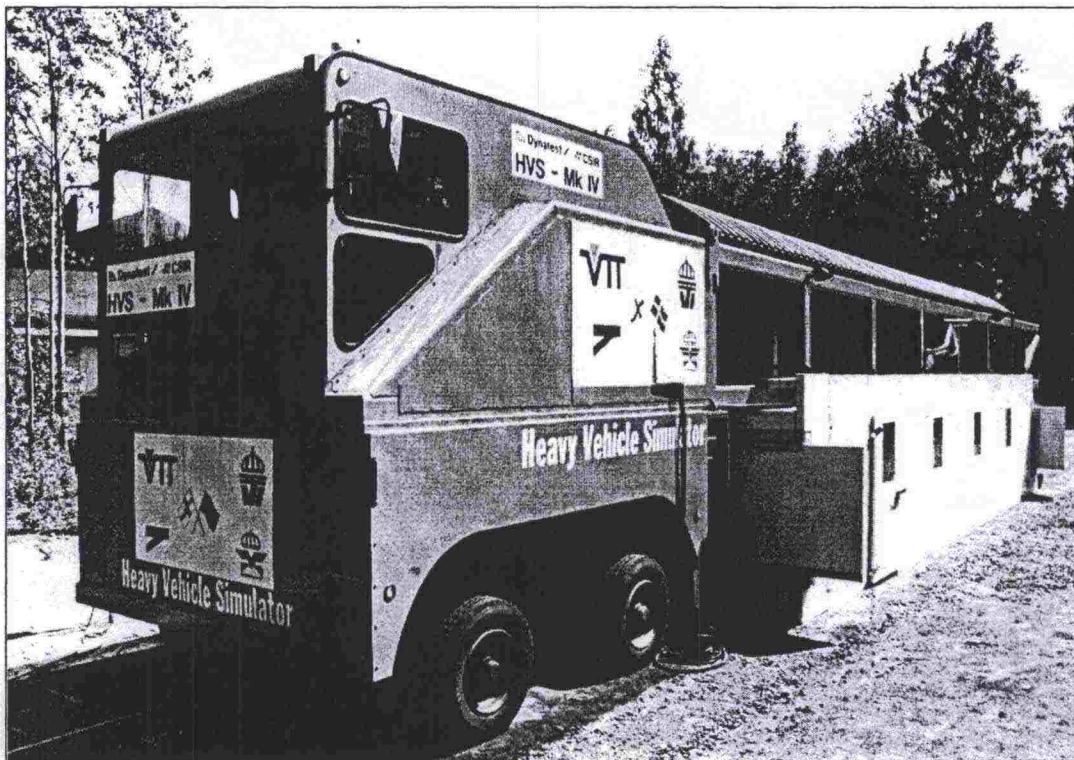


Kuva 1.1. Kevytpäällystetutkimuksen koeallas.

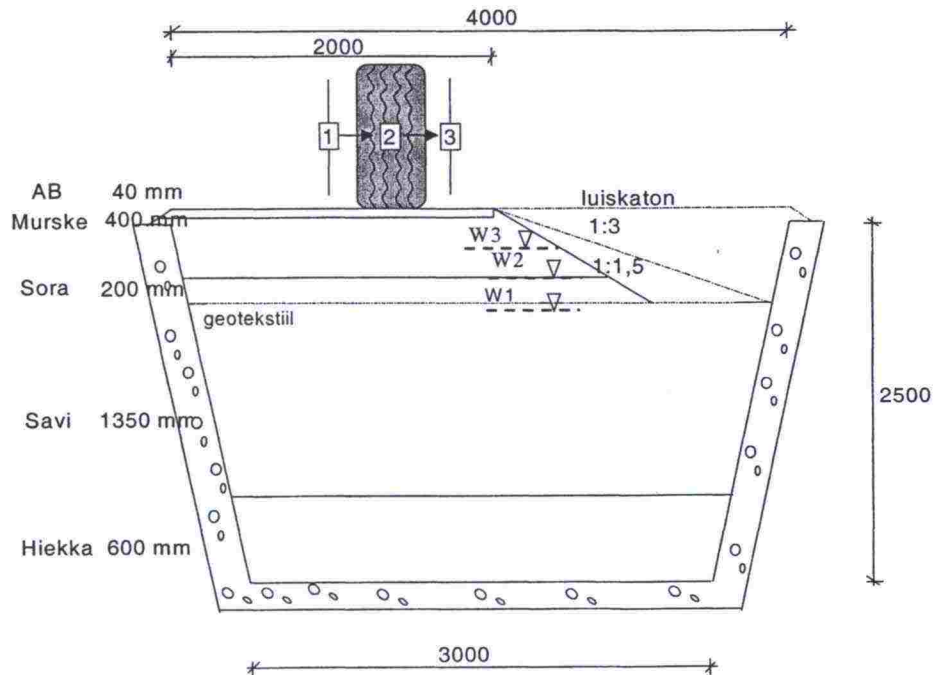


## 1.2 Kuormitus HVS-Nordicilla

HVS-Nordic (engl. HVS - Heavy Vehicle Simulator) koetiekone on 23 m pitkä, 3,7 m leveä ja 4,2 m korkea laite. Sen kokonaismassa on 46 tn. HVS-Nordicin kuormitusalue voi maksimissaan olla 1,5 metriä leveä. Kuormitusalueen kokonaispituus on kahdeksan metriä, josta kuuden metrin matkalla pyöräkuorma ja sen nopeus ovat tasaisia. Kuormitusalueen molemmissa päissä yhden metrin matka kuluu pyörän kiihdyttämiseen, jarruttamiseen ja yksisuuntaisessa kuormituksessa pyörän laskemiseen ja nostamiseen kuormitusalueelta. Pyöräkuormituksen nopeus voidaan säätää 1 - 15 km/h välillä. Pitkäaikaisessa kuormituksessa maksiminopeus on kuitenkin 12 km/h. Kuormittavan pyörän sivuttaisliikkeeksi voidaan valita millainen jakautuma tahansa 50 millimetrin sivusirroin. Kuormitus voidaan tehdä yhteen suuntaan tai molempiin suuntiin.



Kuva 1.2. HVS-Nordic-koetiekone.



Kuva 1.3. Kevytpäälystekoikkileikkaus (luiskaton, 1:3 ja 1:1,5 luiskat).

Simulaattorilla saatavan kuorman yläraja on 110 kN ja alaraja on 25-30 kN. Kuorma voidaan kohdistaa rakenteeseen kuorma-auton yksittäisen pyörän tai paripyörän välityksellä. Lisäksi kuormitukselle voidaan antaa dynaaminen lisäkuorma simuloimaan tien epätasaisuudesta aiheutuvia lisärasituksia. Simulaattorilla on teoriassa mahdollista ajaa 25000 kuormitusta vuorokaudessa (kaksisuuntainen kuormitus).

Laitteeseen kuuluu lämmitys-jäähdytysyksikkö, jonka avulla testattava tierakenne voidaan pitää halutun lämpöisenä. Laitteen siirto vaatii kylmäeristeiden purkamisen ja suuremmissa siirroissa myös testipyörän irrottamisen.

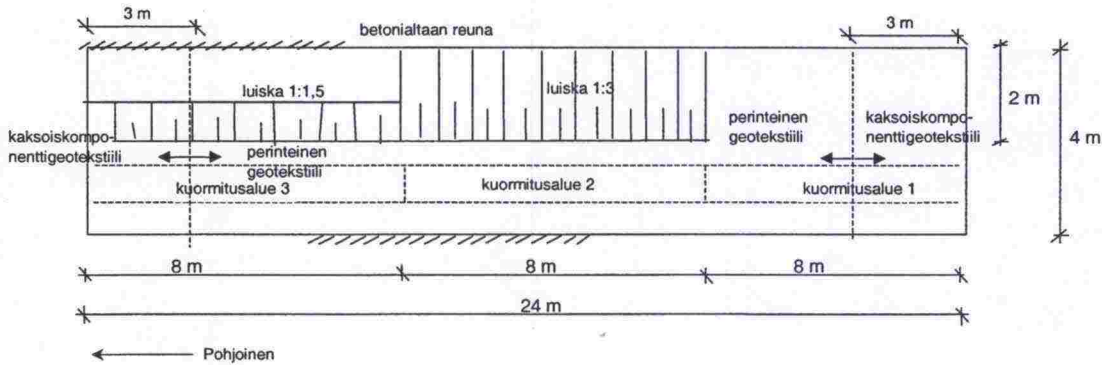
## 2 RAKENTAMINEN

### 2.1 Testattavat rakenteet

Altaaseen rakennettiin kolme erilaista rakennetta: luiskaton, loivaluiskainen (1:3) ja jyrkkäluiskainen (1:1,5) rakenne. Rakenteet luiskattiin normaalisti. Ennen koetiekoneen siirtoa testausalueelle luiskat peitettiin suodatinkankaalla ja täytettiin soralla siirron mahdollistamiseksi. Siirron jälkeen luiskat kaivettiin auki.

Kaikkien kuormitusalueiden rakenteiden materiaalit ja kerrospaksuudet olivat samoja. Kunkin alueen kokonaispituus on 8 m, jossa 6 m matkalla kuormitusparametrit ja olosuhteet ovat vakioita (kuva 2.1).





Kuva 2.1. Pohjakuva rakenteista.

Rakenteen pohjamaana käytettiin altaassa jo aiemmin ollutta salaoja- ja savikerrosta. Kyseiset kerrokset oli tehty jo routivien koerakenteiden tutkimuksiin 1997. Päällysrakenteen paksuutta lisättiin aikaisempaan kokeeseen verrattuna poistamalla savea n. 150 mm ja korvaamalla se soralla. Päällysrakenteen kokonaispaksuudeksi muodostui noin 640 mm (kuva 1.3).

## 2.2 Rakennekerrokset

Rakenne mitoitettiin kantavuudeltaan sellaiseksi, että rakenteen vaurioitumiseen tarvittava kuormituskertamäärä olisi saavutettu noin kahden viikon sisällä kuormituksen aloittamisesta. Vaurioitumiskriteerinä oli 20 mm uran muodostus.

Altaan pohjamaana ollutta savikerrosta poistettiin noin 150 mm paksuudelta. Savikerroksen pinta tasattiin huolellisesti. Sen pintaan asennettiin käyttöluokan 3 suodatinkangas sekä altaan päihin 3 metrin levyinen kaksikomponenttigeotekstiili. Kaksikomponenttigeotekstiilit asennettiin rakenteeseen niiden käyttäytymisen testaamiseksi. Niiden osalta on tehty erillinen raportti /Korkiala-Tanttu et al. 2002/. Geotekstiilejä asennettiin myös kuormitusalueiden ulkopuolelle. Saveen asennettiin antureita ja mittalaitteita rakennustyön yhteydessä. Kaksikomponenttigeotekstiilialueen ja tavanomaisen geotekstiilialueen väliin asennettiin sorakerrokseen pystysuuntainen vesieriste (bentoniittimatto), jotta voitiin tarkemmin säännöstellä vesipitoisuutta eri geotekstiilien alueilla.

Sitomattomien rakennekerrosten alimpana osana (jakava kerros) oli 200 mm:n tiivistetty sorakerros (hiekkainen sora) ja ylempänä osana (kantava kerros) 400 mm:n murskekerros ('Teiskon murske'). Materiaalien tarkemmat kuvaukset löytyvät luvusta 4. Jakava kerros (sora) levitettiin siten, että se voitiin tiivistää myös luiskarakenteessa koko alueen leveydeltä. Sora tiivistettiin sileävalssijyrällä (n. 10 t) käyttäen kolmea ylitysajokertaa ilman täryä. Lopuksi soran pintaan maalattiin kunkin alueen kohdalle poikittain paksu lateksikerros 2 m levyiselle ja koko rakenteen pituiselle alueelle. Murskekerros levitettiin ja tiivistettiin yhtenä kerroksena. Murskekerrosta ei voitu levittää ohuempaan kerroksena, sillä alla olevan sorakerroksen kantavuus oli rakentamishetkellä alhainen. Tiivistyksessä käytettiin 400 kg tärylevyä ja kolme ajokertaa.



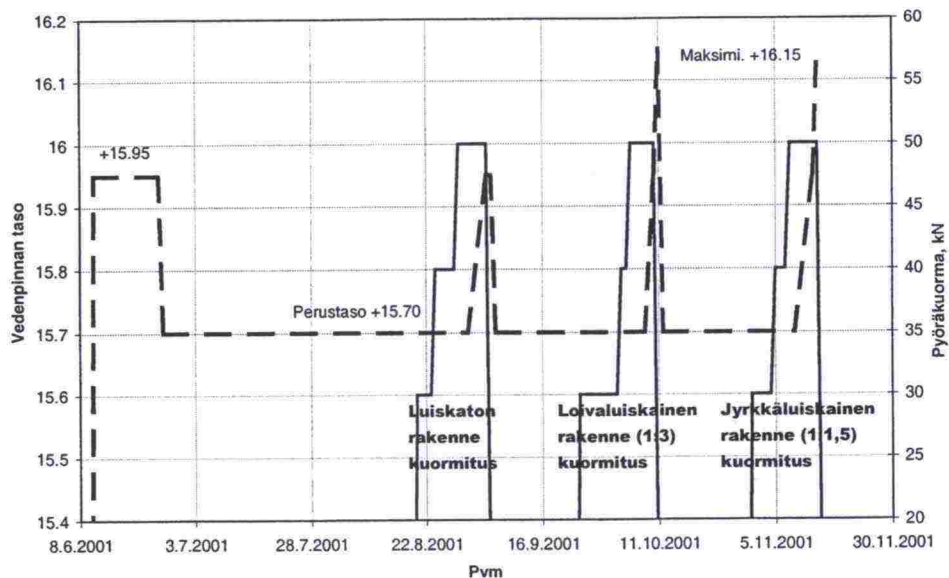
Sidottuna päällysrakennekerroksena oli 40 mm asfalttibetonia (AB16/100), jonka raekoko oli 0 - 16 mm ja bitumina B70/100. Kerros tiivistettiin normaalisti sileävalssijyrällä.

Rakennustyöt suoritettiin syksyllä 2000 ja koerakenne suojattiin talven yli lämpöeristämällä. Varsinainen testaus alkoi kesäkuussa 2001. Luiska-alueet täytettiin ja tiivistettiin, mutta niiden myöhempää aukikaivuuta helpotettiin jättämällä murskekerros luiskien kohdalta pois ja täyttämällä ne soralla. Luiskat kaivettiin auki vasta, kun kone oli siirretty ko. luiskarakenteen päälle.

Rakennustyön laadunvalvonnan tulokset on esitetty liitteissä 1 - 3.

### 2.3 Pohjaveden pinnan sääntely

Pohjaveden pinta nostettiin ennen varsinaisen testauksen aloittamista kesäkuun alussa jakavan kerroksen pohjan tasoon ( $W2 = +15.95$ ) muutaman viikon ajaksi. Tämän jälkeen se laskettiin alas testauksen aikaiseen perustasoon ( $W1 = +15.70$ , 50 mm pohjamaan pinnan alapuolella). Seisonta-aika ennen kuormituksen käynnistämistä oli kuusi viikkoa. Pohjaveden pinnan alentamisen vaikutusta seurattiin sekä kaksikomponentti- että normaali-geotekstiilialueilla. Jokaisen alueen kuormituksen loppuvaiheessa pohjaveden pintaa nostettiin vähintään sorakerroksen yläpinnan tasoon ( $W2$ ) ja loiva- ja jyrkkäluiskaisilla alueilla myös murskekerrokseen ( $W3 +16.15$ ). Pohjaveden pinnan tasojen vaihtelu sekä eri alueiden kuormitukset on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Pohjaveden pinnan tasot ja eri alueiden kuormitusajankohdat.

### 3 INSTRUMENTOINTI

#### 3.1 Johdanto

Instrumentoinnin avulla tarkkailtiin rakenteessa tapahtuvia kosteuden ja lämpötilan muutoksia sekä rakentamisen jälkeen että testin aikana. Koe-kuormituksen aikana mitattiin rakenteellisia muodonmuutoksia sekä maan- ja huokosvedenpaineita. Mittauksissa rekisteröivät vasteet olivat sekä dynaamisia että staattisia. Kaikki anturit asennettiin huolellisesti erillisen instrumentointisuunnitelman mukaisesti. Anturit kalibroitiin ennen asentamista ja niiden toiminta tarkistettiin vielä juuri ennen asentamista.

Rakentamisen aikana rakenteeseen asennettiin anturit tilavuusvesipitoisuuden, maanpaineen, huokospaineen ja siirtymien (Emu-coil anturit ja painumaletkut) mittaamista varten. Osa instrumentoinnista tehtiin koerakenteen rakentamisen jälkeen. Lisäksi rakenteissa kokeiltiin Percometer-mittalaitteen toimintaa erillistä tutkimusta varten /Vuorimies 2002/.

#### 3.2 Rakentamisen aikainen instrumentointi

Taulukossa 3.1 on esitetty rakennusaikana asennettujen instrumenttien tyyppit ja kokonaismäärät. Detalj kuvat eri rakenteiden instrumentoinnista on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 3.1. Rakennusaikana asennetut instrumentit.

Mitattava suure	Instrumentti	Määrä eri kuormitusalueilla
tilavuusvesipitoisuus	Trime-EZ	5+0+4
maanpaine	painerasia	6+6+6
lämpötilaprofiili	termopari	1+1+1
Siirtymä	Emu-coil	8+8+8
Painuma	Painumaletku, Anturi Druck PDCR	4+4+4 1

#### Tilavuusvesipitoisuusanturit

Tilavuusvesipitoisuuden mittaustantureita (Trime-EZ) asennettiin yhteensä yhdeksän kappaletta siten, että luiskattomalla koealueella oli viisi ja jyrkkäluiskaisella alueella neljä anturia. Antureilla seurattiin kaksi-komponenttigeotekstiili ja referenssialueiden vedenpinnan muutosten vaikutusta vesipitoisuuteen.



### **Maanpaineanturit**

Maanpaineantureita asennettiin yhteensä 18 kpl. Kullekin kuormitusalueelle asennettiin kolme maanpaineanturia kahteen eri syvyyteen. Maanpaineanturit oli asennettu mittaamaan pystysuuntaisen jännitystilän muutoksia kuormituksen suhteen.

### **Emu-coil-anturit**

Emu-coil-antureita asennettiin yhteensä 24 kpl kahdeksan kullekin kuormitusalueelle. Käytettyjen Emu-coil anturien halkaisija oli 100 mm. Antureilla mitattiin eri kerrosten hetkellisiä sekä pysyviä siirtymiä sekä vaaka- että pystysuunnassa.

### **Painumaletkut**

Painumaletkuja oli kahta eri tyyppiä, koska kokeilla haluttiin samalla selvittää niiden käyttökelpoisuus deformaatiomittauksiin yleisemminkin. Toinen oli Teknikumin kumiletku 'Mari', sisähalkaisija 12,5 mm ja toinen Legris muovipaineletku, jonka sisähalkaisija oli vähintään 12 mm ja enintään 15 mm. Painumaletkujen ulkohalkaisija oli molemmissa tapauksissa 22,5 mm ja kokonaispituus n. 6 m. Painumaletkujen mittausjärjestelmä kalibroitiin ennen asennusta. Rakenteeseen asennettiin rinnakkain molemmat letkutyyppit. Varsinaiset mittaukset tehtiin 'Mari'-letkusta.

## **3.3 Rakentamisen jälkeinen instrumentointi**

Pääosa rakentamisen jälkeen asennettavasta antureista asennettiin välittömästi rakentamisen jälkeen. Huokosvedenpaineen mittausanturit asennettiin vasta kesällä 2001.

Rakentamisen jälkeinen instrumentointi koostui lämpötilaa, rakenteessa olevan veden määrää ja huokosvedenpaineen vaihtelua sekä asfaltin taipumaa ja luiskan siirtymää mittaavista instrumenteista ja niiden asennusputkista. Päälysteen taipumaa mitattiin asfaltista kiihtyvyyssanturilla, joka asennettiin kullekin rakenteelle juuri ennen testin alkua. Luiskiin asennettiin aukikaivuun jälkeen venymäliuskapohjaisia siirtymäantureita mittaamaan hetkellistä luiskan vaakasiirtymää. Pohjavedenpinnan staattista tasoa seurattiin tarkastuskaivosta. Taulukossa 3.2 esitetään rakentamisen jälkeen asennettujen instrumenttien määrät.

Taulukko 3.2. Rakentamisen jälkeen asennetut instrumentit.

Mitattava suure	Instrumentti	Määrä eri kuormitusalueilla
ulkoilman lämpötila	lämpötila-anturi lämpötilamittari	2 1
asfaltin lämpötila	Cu-konstantaanipari	3+3+3
tiheys ja tilavuusvesipitoisuus	radiometristen mittausputki (VPGR)	1+1+2
taipuma	kiihtyvyyssanturi	1 (siirtymä)
Vaakasuuntainen siirtymä luiskassa	venymäliuskapohjainen (siirto alueelta 2 alueelle 3)	0+2+2
huokosvedenpaine	huokospaineanturi	2+1+2

### Lämpötila-anturit

Lämpötila-anturit olivat kupari-konstantaanipareja ja ne valmistettiin sopivan pituisina ja kosteisiin olosuhteisiin soveltuvina. Näillä antureilla mitattiin ulkoilman lämpötilaa. Mittausta varten asennettiin kaksi lämpötila-anturia suojattuun paikkaan koealtaan välittömään läheisyyteen. Lämpötila-anturien lähelle asennettiin myös tavanomainen lämpömittari lämpötilan seuranta varten.

Koerakenteen pintalämpötilan mittausta varten asennettiin asfaltin pintaan kolme anturia. Asfalttikerrokseen asennettiin lämpötilan mittausta varten myös anturit kerroksen pohjalle ja puoleen väliin.

### Radiometriset mittausputket

Tilavuusvesipitoisuuden ja tiheyden radiometristä mittausta varten koerakenteeseen asennettiin kuormitusalueen 3 kohdalle kaksi putkea ja kuormitusalueille 1 ja 2 yksi putki kumpaankin. Mittausputket olivat pohjastaan tulpattuja teräsputkia.

### Huokosvedenpaineanturit

Huokospaineantureita asennettiin yhteensä viisi kappaletta: kaksi luiskattoon ja jyrkkäluiskaiseen kuormitusalueelle sekä yksi loivaluiskaiselle kuormitusalueelle. Anturit asennettiin 100 mm savikerroksen yläpinnan alapuolelle tasolle +15.64 (n. 60 mm pysyvän alimman vedenpinnan alapuolelle).

### Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturi asennettiin asfalttiin porattuun reikään. Antureita oli vain yksi ja sitä siirrettiin testauksen mukaan kullekin koeosuudelle.



### **Luiskan siirtymäanturit**

Luiskan vaakasiirtymäanturit asennettiin erikseen tarkoitusta varten valmistettujen vaakasuuntaisten tukitelineiden varaan. Telineet kiinnitettiin betonialtaan reunaan luiskan aukikaivun jälkeen. Anturit asennettiin paikoilleen vasta, kun koetiekone oli siirretty testattavan alueen kohdalle. Anturit siirrettiin mitattavaan luiskaan ennen sen testausta.

## **4 KOESTUKSET**

### **4.1 Rakennemittaukset ennen koestusta**

Ennen rakenteiden koestusta kesäkuun alussa pohjavedenpinta nostettiin tasoon + 250 mm (W2) perustasosta kahden viikon ajaksi, jotta savi kyllästyi vedellä. Rakenteen vesipitoisuus määritettiin, jonka jälkeen veden pinta laskettiin perustasoonsa ja vesipitoisuusmittaus uusittiin. Näiden mittausten tarkoituksena oli palvella primaarisesti kaksikomponenttigeotekstiilitutkimusta.

Rakentamisen aikana ja ennen koestusta tehtävien kokeiden ja mittausten tarkoituksena oli selvittää koerakenteen materiaalien niitä ominaisuuksia, joiden muutoksia haluttiin seurata koestuksen aikana ja sen jälkeen. Osalltään tutkimukset toimivat koerakenteen laadunvalvonnan apuna.

#### **Pudotuspainolaitemittaukset**

Pudotuspainolaitemittauksia tehtiin rakenteen pinnalta 23.5.2001 rakenteen ollessa 'kuiva', vaiheessa, jolloin vedenpinta oli nostettuna tasolle W2 (21.6.2001) sekä sen perustasolle laskun jälkeen ennen koestusta (9.7.2001). Mittaustulokset on esitetty liitteessä 5.

#### **Radiometriset mittaukset**

Radiometrisia mittauksia tehtiin pohjavedenpinnan ollessa tasolla W2 +15.95 (25.6.2001) ja sen laskettua tasolle W1 +15.75 (29.6.2001). Eri alueiden mittausten tulokset on esitetty liitteessä 6. Jyrkkäluiskaisen rakenteen toinen mittauspunktista (putki nro 4) sijaitsi kaksikomponenttigeotekstiilialueella ja toinen tavanomaisen geotekstiilin puolella.

## 4.2 Laboratoriokokeet ja näytteenotot sitomattomille materiaaleille

### 4.2.1 Tehdyt kokeet

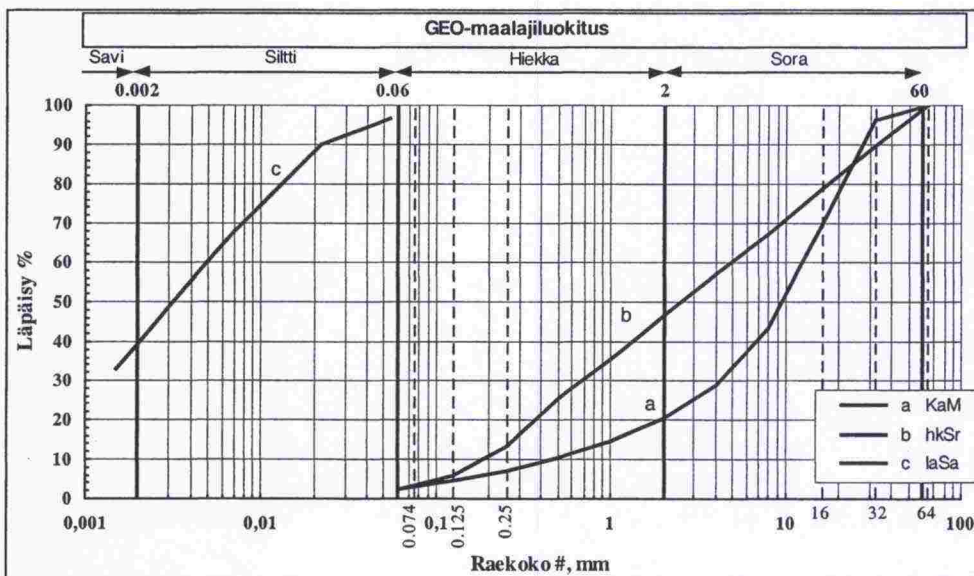
Materiaaleille tehtiin rakeisuus- ja tiivistettävyysskojeiden lisäksi vain jäykkyysmoduulin ja pysyvän muodonmuutoksen määrityskokeet. Materiaaleille ei tehty lujuusominaisuuksien määrittystä.

### Materiaalit ja materiaaliominaisuudet

Kokeissa käytetyt sitomattomat materiaalit olivat laiha savi, hiekkainen sora ja kalliomurske. Laiha savi on peräisin Lahdesta. Samaa savea käytettiin myös TPPT:n 'Routivassa koerakenteessa'. Hiekkainen sora (#0 - 50 mm) on Hyvinkäältä Rauhannummen soranotto paikalta. Kalliomurske (#0 - 32 mm) on peräisin Teiskosta. Samaa soraa ja kalliomursketta käytettiin aiemmin 'Reflex -koerakenteissa'. Kalliomurskeesta ja sorasta poistettiin yli 32 mm rakeet ennen kokeita.

### Rakeisuudet

Materiaalien rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Tutkittujen materiaalien rakeisuuskäyrät.



### Tiivistettävyys

Hiekkaiselle soralle ja kalliomurskeelle tehtiin parannetut Proctor -kokeet (jatkossa Proctor-koe) maksimikuivairtotilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden määrittämiseksi. Tulokset on esitetty taulukossa 4.1. Taulukkoon on kirjattu myös tutkitun savinäytteen kuivatiheys ja vesipitoisuus.

Taulukko 4.1. Tutkittujen materiaalien Proctor -kokeiden tulokset sekä saven tiheys- ja vesipitoisuusarvo.

Materiaali	Maksimikuivairtotiheys / -kuivatilavuuspaino (g/cm <sup>3</sup> / kN/m <sup>3</sup> )	Optimivesi- pitoisuus (%)
Kalliomurske	2.23 / 21.9	5.0
Hiekkainen sora	2.17 / 21.3	6.5
Laiha savi (in-situ arvot)	1.46 / 14.4	32

### 4.2.2 Jäykkyysmoduuli- ja deformaatiokokeet

#### Jännitystila

Kokeet pyrittiin tekemään rakenteessa kuormituksen aikana toteutuissa jännitystiloissa. Jännitystilat arvioitiin laskemalla rakenteen jännitystila Plaxis-elementtimenetelmäohjelmalla HVS-kokeissa toteutuvilla kuormilla ja käyttäen maakerroksille tyypillisiä jäykkyysmoduulin arvoja. Näiden laskelmien pohjalta valittiin kokeiden jännitystiloiksi taulukossa 4.2 esitetyt jännitystilat.

Taulukko 4.2. Jäykkyysmoduulin määrittyskokeiden sekä deformaatiokokeiden tavoitellut jännitys-, tilavuuspainot ja kosteustilat kokeiden alussa.

Materiaali	Selli- paine (kPa)	Deviatorinen jännitys (kPa)	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> )	Vesi- pitoisuus (%)
Kalliomurske, yläosa	60	17 – 350	20.15	4.0
Kalliomurske, keskiosa	25	7 – 140	20.15	4.0
Kalliomurske, alaosa	15	4 – 85	20.15	4.0
Hiekkainen sora	10	2 – 40	19.56	6.0
Laiha savi	18	1 – 21		

#### Materiaalin testaustila

Materiaalien tilamuuttajat (tiheys ja vesipitoisuus) valittiin soran ja murskeen osalta tehtyjen volymetrikokeiden ja radiometrisen luotauksen tulosten perusteella. Savi testattiin näytteen näytteenottotilaisessa tilavuuspainossa ja vesipitoisuudessa. Kokeisiin valitut tiheydet ja vesipitoisuudet on koottu taulukkoon 4.2.

#### 4.2.2.1 Kuormitusmenettely

##### Kuormitus

Kokeet tehtiin valituilla sellipaineilla ja aksiaalisilla kuormituksilla. Kokeen aikana sellipaine pidettiin vakiona aksiaalisen jännityksen vaihdellessa syklisti annettujen rajojen välissä. Kokeiden tavoitekesto oli 400 000 sykliä, mutta aksiaaliselle deformaatiolle oli asetettu sallituksi maksimiarvoksi n. 2 %.

##### Mittaukset

Kokeen aikana näytteestä mitattiin pystymuodonmuutokset siten, että jäykkyysmoduuli sekä palautuva- että pysyvä muodonmuutos voitiin laskea syklien 10, 100, 1000, 10 000, 100 000 (400 000) kohdalla, mikäli koetta ei keskeytetty deformaatorajan johdosta aikaisemmin.

##### Kuormituspulssi ja -taajuus

Kuormituksena käytettiin sinimuotoista voimapulssia, jota vastaava jännitys-amplitudi on esitetty taulukossa 5. Kuormitustaajuus oli 5 Hz.

#### 4.2.2.2 Tulokset

Näytteiden tavoitetila on esitetty taulukossa 4.2. Näytteissä toteutuneet kokeen aikaiset keskimääräiset tiheydet ja vesipitoisuudet on esitetty taulukossa 5. Myös näytteissä toteutunut jännitystila (sellipaine) ja kuormituspulssi on esitetty samassa taulukossa 4.3.

#### 4.2.2.3 Jäykkyysmoduulit

Koetuloksista laskettiin jokaiselle materiaalille jäykkyysmoduuli. Murskeelle määritettiin kolme moduulia, soralle yksi ja savelle kaksi. Savelle laskettiin kaksi arvoa yhdestä kokeesta, koska kuormituspulssin amplitudia kasvatettiin kesken kokeen. Tulokset on koottu taulukkoon 4.4. Taulukossa esitetyt arvot laskettiin 100 kuormitusyökin kohdalta. Muut arvot on esitetty kuvassa 4.2. Saven osalta ei aivan päästy tavoiteltuun leikkausjännityksen arvoon.

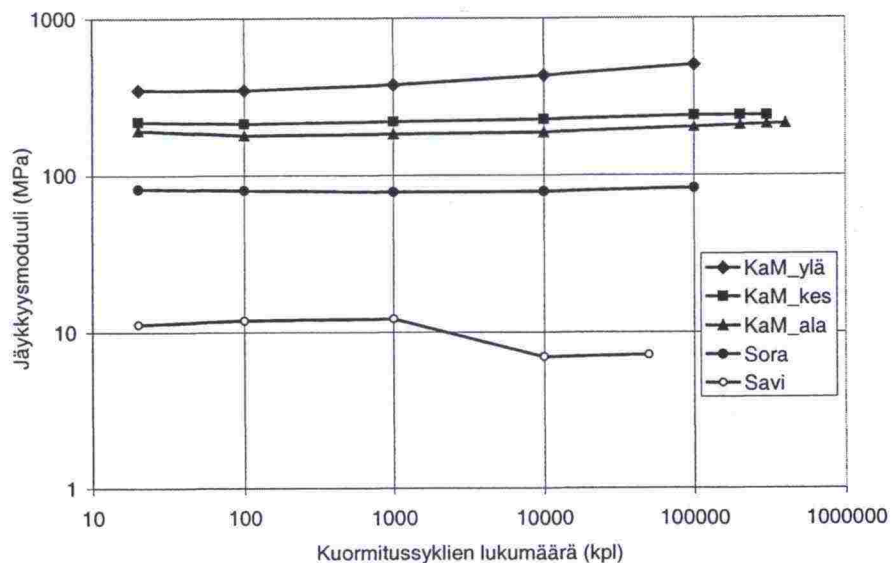


Taulukko 4.3. Kokeissa toteutuneet tilamuuttujat sekä jännitystilat.

Materiaali	Sellipaine (kPa)	Deviatorinen jännitys (kPa)	Tiheys / tilavuuspaino (g/cm <sup>3</sup> / kN/m <sup>3</sup> )	Vesipitoisuus (%)
Kalliomurske, yläosa	60.0	19 – 350	2.09/20.5	3.7
Kalliomurske, keskiosa	25.4	8.5 – 140	2.09/20.5	3.6
Kalliomurske, alaosa	15.6	6.0 – 80	2.11/20.7	3.6
Hiekkainen sora	10.7	4.2– 40	2.03/19.9	6.0
Laiha savi	18.3	9.0 – 14	1.46/14.4	32
Laiha savi	18.3	4.0 – 20	1.46/14.4	32

Taulukko 4.4. Jäykkyysmoduulit sekä kokeissa toteutuneet jännitys- ja muodonmuutosarvot 100. kuormitusyklin kohdalla.

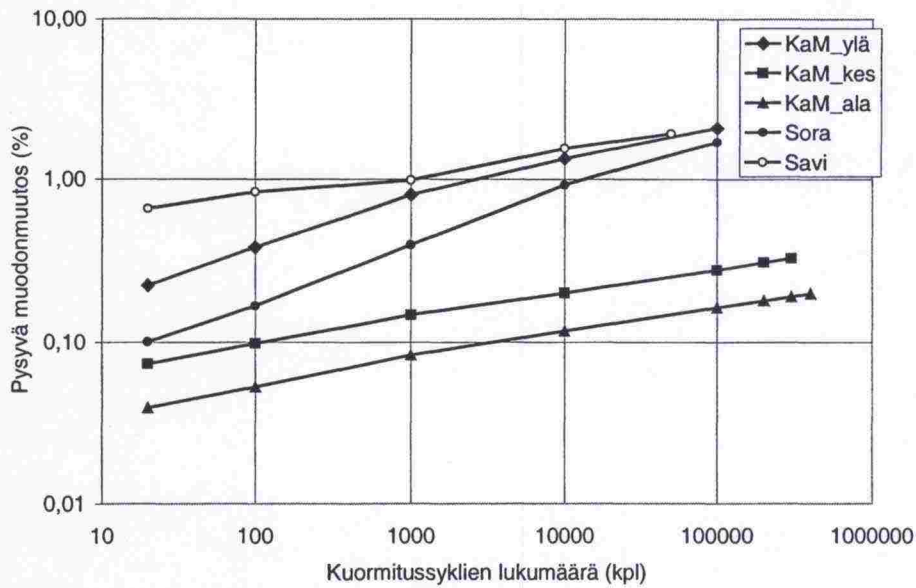
Materiaali	Jäykkyysmoduuli (MPa)	Deviatorinen jännitys (kPa)	Palautuva suhteellinen muod.muut. (-)	Palautumaton suhteellinen muod.muut. (-)
Kalliomurske, yläosa	349	18.9 – 350	0.00095	0.00384
Kalliomurske, keskiosa	213	8.2 – 140	0.00062	0.00098
Kalliomurske, alaosa	179	5.6 – 85	0.00044	0.00053
Hiekkainen sora	80	4.3 – 40	0.00044	0.01670
Laiha savi	11.7	9.0 – 14	0.00041	0.00839
Laiha savi (10000 sykliä)	7.0	4.2 - 19	0.00213	0.0155



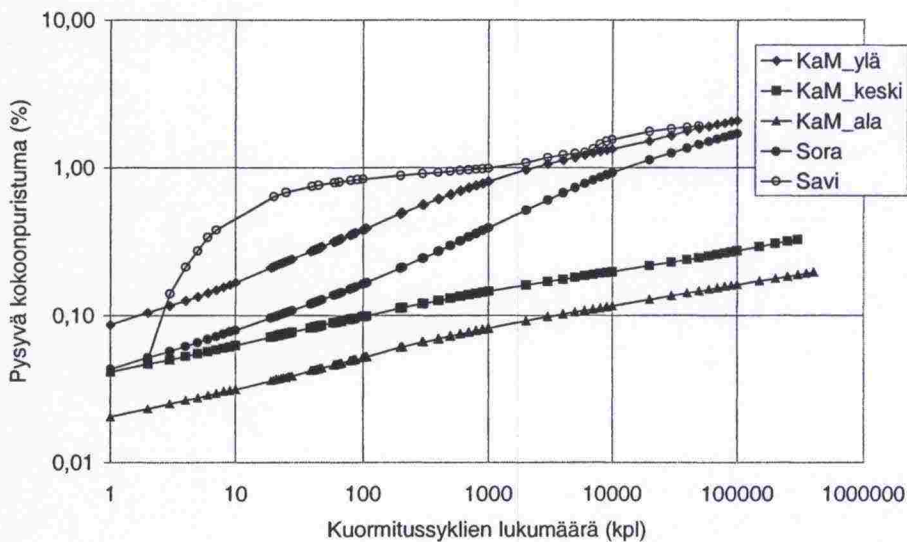
Kuva 4.2. Jäykkyysmoduulin arvot kuormituskertaluvun (sykkien) funktiona.

#### 4.2.2.4 Pysyvä muodonmuutos

Jokaiselle kokeelle määritettiin myös pysyvän muodonmuutoksen arvo syklien lukumäärän funktiona. Pysyvä muodonmuutos kaikkien kokeiden osalta on esitetty kuvassa 4.3 ja 4.4. Kuvassa 4.5 on vertailtu kallionmurskeen pysyvän ja palautuvan muodonmuutoksien suhdetta eri kuormitustasoilla ja kuormitusyyskeillä. Tuloksista on selvästi havaittavissa, että tietyn palautuvan muodonmuutoksen (jännitystilän) jälkeen pysyvien muodonmuutosten osuus kasvaa merkittävästi. Tässä kokeessa tämä kynnyisarvo on noin 0,055 % - 0,06 %.

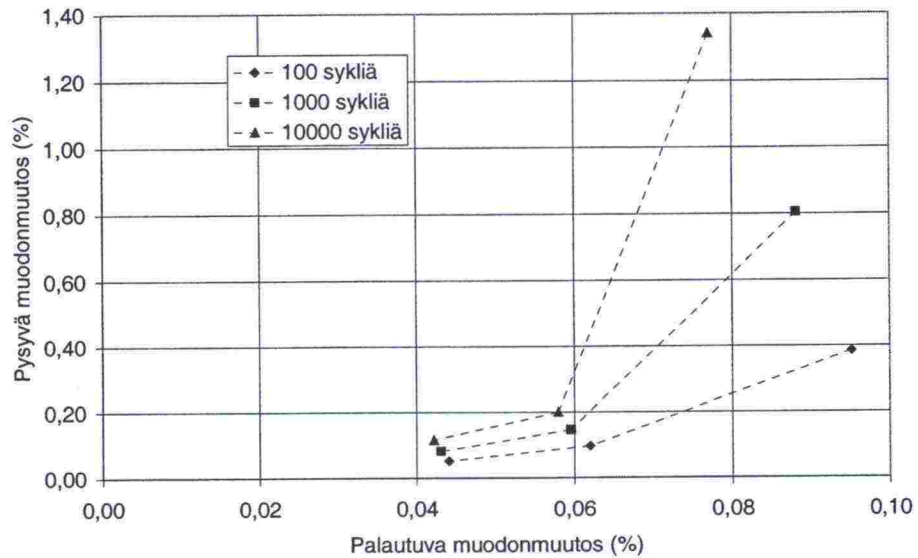


Kuva 4.3. Pysyvän muodonmuutoksen arvot moduulin määrittämissä pisteissä.



Kuva 4.4. Pysyvän muodonmuutoksen kehittyminen kokeissa kuormituskertojen johdosta.





Kuva 4.5. Kalliomurske: pysyvän ja palautumattoman muodonmuutoksen suhde.

### 4.3 Kuormitusohjelma

Kevytpäällystekokeen kaikki rakenteet kuormitettiin saman kuormitusohjelman mukaisesti (taulukko 4.5). Lisäksi luiskattuja rakenteita kuormitettiin lopuksi 50 kN kuormalla, kun vedenpinnantaso oli nostettu murskeen puolelleväliin. Rengaspaine kaikilla pyöräkuormilla oli 700 kPa. Kuormituksen ja instrumentoinnin keskilinjat (kl) sijaitsivat 700 mm päällysteen reunasta. Tulosten tulkinnessa sijainti 400 mm päällysteen reunasta vastaa sijaintia oikealle 300 mm keskilinjasta ja 1000 mm vasemmalle 300 mm (-300 mm).

Taulukko 4.5. Kuormitusohjelma.

Kaikki rakenteet			
Kuormitusten määrä	Pyöräkuorma (kN)	Vedenpinnantaso päällysteen pinnasta (mm)	Pyörän sivuttaisasema päällysteen reunasta (mm)
0 – 250	20	700	300 – 1100 (50 mm välein)
250 – 340	30	700	400, 700 ja 1000
340 – 430	40	700	400, 700 ja 1000
430 – 520	50	700	400, 700 ja 1000
520 – 5900	30	700	400, 700 ja 1000
5900 – 11300	40	700	400, 700 ja 1000
11300 – 14900	50	700	400, 700 ja 1000
14900 – 16700	50	450	400, 700 ja 1000
Luiskatut rakenteet lisäksi			
16700 – 18500	50	250	400, 700 ja 1000

## 5 MITTAUSTULOKSET

### 5.1 Huokospainemittaukset

Jokaisen kuormitusalueen huokospaineen kehittymistä seurattiin huokospaineantureilla, joita oli yksi loivaluiskaisella alueella ja kaksi muilla alueilla. Anturien kärjet sijaitsivat savisessa pohjamaassa vähintään 60 mm perusveitason alapuolella. Mittausten tulokset alueittain eriteltyinä on esitetty liitteessä 7. Kuvissa on nuolilla esitetty kuormitustasojen muutoskohdat, jotka erottuvat tuloksista selvästi. Jyrkkäluiskaisen rakenteen toisen anturin (kaksikomponenttiteotekstiilialueella) tulokset vaikuttavat epäluotettavilta.

### 5.2 Maanpainemittaukset

Maanpainemittauksin seurattiin saven ja soran yläpinnan maanpaineita. Jokaisessa mittauskohdassa oli 3 maanpainesellia. Mittaukset ovat näiden kolmen sellin keskiarvotuloksia.

Mittaustulokset on esitetty liitteessä 8 alueittain. Kuvissa on lisäksi esitetty pyöräkuorman suuruus. Maanpainemittausten tulokset tuntuvat luotettavilta ja ne vastaavat melko tarkasti kuormituksen muutoksia. Savikerroksen yläosan maanpaine suoraan kuormituksen alla vastaa melko tarkasti pyöräkuormaa ts. 30 kN kuormalla keskimääräinen maanpaine on 30 kPa. Sitä vastoin kuormituksen ollessa sivussa 300 mm painetasot laskevat noin 10 - 20 kPa:lla. Sorakerroksen maanpaineet ovat luonnollisesti suurempia kuin alempana savessa esiintyvät paineet noin 5 - 18 kPa:lla. Eri kuormitusalueiden välillä on vain pieniä eroja keskenään lukuun ottamatta jyrkkä luiskaisen rakenteen sorakerrosta, jossa on mitattu suhteellisesti suurimmat paineet. Sellit mittaavat kokonaispainetta eli raepaineen ja huokospaineen summaa. Erityisesti savikerroksen tuloksissa näkyy koestuksen loppuvaiheessa tehty vedenpinnan nosto.

### 5.3 Asfaltti

#### 5.3.1 Kiihtyvyyssanturit

Jokaisessa rakenteessa mitattiin kiihtyvyyssantureilla kuormitusalueen keskilinjan taipumaa asfaltin pinnasta. Liitteessä 9 on esitetty kiihtyvyyssanturitulokset eri koealueilta.

Eri alueilla mitatut pystysiirtymät kasvavat luiskan jyrkkyyden kasvaessa pyöräkuormilla 30 ja 40 kN. Suurimmalla pyöräkuormalla 50 kN ero luiskattomien ja luiskallisten rakenteiden välillä oli suuri.

Hetkellisen pystysiirtymän maksimiaron ero luiskattoman ja luiskallisten rakenteiden välillä on yli kaksinkertainen (1,9 mm:stä yli 4 mm:iin). Luiskan

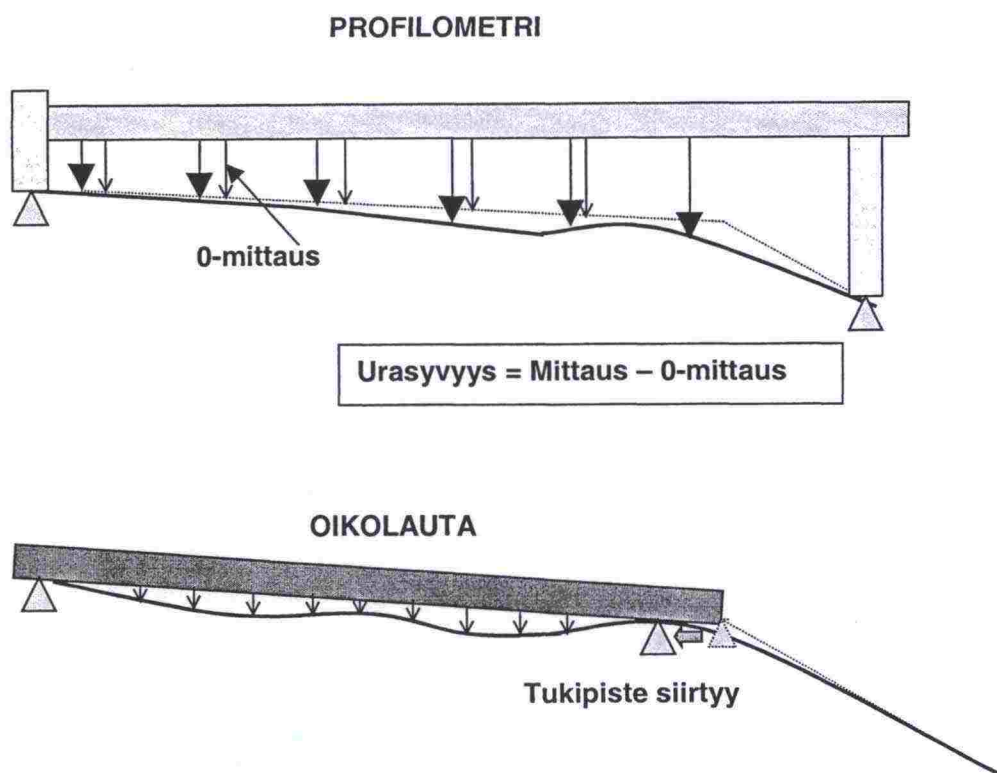


yrkkyydellä ei maksimiarvon suhteen ole merkitystä, sillä hetkelliset pystysiirtymät ovat lähes yhtä suuret 1:3 ja 1:1,5 luiskarakenteilla.

### 5.3.2 Profilometri ja oikolautamittaukset

Liitteessä 10 on esitetty eri alueiden oikolautamittausten tulokset. Mittauksissa käytetyn oikolaudan pituus oli 4 metriä. Oikolautamittaus on tehty joka alueen keskimmaisesta poikkisuuntaisesta vaaituslinjasta. Oikolautamittauksia ei suoraan voida verrata profilometrituloksiin, sillä oikolautamittaukset eivät edusta todellista urautumista. Oikolautamittauksissa perustaso muuttuu tukipisteiden 'siirtymien' suhteessa (kuva 5.1). Oikolautamittausten mukaan uran suurimmat syvyydet ovat noin 10 - 20 mm suurempia kuin profilometrillä.

Uran kehittymistä kuormituksen funktiona on mitattu myös laserprofilometrillä. Profilometrimittaukset aloitetaan 0-mittauksilla. Mittausväliksi voi vaihdella välillä 1 - 2 mm. Urautuminen saadaan mittaustuloksen ja 0-mittauksen erotuksesta (kuva 5.1). Profilometrimittaukset on tehty kultakin alueelta kolmelta vaaituslinjalta. Vaaituslinjat sijaitsevat pyörän kulkusuuntaan nähden poikkisuuntaisesti kahden metrin välein, siten että keskimmainen linja kulkee kuormitusalueen keskipisteen kautta. Uran keskimääräinen kehittyminen eri alueilla on esitetty liitteessä 10. Luiskattomalla alueella oli havaittavissa selvä urautumisnopeuden kasvu 9600 kuormituskerran jälkeen. Tällöin rakenteen vesipitoisuus kasvoi voimakkaiden sateiden vuoksi (kts. luku 8). Suurimmat uran kasvunopeudet on kaikissa rakenteissa havaittavissa vedenpinnan nostojen yhteydessä.



Kuva 5.1. Oikolauta- ja profilometrimittausten periaatteet.

### 5.3.3 Loadman mittaukset

Liitteessä 11 on esitetty eri alueiden Loadman mittausten tulokset koestuksen aikana rakenteen yläpinnasta. Loadman mittaus on kevyt pudotuspainolaitemittaus, jossa ainoastaan kuormituskohdan siirtymiä mitataan. Kuormitusalan säde on 150 mm. Loadman mittausten tulokset kertovat ainoastaan pintaosien kantavuuksista. Koealueella 3 testin jälkeisiä Loadman mittauksia ei voitu tehdä, koska rakenne oli voimakkaasti urautunut. Kaikilla alueilla oli havaittavissa rakenteen kantavuuden kasvua koestuksen alkuvaiheessa. Tämän tiivistymisvaiheen jälkeen kantavuusarvot pienenevät erityisesti 1:3 luiskarakenteella. Luiskattoman rakenteen osalta on havaittavissa 29.8.2001 mittauksissa, jossa kantavuudet ovat pudonneet kohonneen vesipitoisuuden vuoksi (rankkasateet).

### 5.4 Kantavan kerroksen murske

Murskekerroksen pysyvää ja hetkellistä muodonmuutosta seurattiin joka alueella olevilla EMU-coil-antureilla. Anturien välimatka kokeen alussa oli noin 200 mm. Anturien pysyvät ja hetkelliset kokoonpuristumamittauksien tulokset on esitetty liitteessä 12.

### 5.5 Jakava kerros, sora

Jakavan kerroksen staattista ja hetkellistä muodonmuutuskäyttäytymistä sekä jakavan ja kantavan kerroksien rajapintaa Emu-Coil-anturilla. Anturien välimatka kokeen alussa oli noin 200 mm. Mittausten tulokset on esitetty liitteessä 13.

### 5.6 Pohjamaa savi

Pohjamaan ylimmän 400 mm kerroksen staattista ja hetkellistä muodonmuutuskäyttäytymistä seurattiin neljällä Emu-Coil-anturilla, joista keskimääräinen oli vastaanotin ja muut lähettimiä. Antureiden välimatka kokeen alussa oli noin 200 mm. Mittausten tulokset on esitetty liitteessä 14.

### 5.7 Letkupainumamittaukset

Rakenteen pysyvää painumaa seurattiin letkupainumamittareilla (liite 15). Letkut jokaiselle kuormitusalueelle oli asennettu savi- ja sorakerroksien pintaan. Menetelmän käytön ongelmallisuutta ja tarkkuutta tullaan jatkossa tarkastelemaan 'Deformaatio'-hankkeen yhteydessä.

### 5.8 Sivusiirtymät

Päällysteen pinnan pysyviä sivusiirtymiä kaikilla alueilla seurattiin suhteessa mittanastan. Sivusiirtymäantureista seurattiin sekä pysyviä että hetkellisiä



vaakasiirtymiä murske- ja sorakerroksien puolivälissä molemmilla luiska-alueilla (liite 16).

## 5.9 Vauriokartoitukset

Päällysteen pinnan päältä tehtiin vauriokartoitukset heti ensimmäisten halkeamien ilmestyttyä. Sen jälkeen vauriot kartoitettiin jokaisen kuormitusvaiheen jälkeen. Vaurioista laadittiin kartat, joissa näkyy niiden ilmestymisajankohta sekä vastaava kuormitusluku. Luiskattomassa ja loivaluiskaisessa rakenteissa havaittiin vain joitakin pieniä vaurioita (lyhyitä, kapeita halkeamia). Sitä vastoin jyrkkäluiskaisen rakenteella havaittiin merkittäviä halkeamia, joista suurimmat syntyivät uran taakse. Liitteessä 17 on esitetty jyrkkäluiskaisen rakenteen vaurioitumiskuvia.

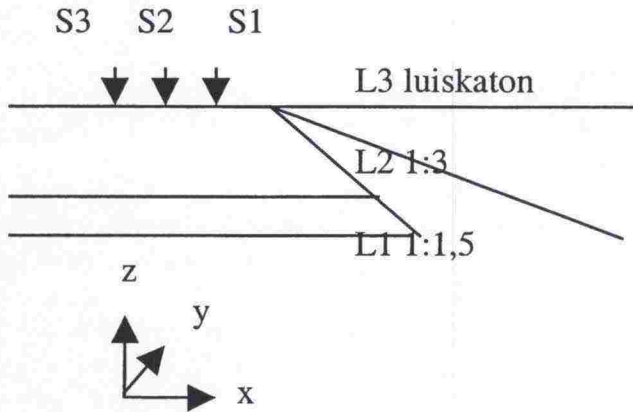
## 6 MALLINNUS

### 6.1 Tehtävän määrittäminen

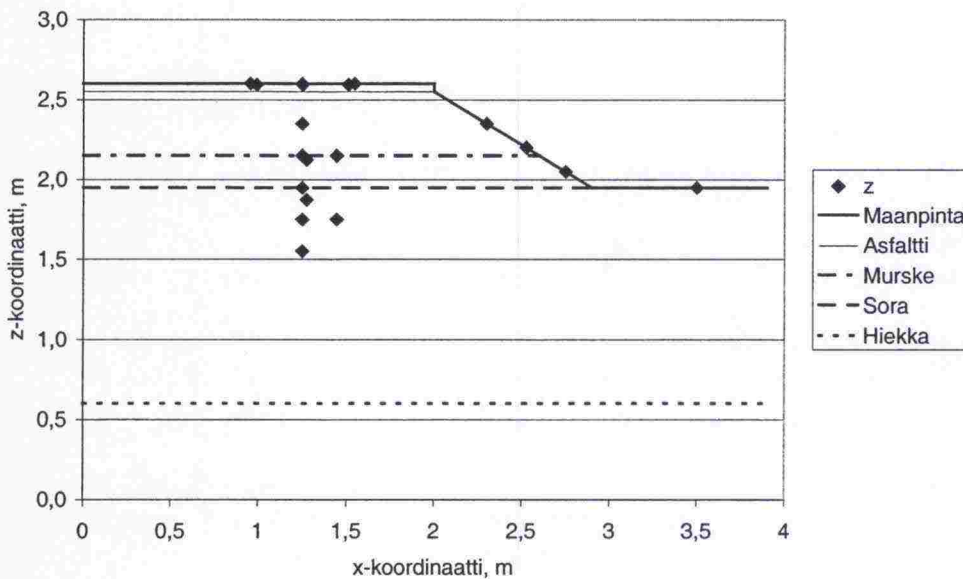
Koetiekoneen rakenteiden laskennallisten tarkasteluiden tarkoituksena oli selvittää alustavasti, kuinka hyvin laskennalliset tulokset vastaavat rakenteista mitattuja tuloksia. Laskennallisissa tarkasteluissa saatuja tuloksia on verrattu koetiekoneen rakenteiden mittauksista saatuihin "yhtä kuorman ylityskertaa" vastaaviin kuormitustuloksiin. Vertailusuureiksi valittiin kaikkiaan 11 eri mittaustulosta tai mittaustuloksista laskettua tulosta. Nämä olivat:

- Asfaltin yläpinnan siirtymä keskimmäisen kuormituspisteen kohdalla
- Kalliomurskeen alaosan suhteellinen kokoonpuristuma ja vaakavenymä
- Sorakerroksen suhteellinen kokoonpuristuma
- Saven yläosan suhteellinen kokoonpuristuma ja vaakavenymä
- Saven "keskiosan" suhteellinen kokoonpuristuma
- Luiskan vaakasiirtymä murskeen ja soran puolivälissä
- Lisäpystyännitys soran ja saven yläpinnassa.

Koetiekoneen kuormituksia simuloitiin laskelmissa kuormitusohjelmaa vastaten kaikkiaan yhteensä yhdeksällä laskennalla: kaikilla kolmella luiskan kaltevuudella (L1, luiska 1:1,5, L2, luiska 1:3 ja L3, luiskaton rakenne) sekä kolmella eri kuorman sijainnilla (S1, kuorma lähinnä luiskaa, S2, kuorma mittausturien pääsijainti-paikassa ja S3 kuorma kauimpana luiskalinjasta). Kukin laskenta sisälsi myös kaikki kolme koeohjelmassa käytettyä kuormitustasoa (pyöräkuorma 30 kN, 40 kN ja 50 kN). Kuvassa 6.1 on esitetty luiskien ja kuormitussijaintien nimeäminen. Kuvassa 6.2 on esitetty laskentaverkossa käytetyt, rakenteessa olevien antureiden sijaintia vastaavat seuranta-pisteet.



Kuva 6.1. Kuormituskohtien ja luiskien nimeäminen. Kuormien etäisyys mallin vasemmasta reunasta 0,95, 1,25 ja 1,55 m. Kuormien etäisyydet luiskalinjasta vastaavasti 1,05, 0,75 ja 0,45 m.



Kuva 6.2. Laskentaverkon seurantapisteiden sijainnit, jyrkkäluiskainen rakenne (vastaavat pääosin koerakenteen anturien sijaintia).

## 6.2 Tarkasteluissa käytetty laskentaohjelma ja laskennan kulku

Rakenteiden mallintaminen suoritettiin 3D-FLAC v. 2.00 -ohjelmalla. FLAC-ohjelmat ovat yhdysvaltalaisen Itasca Consulting Groupin maa- ja kalliorakenteiden analysointia varten kehittämiä differenssimenetelmään pohjautuvia laskentaohjelmia. Tavallisella FLAC-ohjelmalla voidaan mallintaa ainoastaan tasotapaustarkasteluja. 3D-FLAC:illä mallinnus voidaan tietyin edellytyksin suorittaa kolmiulotteisena. Ohjelmissa materiaaleja voidaan kuvata useilla eri materiaalmalleilla.

Tarkasteluissa käytetyt laskentaverkot on esitetty luiskan kaltevuuden 1:1,5 osalta liitteessä 18. Liitteiden kuvista ilmenevät myös rakenteiden rakenne-



kerrokset ja niiden jako elementtiriveihin. Rakenne on mallinnettu laskelmiin siten, että mallin maan pinnan leveys perusmaan pinnassa vastaa koetiekoneessa olevaa perusmaanpinnan leveyttä (leveys 3,9 m). Koetiekoneen kaukalon hienoista kaventumista pohjaa kohti ei ole mallinnettu laskentaverkkoon. Rakenteen pituussuunnassa on käytetty hyväksi symmetriaa, eli kuormitusalueesta on mallinnettu ainoastaan toinen puoli (mallin leveys kuvatasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa on 1,5 m). Eri etäisyyksillä luiskan reunasta tapahtuva kuormituksen mallintaminen on tehty siten, että laskentaverkon "kuormitusosa" on aina siirretty laskentaverkossa siihen paikkaan, jossa kuormitus todellisuudessaakin on vaikuttanut.

Laskentaverkot on tehty suhteellisen tiheiksi. Tämä mahdollistaa tarvittaessa eri kerrosten muodonmuutosominaisuuksien arvojen antamisen vieläkin tarkemmin esimerkiksi jännitystilasta riippuvana.

Koska mallinnuksessa on käytetty 3D-FLAC -ohjelmaa, on todellisuudessaakin lähes ympyränmuotoinen kuormituspinta ( $\phi = 36$  cm) voitu mallintaa laskelmissa saman suuruisena kuormituspintana.

Kussakin laskennassa perusmallille on ensin laskettu rakennekerrosten ja maapohjan materiaaliominaisuuksista sekä geometriasta aiheutuva alkujännitystilasta, josta aiheutuvat siirtymät on ennen seuraavan laskentavaiheen alkua nollattu. Seuraavassa laskentavaiheessa on asetettu pyöräkuorma. Pyöräkuormien laskentaportaat (30 kN, 40 kN ja 50 kN) laskettiin kukin vuorollaan tasapainoon, minkä jälkeen laskentatuloksista poimittiin tulosten vertailussa käytetyt suureet.

### 6.3 Materiaaliparametrit ja materiaalmallit

Eri materiaaleilla tarkasteluissa käytetyt materiaaliparametrien arvot on esitetty taulukossa 8. Tarkasteluissa asfalttikerros on kuvattu kimmoisena materiaalina ja maamateriaalit Mohr-Coulombin kimmo-plastiseen malliin pohjautuvana materiaalina.

Kalliomurskekerros on jaettu kolmeen osakerrokseen (ylimmän kerroksen paksuus 100 mm ja seuraavien kahden 150 mm). Näissä osakerroksissa on käytetty moduulina suoraan materiaalille laboratoriokokeissa (alustavissa selvityksissä määritettyjen jännitysten perusteella) määritettyä moduulia. Myös soran ja saven moduulina on käytetty suoraan laboratoriokokeissa määritettyä moduulia. Materiaalien lujuusominaisuuksia laboratoriossa ei määritetty ennen laskentaa. Asfaltin jäykkyys on arvioitu.

Pohjavedenpintaa tai materiaaleissa kehittyvää huokospainetta ei ole laskelmissa mallinnettu. Kuormituksen lyhytaikaisuus on huomioitu saven muodonmuutosominaisuuksissa.

Taulukossa 6.1 esitetyillä moduularvoilla laskettiin läpi koko kuormitusohjelma. Luiskan kaltevuudella 1:3 ja anturien pääsijaintikohdassa sijaitsevalla kuormituksella (S2) laskettiin lisäksi läpi rakenne, jossa kantavan kerroksen osakerrosten moduulina käytettiin laskennassa saadun arvion perusteella pääjännityssumman funktiona (laboratoriokokeiden perusteella määritetty funktio) ko. materiaalille määräytyvää moduulia. Kalliomurskeen osakerros-

ten moduulit olivat tällöin 245 MPa, 192 MPa ja 135 MPa. Muiden materiaalien arvot olivat samat kuin edellä.

Taulukko 6.1. Tarkasteluissa eri materiaaleilla käytetyt materiaaliominaisuudet.

Materiaali	Tilavuus- paino $\gamma$	Moduuli E	Poissonin Luku $\nu$	Kitkakulma / dilataatio $\phi / (\psi)$	Koheesio c	Tilavuus- moduuli K	Leikkaus- moduuli G
	kg/m <sup>3</sup>	kPa	-	°	kPa	Pa	Pa
Asfaltti, AB	2400	2000	0.35	-	-	2.22*10 <sup>9</sup>	7.41*10 <sup>8</sup>
Kantava 1, KaM	2000	349	0.30	38 (8)	5	2.91*10 <sup>8</sup>	1.34*10 <sup>8</sup>
Kantava 2, KaM	2000	194	0.30	38 (8)	5	1.78*10 <sup>8</sup>	8.19*10 <sup>7</sup>
Kantava 3, KaM	2000	125	0.30	38 (8)	5	1.49*10 <sup>8</sup>	6.88*10 <sup>7</sup>
Jakava, Sr	1900	80	0.35	33 (1)	5	8.89*10 <sup>7</sup>	2.96*10 <sup>7</sup>
Pohjamaa, Sa	1800	7	0.45	5 (0)	30	2.33*10 <sup>7</sup>	2.41*10 <sup>6</sup>
Pohjahiekka	1900	60	0.35	34 (4)	5	6.67*10 <sup>7</sup>	2.22*10 <sup>7</sup>

#### 6.4 Laskentojen tulokset

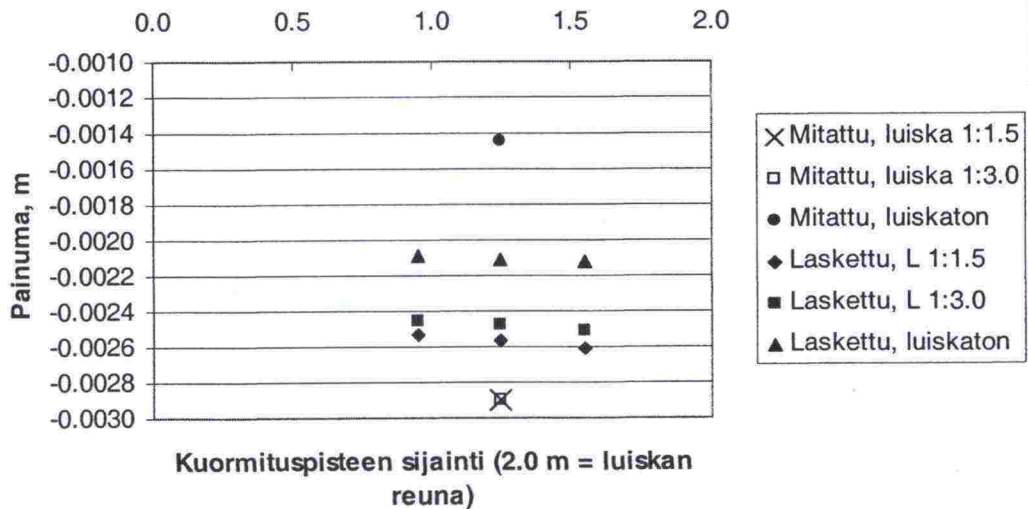
Suoritettujen tarkastelujen tulokset kaikissa yhdeksässä laskentatapauksessa vertailutarkasteluun valittujen mittaustulosten suhteen on esitetty taulukossa 6.2 pyöräkuorman suuruuden ollessa 50 kN. Asfaltin yläpinnan laskettu painuma kuormituksen sijainnin funktiona on esitetty myös kuvassa 6.3 yhdessä mitattujen painumien kanssa. Esimerkin omaisesti on liitteessä 18 (kuormitus lähinnä luiskaa, luiska 1:1.5) esitetty lisäksi koko rakenteen pinnan siirtymien tasa-arvokäyrät sekä rakenteen elementtien tilan kuvaajat kuormituslinjalla.

Taulukko 6.2. Laskentojen tulokset pyöräkuormalla 50 kN. (Huomaa, että anturit ja seurantapisteen sijaitsevat kuormituksen S2 linjalla tai ainakin hyvin lähellä sitä - eivät siis välttämättä kuormituksen alla; näissä laskentatuloksissa ainoastaan rivillä 1 olevat tulokset ovat aina kuormituspisteessä.)

Kuorm. sijainti / Luiska Tulos	S1	S1	S1	S2	S2	S2	S3	S3	S3
	1:1.5	1:3	1:∞	1:1.5	1:3	1:∞	1:1.5	1:3	1:∞
1	-0.00261	-0.00251	-0.00212	-0.00257	-0.00248	-0.00211	-0.00253	-0.00245	-0.00209
2	-3.78E-05	-7.22E-06	-9.57E-05	-2.10E-03	-1.87E-03	-1.24E-03	-2.25E-04	-2.06E-04	-5.73E-05
3	3.94E-04	3.53E-04	2.37E-04	1.67E-03	1.46E-03	9.69E-04	-1.95E-04	-2.05E-04	-1.73E-04
4	-9.52E-04	-8.86E-04	-5.26E-04	-2.23E-03	-2.17E-03	-1.80E-03	-5.95E-04	-5.74E-04	-5.09E-04
5	-1.30E-03	-1.25E-03	-1.03E-03	-2.04E-03	-2.01E-03	-1.85E-03	-1.38E-03	-1.33E-03	-1.00E-03
6	7.62E-04	6.93E-04	5.27E-04	9.07E-04	8.45E-04	6.51E-04	7.90E-04	7.22E-04	4.15E-04
7	-9.73E-04	-9.39E-04	-8.08E-04	-1.26E-03	-1.21E-03	-1.02E-03	-1.12E-03	-1.07E-03	-8.27E-04
8	0.00032	0.00021		0.00031	0.00025		0.00029	0.00025	
9	0.00061	0.00037		0.00057	0.00035		0.00051	0.00031	
10	-15.9	-15.5	-15.5	-77.6	-77.1	-74.6	-17.0	-16.9	-17.3
11	-9.3	-9.1	-9.3	-21.9	-23.2	-23.8	-10.9	-10.7	-9.6



Tulos	Selite
1	AB yläpinnan siirtymä kuormituspisteen kohdalla, m
2	Kalliomurskeen alaosan suhteellinen kokoonpuristuma, -
3	Kalliomurskeen alaosan suhteellinen vaakavenymä, -
4	Soran suhteellinen kokoonpuristuma, -
5	Saven yläosan suhteellinen kokoonpuristuma, -
6	Saven yläosan suhteellinen vaakavenymä, -
7	Saven "keskiosan" suhteellinen kokoonpuristuma, -
8	Luiskan vaakasiirtymä murskeen puolivälissä, m
9	Luiskan vaakasiirtymä soran puolivälissä, m
10	Lisäpystyjännitys soran yläpinnassa, kPa
11	Lisäpystyjännitys saven yläpinnassa, kPa



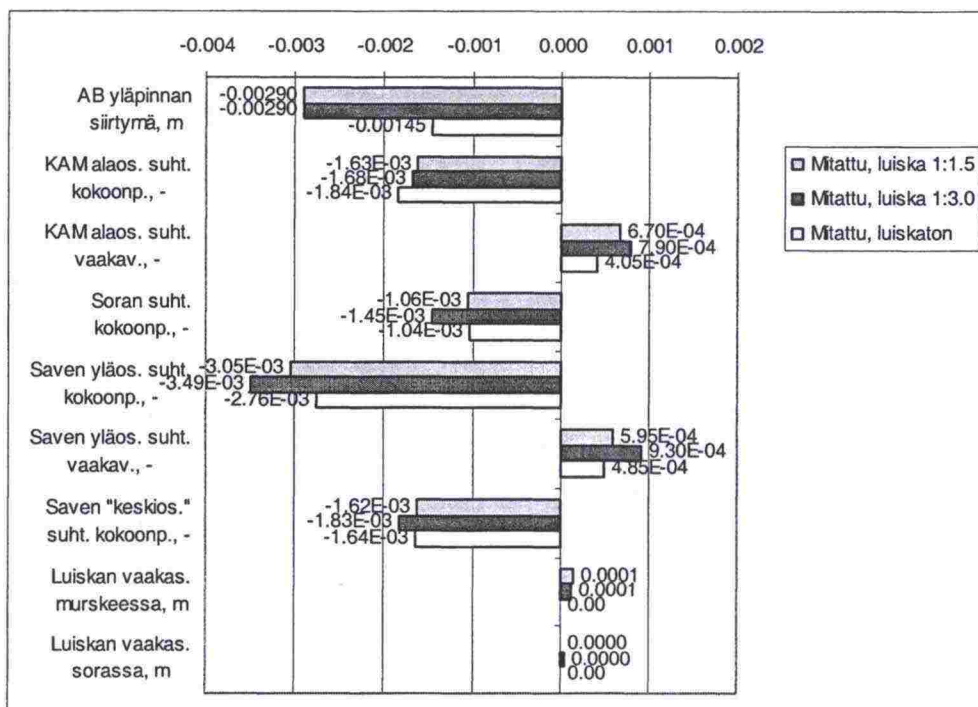
Kuva 6.3. Asfaltin yläpinnan painuma kuormituksen sijainnin funktiona eri luiskan kaltevuuksilla (kuormitus 50 kN). Kuvassa on esitetty myös mitatut painumat, kun kuormitus on ollut anturilinjalla.

### 6.5 Tulosten vertailu rakenteissa havaittuihin muodonmuutoksiin ja jännityksiin

Laskennallisissa tarkasteluissa saatuja tuloksia on verrattu rakenteissa mitattuihin tuloksiin. Tuloksia tarkasteltaessa on muistettava, että laskennallinen tarkastelu kuvaa yhden pyörän ylityksen aiheuttamia rasituksia. Vertailussa käytetyt koetiekoneella saadut tulokset on myös pyritty valitsemaan mahdollisimman aikaisesta kuormitusvaiheesta ennen kuin rakenteesta on ehtinyt tapahtua esimerkiksi tiivistymistä tai muita muutoksia. Joissain tapauksissa tämä ei kuitenkaan aina onnistunut. Todellisesta rakenteesta saadut tulokset on poimittu yleensä 1...3 yksittäisen pyörän ylityskerran vaikutusta kuvaavana keskimääräisenä suuruusluokkatietona. Tulokset eivät ole välttämättä samoilla pyörän ylityskerroilla (tai edes yhtä suurilla ylityskerramäärillä) saatuja tuloksia.

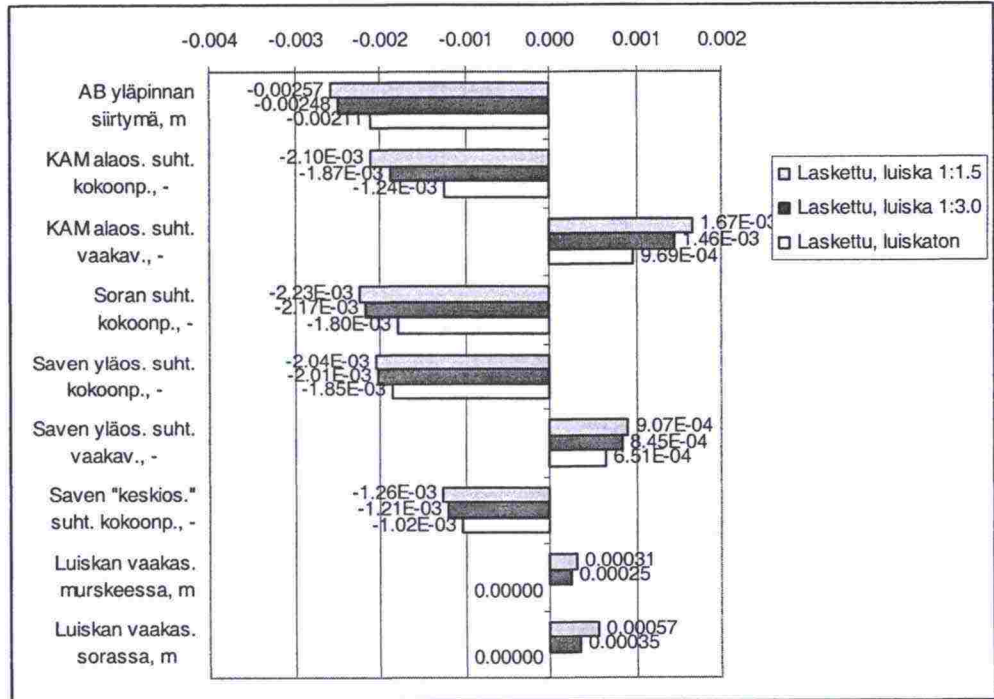
Koerakenteista saadut, vertailussa käytetyt päätulokset eri luiskan kaltevuuksilla siirtymien ja muodonmuutosten osalta on esitetty kuvassa 6.4. Vastaavat laskennassa saadut päätulokset on esitetty kuvassa 6.5. Sorakeroksessa ja perusmaan (saven) yläpinnassa mitatut jännitykset puolestaan on esitetty kuvassa 6.6 ja vastaavat laskennassa saadut arvot kuvassa 6.7.

Kuvassa 6.8 on esitetty luiskan kaltevuudella 1:3 rakenteista saadut päätulokset eri kuormitusportaiden kuormituksilla (30, 40 ja 50 kN) siirtymien ja muodonmuutosten osalta. Vastaavat laskennassa saadut päätulokset on esitetty kuvassa 6.9. Kuvissa 6.10 ja 6.11 on puolestaan esitetty vastaavasti mitatut ja lasketut jännitykset sorakeroksessa ja perusmaan yläpinnassa.

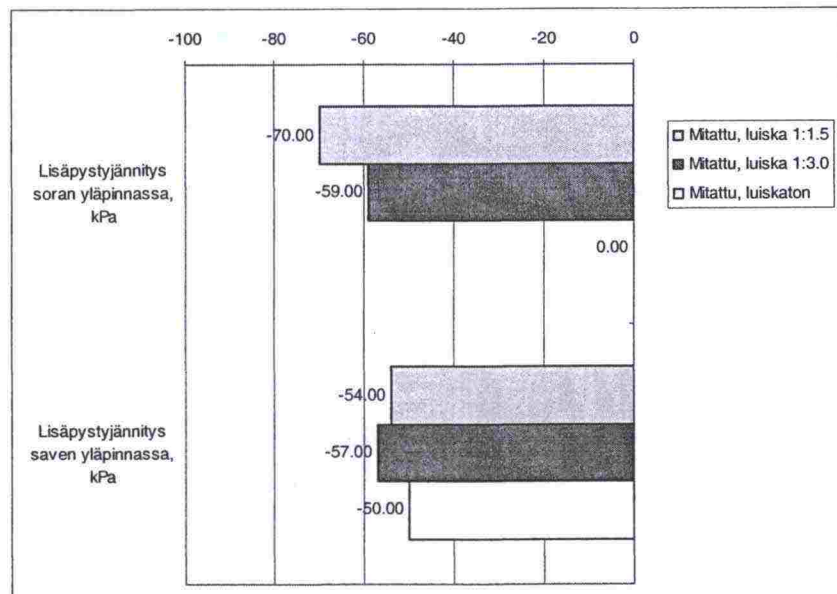


Kuva 6.4. Rakenteista mitatut päätulokset eri luiskan kaltevuuksilla. Siirtymät ja muodonmuutokset.

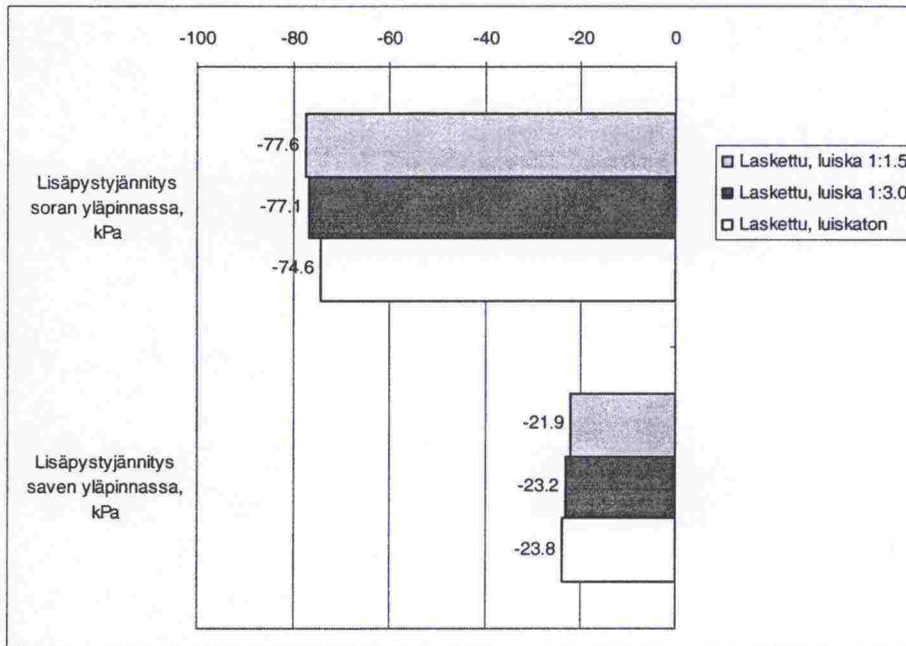




Kuva 6.5. Lasketut päätulokset eri luiskan kaltevuuksilla. Siirtymät ja muodonmuutokset.



Kuva 6.6. Rakenteista mitatut päätulokset eri luiskan kaltevuuksilla. Jännitykset.



Kuva 6.7. Lasketut päätulokset eri luiskan kaltevuuksilla. Jännitykset.

Kuvien 6.4 ja 6.5 vertaamisen yhtenä johtopäätöksenä on se, että todellisessa rakenteessa kuormituksen aikana tapahtuu tiivistymistä pintakerrostumisessa (lähinnä KaM). Tämä eliminoi osaltaan vaakamuodonmuutosten syntyä rakennekerroksissa ja luiskissa.

Eri luiskan kaltevuuksilla mitattuja ja laskettuja tuloksia erikseen tarkasteltaessa (kuvat 6.6 ja 6.7) huomiota kiinnittää se, että mitatuissa tuloksissa on havaittavissa melko suurta "hajontaa". Mitatut tulokset eivät näytä käyttäytyvän täysin johdonmukaisilta luiskan kaltevuuden suhteen. Monissa tapauksissa luiskan kaltevuudella 1:1.5 saadut tulokset ovat lähempänä luiskattomalla rakenteella saatuja tuloksia kuin luiskan kaltevuudella 1:3 saatuja tuloksia. Tämä saattaa osin johtua juuri edellä mainitusta tulosten poimintavastakin, mutta pääasiallisena syynä lienee rakenteiden epätasainen laatu. Loivaluiskaisen rakenteen päällyste oli selvästi ohuempi kuin muilla rakenteilla, lisäksi sen muidenkin kerrosten tiiviyydet ja kantavuudet ovat vertailurakenteita alhaisempia. Lasketuilla rakenteilla tulokset näyttävät käyttäytyvän loogisemmin siten, että siirtymät ja muodonmuutokset pienenevät siirryttäessä jyrkimmän luiskan omaavasta rakenteesta luiskattomaan rakenteeseen.

Yleisesti mitattuja ja laskettuja tuloksia eri luiskan kaltevuuksilla tarkastellessa voidaan todeta, että

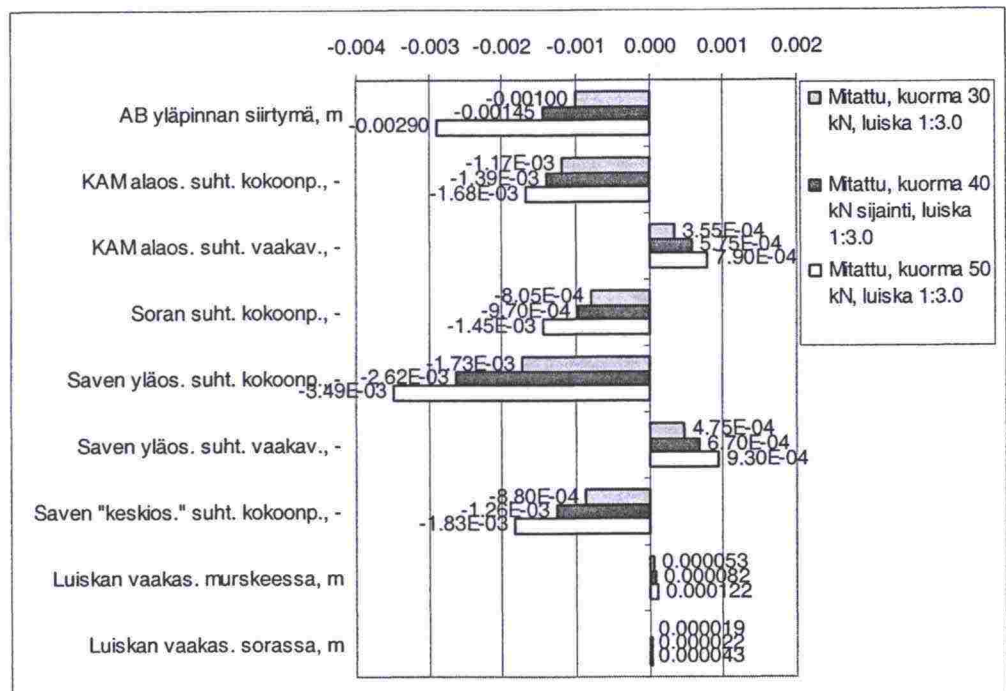
- lasketut asfaltin yläpinnan siirtymät (hetkelliset painumat) vastasivat mitattuja siirtymiä kohtuullisesti (erot -15 %...+45 %)
- lasketut kalliomurskeen alaosan suhteelliset kokoonpuristumat vastasivat mitattuja suhteellisia kokoonpuristumia kohtuullisesti (erot -29 %...+32 %)
- lasketut kalliomurskeen alaosan suhteelliset vaakavenymät olivat havaittuja suuremmat (ero +85...+149 %)
- lasketut soran suhteelliset kokoonpuristumat olivat havaittuja suuremmat (ero +50...+112 %)



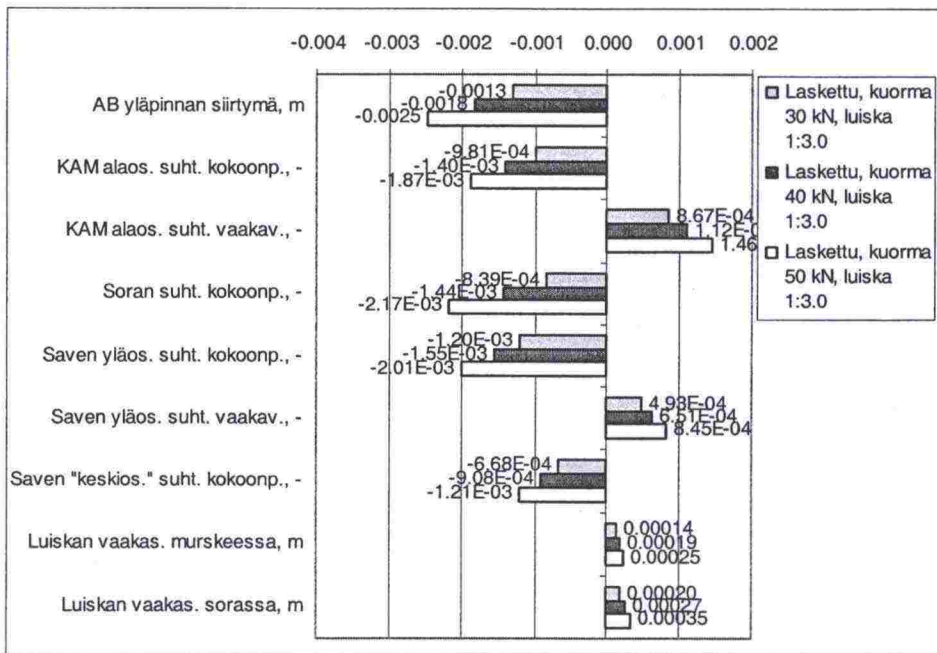
- lasketut saven yläosan suhteelliset kokoonpuristumat jäivät havaittuja pienemmäksi (ero -33...-42 %)
- lasketut saven yläosan suhteelliset vaakavenymät vastasivat kohtuudella mitattuja venymiä (ero -9...+53 %)
- laskettu saven "keskiosan" suhteellinen kokoonpuristuma jäi mitattua pienemmäksi (ero -22...-38 %)
- lasketut luiskan vaakasiirtymät vastasivat huonosti rakenteesta mitattuja siirtymiä (erot murskeessa +103...+120 % ja sorassa +723 % (vain 1:3 luiska))

Eri luiskan kaltevuuksilla mitattuja ja laskettuja jännityksiä tarkasteltaessa (kuvat 6.8 ja 6.9) voidaan havaita, että laskennassa soran yläpinnassa saadut lisäjännitykset vastaavat melko hyvin mitattuja jännityksiä erojen ollessa 11...31 % suuruusluokkaa. Sen sijaan saven yläpintaan laskennassa saadut lisäjännitykset ovat huomattavasti pienemmät kuin mitä rakenteessa on mitattu (ero -52...-59 %). Näiden erojen pohjalta on ainakin selitettävissä laskettujen saven suhteellisten kokoonpuristumien jääminen mitattuja pienemmiksi. Eräänä mahdollisena selityksenä voi olla se, että murskekerroksen lujuus on laskennassa yliarvioitu. Mikäli suhteellisen löyhässä murskeessa tapahtuu 'läpileikkautumistyyppinen' murtuminen rakennekerrosten kyky jakaa jännityksiä alusrakenteelle heikkenee nopeasti.

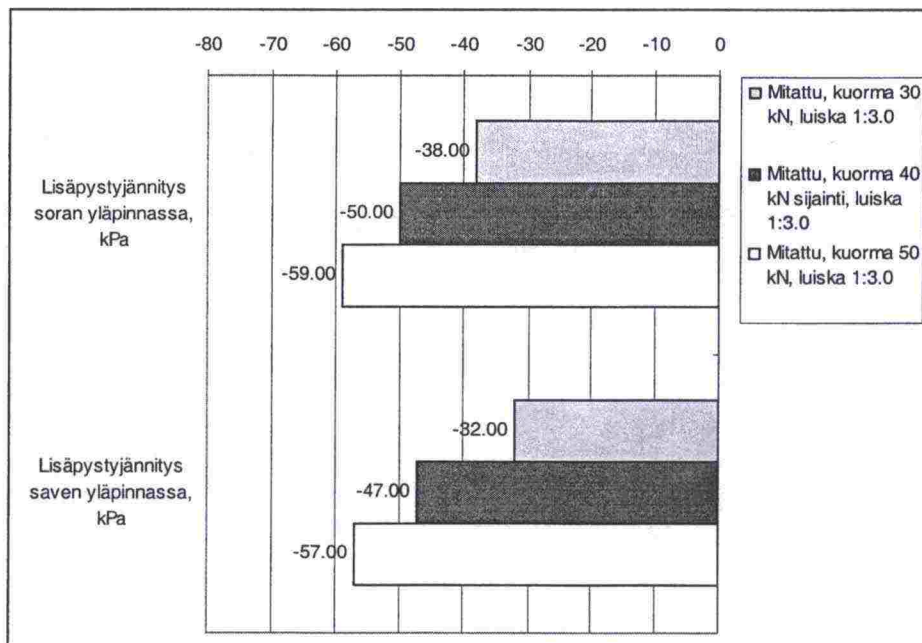
Mitattujen ja laskettujen tulosten osalta määritettiin siirtymien (lukuun ottamatta luiskasta mitattuja vaakasiirtymiä) ja muodonmuutosten korrelaatiokertoimet. Paras korrelaatiokerroin oli luiskan kaltevuuskulmalla 1:3, jolla se oli 0.91. Luiskan kaltevuudella 1:1.5 korrelaatio oli 0.89 ja luiskattomalla rakenteella 0.85.



Kuva 6.8. Rakenteista mitatut päätulokset eri kuormitusportailta luiskan kaltevuuden ollessa 1:3. Siirtymät ja muodonmuutokset.

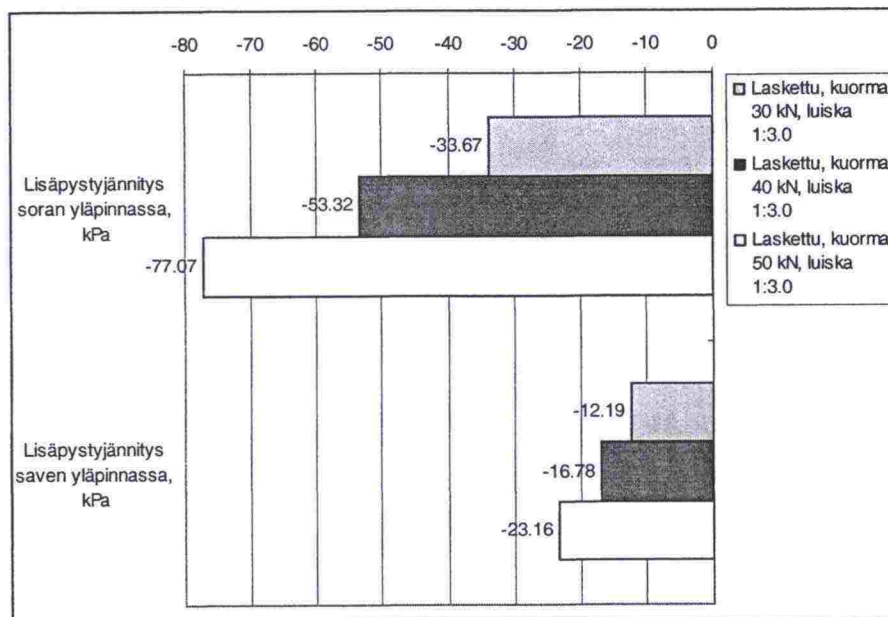


Kuva 6.9. Lasketut päätulokset eri kuormitusportailta luiskan kaltevuuden ollessa 1:3. Siirtymät ja muodonmuutokset.



Kuva 6.10. Rakenteista mitatut päätulokset eri kuormitusportailta luiskan kaltevuuden ollessa 1:3. Jännitykset.





Kuva 6.11. Lasketut päätulokset eri kuormitusportailta luiskan kaltevuuden ollessa 1:3. Jännitykset.

Luiskan kaltevuudella 1:3 suoritettiin mitattujen ja laskettujen tulosten vertailu myös kuormitusportarraskohtaisesti (30, 40 ja 50 kN; kuvat 6.10 ja 6.11). Sekä mitatut että lasketut tulokset näyttävät nyt käyttäytyvän johdonmukaisesti kuormituksen kasvaessa. Mitatuissa tuloksissa huomiota kiinnittää asfaltin yläpinnan painuman kaksinkertaistuminen kuorman lisääntyessä 40 kN:sta 50 kN:iin. Muissa mitatuissa tuloksissa tämä näkyy ehkä hienoisena "ylimääräisenä" kasvuna myös soran ja saven "keskiosan" suhteellisessa kokoonpuristumisissa. Lasketut ja mitatut painumat näyttävät kehittyvän eri kulmakertoimella: lasketut painumat ovat kahdella pienimmällä kuormitusportalla hieman mitattuja suuremmat, mutta suurimmalla kuormitusportalla lasketut painumat jäävät jo mitattuja pienemmiksi.

Yleisesti mitattuja ja laskettuja tuloksia eri luiskan kaltevuuksilla tarkastellessa voidaan todeta, että

- lasketut asfaltin yläpinnan siirtymät (painumat) vastaavat mitattuja siirtymiä kohtuullisesti (erot -15 %...+30 %)
- lasketut kalliomurskeen alaosan suhteelliset kokoonpuristumat vastasivat mitattuja suhteellisia kokoonpuristumia jopa hyvin (erot -16 %...+11 %)
- lasketut kalliomurskeen alaosan suhteelliset vaakavenymät olivat havaittuja suuremmat (ero +85...+144 %)
- lasketut soran suhteelliset kokoonpuristumat olivat havaittuja suuremmat (ero +4...+50 %)
- lasketut saven yläosan suhteelliset kokoonpuristumat jäivät havaittuja pienemmäksi (ero -30...-42 %)
- lasketut saven yläosan suhteelliset vaakavenymät vastasivat kohtuudella mitattuja venymiä (-9...+4 %)
- laskettu saven "keskiosan" suhteellinen kokoonpuristuma jäi mitattua pienemmäksi (ero -24...-34 %)

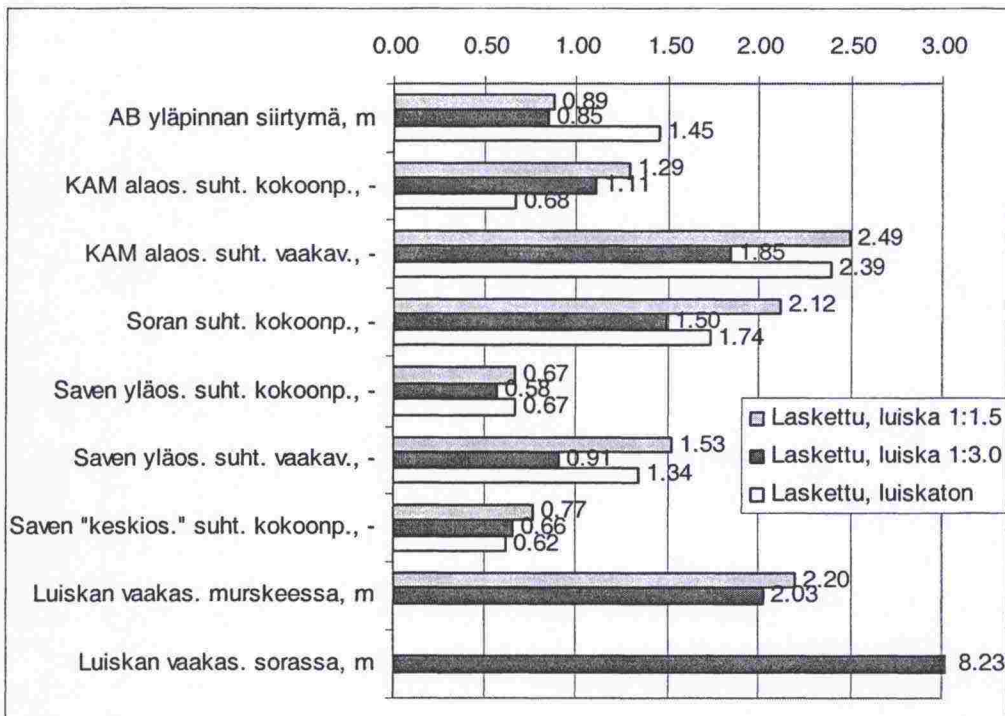
- lasketut luiskan vaakasiirtymät vastasivat huonosti rakenteesta mitattuja siirtymiä (erot murskeessa +102...+162 % ja sorassa +723...+1130 %)

Eri luiskan kaltevuuksilla mitattuja ja laskettuja jännityksiä tarkasteltaessa (kuvat 6.12 ja 6.13) voidaan havaita, että laskennassa soran yläpinnassa saadut lisäjännitykset vastaavat melko hyvin, etenkin kahdella pienimmällä kuormitusportaalla, mitattuja jännityksiä, erojen ollessa -11...+6 % suuruusluokkaa. Sen sijaan suurimmalla kuormitusportaalla laskennallinen jännitys ylitti mitatun jännityksen suuremmin eron ollessa +31 %. Saven yläpintaan laskennassa saadut lisäjännitykset olivat tässäkin tarkastelussa huomattavasti pienemmät kuin mitä rakenteessa oli mitattu (ero -59...-64 %).

Mitattujen ja laskettujen tulosten osalta on määritettiin siirtymien (lukuun ottamatta luiskasta mitattuja vaakasiirtymiä) ja muodonmuutosten korrelaatiokertoimet. Paras korrelaatiokerroin oli kuormituksen ollessa pienimmillään (30 kN) 0.92. Muilla kuormitusportaimilla korrelaatiokertoimet olivat 0.85 (40 kN) ja 0.87 (50 kN).

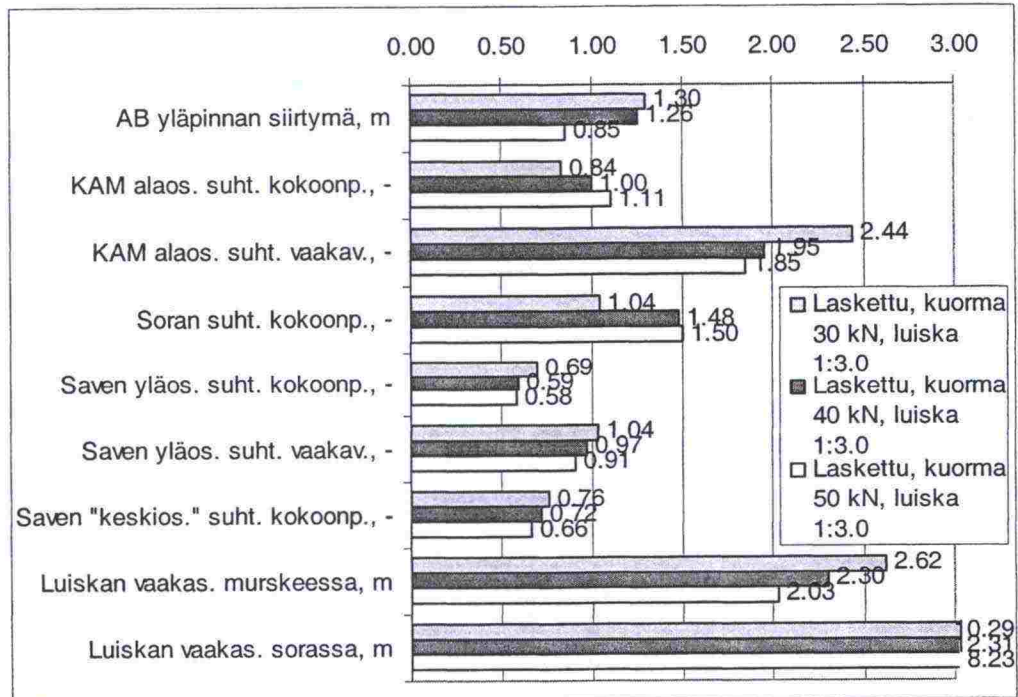
Kantavan kerroksen muodonmuutosmoduulin muuttaminen laskettua jännitystilaa paremmin vastaavaksi ei juurikaan vaikuttanut tuloksiin. Kantavan kerroksen modifioituilla parametreilla saatujen tulosten vertailukuvat on esitetty liitteessä 19.

Yhteenvetona on kuvissa 6.12 ja 6.13 esitetty lasketut päätulokset siirtymien ja muodonmuutosten osalta normalisoituina koerakenteista mitattujen tulosten suhteen. Mitä lähempänä ykköstä lukema näissä on, sitä paremmin laskennassa saatu tulos vastaa koerakeessa mitattua tulosta.



Kuva 6.12. Mittaustulosten suhteen normalisoidut laskentatulokset eri luiskan kaltevuuksilla (kuorma 50 kN).





Kuva 6.13. Mittaustulosten suhteen normalisoidut laskentatulokset luiskan kaltevuudella 1:3 (kuormat 30, 40 ja 50 kN).

## 6.6 Mallinnuksen johtopäätökset ja jatkoselvitystarpeet

Suoritettujen tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että koerakenteissa kuormitusvaiheessa tapahtuvia muodonmuutoksia ja jännityksiä voidaan kohtuullisesti arvioida melko karkeillakin lähtöarvoilla ja malleilla. Vaikka prosentuaaliset erot tarkasteluun valituissa päätuloksissa osin ovatkin suuria, voidaan kuvista 6.8, 6.9, 6.12 ja 6.13 havaita laskettujen päätulosten suuruusluokan suurelta osin vastaavan mitattuja tuloksia. Suurimmat poikkeamat näyttäivät liittyvän kalliomurskeen alaosan vaakavenymään, sorakeroksen suhteelliseen kokoonpuristumaan ja saven kokoonpuristumaan. Saven kokoonpuristumisen jääminen laskennallisessa tarkastelussa havaittua pienemmäksi on selitettävissä ainakin osittain laskennassa savelle saaduilla, mitattuja huomattavasti pienemmällä jännityksillä. Yleisesti tarkasteltuna näyttää siltä, että laskennallisissa tarkastelussa asfaltin siirtymät ja kalliomurskeen osuuden mallinnus on onnistunut hyvin, mutta laskennassa sorakerros näyttää keränneen itseensä suuremmat muodonmuutokset kuin todellisessa koerakenteessa. Todellisessa koerakenteessa savikerros näyttää puolestaan keränneen jännityksiä ja sitä kautta muodonmuutoksia. Yleisesti voidaan todeta, etteivät deformoituvan rakenteen murtumismekanismit laskennassa ja todellisessa, testatussa rakenteessa vastaa toisiaan. Miltä osin malli ei vastaa todellisuutta edellyttäisi jälkianalyysijä.

Tämän tarkastelun yhteydessä ei suoritettu sellaisia parametritutkimuksia, joissa parametrien arvoja muuttamalla olisi yritetty saada mittaustuloksia paremmin vastaavia tuloksia. Koska mahdollisia varioitavia muuttujia on runsaasti, lienee parasta ennen parametritutkimuksia tarkentaa nykyisiä lähtötietoja etenkin materiaalien lujuusominaisuuksien osalta laboratoriomäärittely-

siin perustuviksi sekä sisällyttää laskentamalliin myös pohjaveden vaikutus. Vasta tämän jälkeen on parametrien herkkyystarkastelujen suorittaminen mielekästä. Näiden tarkastelujen jälkeen mallintamista on mahdollista tarkentaa esimerkiksi myötölujittuvien / -pehmenevien materiaalmallien ja tarkennettujen jäykkyysien jännitystilariippuvuuksien suhteen.

## 6.7 Tutkimusaltaan vaikutus rakenteiden muodonmuutoksiin

Ennen testauksen aloittamista tehtiin esitutkimus, missä tutkittiin Plaxis-elementtiohjelmalla tutkimusaltaan vaikutusta muodonmuutosten suuruuteen /Kangas & Törnqvist 2001/. Altaan vaikutusta tutkittiin kahdella eri laskelmalla: ensimmäinen, jossa oli mukana tutkimusallas sekä toinen laskelma, jossa oli mallinnettu leveämpää poikkileikkausta. Laskelmien perusteella sekä siirtymät että murtokuormat allasrakenteessa olivat pienempiä kuin vastaavassa leveämmässä poikkileikkauksessa. Murtokuorman osalta erot olivat luokkaa -12...-33 %, vaakasuuntaisten siirtymien osalta -4...-7 % ja pystysuuntaisten siirtymien osalta -12...-15 %. Murtokuorman osalta hajonta oli melko suurta, mutta siirtymien osalta se oli pienempää.

## 7 TULOSTEN TARKASTELU

### 7.1 Rakentamisen laatu

Koerakenteiden suunnittelun pohjana oli mitoittaa rakenne sellaiseksi, että se vastaa alemman luokan tierakennetta. Varsinaisesti rakenne mitoitettiin monikerrosohjelmalla kuormituskestävyydeltään sellaiseksi, että kohtuullisilla kuormitusten määrillä (noin 15 000 ylitystä) rakenne saatiin urautumaan riittävästi. Rakennetta ei siis mitoitettu vastaamaan mitään tiettyä tieluokkaa. Alla olevassa rakentamisen laadun vertailussa rakenteesta mitattuja arvoja on verrattu vastaaviin Tielaitoksen esittämiin laatuvaatimuksiin (Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työohjeet: Penger- ja kerrosrakenteet 1994). Näitä arvoja ei - erityisesti kantavuuden osalta - olekaan rakenteessa tavoiteltu, mutta ne on esitetty, jotta saadaan käsitys rakenteiden suhteista tavanomaisiin tierakenteisiin.

#### Rakeisuudet ja mittavaatimukset

Rakenne pyrittiin rakentamaan huolellisesti vastaamaan vastaavan tasoisen todellisen tierakennuskohteen laatua. Kaikkien materiaalien rakeisuudet ja mittaavaatimukset täyttivät TYLT:n vaatimukset (liite 1).

#### Jakava kerros

Jakavan kerroksen soran tiiviysmittausten (volymetrikoetulosten) ja laboratoriokeiden perusteella saavutettu keskimääräinen tiiviysaste oli 93.6 % ja



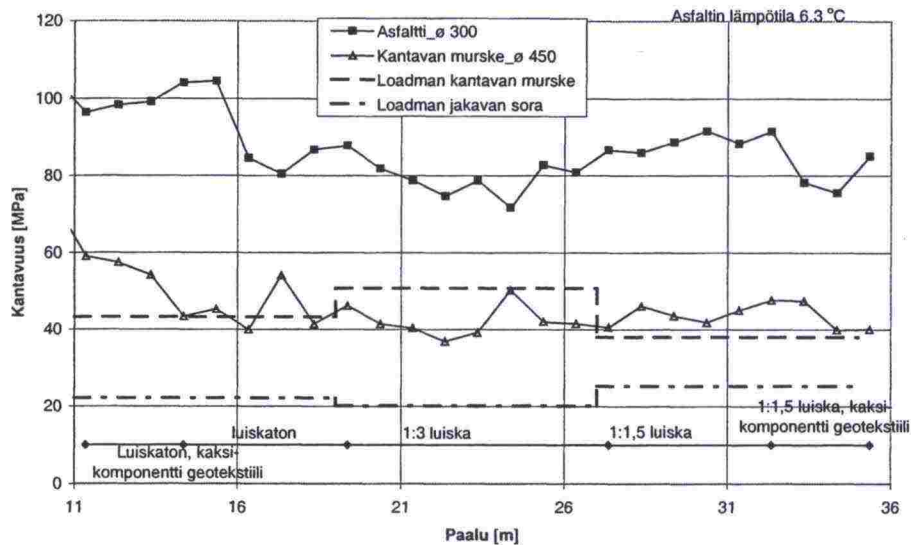
yksittäinen minimiarvo 91.5 % (liite 2). TYLTissä jakavan kerroksen tiiviysvaatimus on esitetty suhteessa levykuormituskokeeseen, ei tiiviysasteeseen. Suodatinkerrokselle esitetyt tiiviysastevaatimukset ovat: keskimääräinen tiiviysaste 95 % ja alin yksittäinen tiiviysaste 90 %. Tämän alin tiiviysastevaatimus täyttyy, mutta vaatimus keskimääräisestä tiiviysasteesta ei täyty luiskattomalla eikä jyrkkäluiskaisella rakenteella. Tämä kerroksen osalta on odotettavissa hieman suurempia kokoonpuristumia (toisin koemäärä oli pieni - kolme kappaletta). Syynä tähän alitukseen saattaa olla se, että tiivistystyö jouduttiin tekemään selvästi optimivesipitoisuutta (6.5 %) suuremmalla vesipitoisuudella (noin 8 %).

TYLTin mukainen pudotuspainolaitteella määritetty kantavuuden vähimmäisarvo  $E_2$ :lle jakavalle kerrokselle on 105 MPa. Loadman mittausten perusteella määritetty  $E_{300}$  kantavuusmittausten keskiarvo oli 22.5 MPa ja alin arvo 20 MPa, joten kantavuuden osalta tavoite alittui reilusti.

### Kantava kerros

Kantavan kerroksen murskeen tiiviysmittausten mukaan keskimääräinen tiiviysaste on 93.9 %, ja alin arvo on 89 %. Alimmat arvot mitattiin luiskattomalle rakenteelle. Näiden mukaan suodatinkerrosten vaatimusten mukainen keskimääräinen tiiviysaste 95 % alittuu kuten myös alin yksittäinen arvo on alle 90 %. Tiivistystyö suoritettiin optimivesipitoisuutta (5.0 %) pienemmässä vesipitoisuudessa 4.1 - 4.3 %, mutta murskekerros jouduttiin levittämään suunnitelmasta poiketen 400 mm paksuisena kerroksena. Syynä tähän oli jakavan kerroksen kastuminen rankkasateiden vaikutuksesta. Paksu kerros ei tiivistynyt kunnolla, joten tavoiteltuja kantavuuksia ja tiiviysasteita ei saavutettu.

TYLT:in mukainen pudotuspainolaitteella määritetty keskimääräinen kantavuusvaatimus kantavan kerroksen pinnalta tulisi päällysrakenneluokassa 6 ja AB-päällysteluokassa olla 215 MPa. Suositeltava vähimmäisarvo pienimmälle yksittäiselle kantavuusarvolle  $E_2$  tulisi vastaavasti olla 165. Pudotuspainolaitemittausten mukainen keskimääräinen arvo oli 46 MPa ja yksittäinen alin arvo 37 MPa. Loadman mittausten mukainen keskimääräinen  $E_{300}$  oli 44 MPa ja alin arvo 38 MPa (kuva 7.1). Loivaluiskaisen rakenteen eri kerrosten pinnalta mitatut kantavuusarvot olivat keskimäärin huonompia kuin muista rakenteista mitatut. Myös kantavan kerroksen osalta yleiset kantavuusvaatimukset alittuivat reilusti.



Kuva 7.1. Kantavuusmittaukset eri kerrosten päältä ennen koestusta.

## Päällyste

Päällysteen paksuus laskettiin vaaitustuloksista. Niiden mukaan luiskatoman rakenteen päällysteen keskimääräinen paksuus oli 47 mm, loivaluiskaisen 37 mm ja jyrkkäluiskaisen 41 mm. APAS-laskelmien perusteella voidaan arvioida, että 10 mm ero päällysteen paksuudessa lisää kantavan kerroksen jännityksiä 11 - 29 % ja jakavan kerroksen 5 - 11 %. Loivaluiskaisen rakenteen päällysteen ohuus näkyy selvästi kantavuusmittauksissa (kuva 7.1).

Päällysteen pinnalta tehtiin kantavuusmittaukset pudotuspainolaitteella heti päällystystyön loputtua (30.11.2000), keväällä kuivasta rakenteesta (23.5.2001) sekä ennen koestusta vedenpinnan ollessa tasolla W2 (21.6.2001) ja perustasolla W1 (9.7.2001). Kantavuusmittausten mukaan keskimääräiset kantavuudet ovat olleet kuva 7.1 ja taulukon 7.1 mukaiset. Luiskat on kaivettu auki vasta kokeiden suorituksen jälkeen.

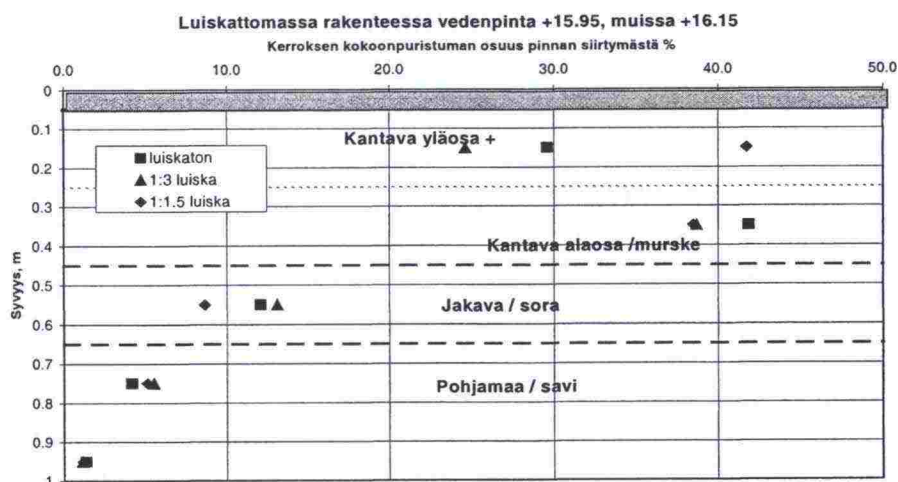
Taulukko 7.1. Pudotuspainolaitteella määritetyt keskimääräiset ja alimmat yksittäiset kantavuusarvot  $E_2$  päällysteen päältä.

Päivämäärä	Keskimääräinen kantavuusarvo, $E_2$ , MPa	Alin yksittäinen kantavuusarvo, $E_2$ , MPa
30.11.2000	86	72
23.5.2001, kuiva rakenne	93	78
21.6.2001, vesi +15.95	86	76
9.7.2001, vesi +15.70	85	74



## 7.2 Pysyvien muodonmuutosten jakaantuminen rakenteessa

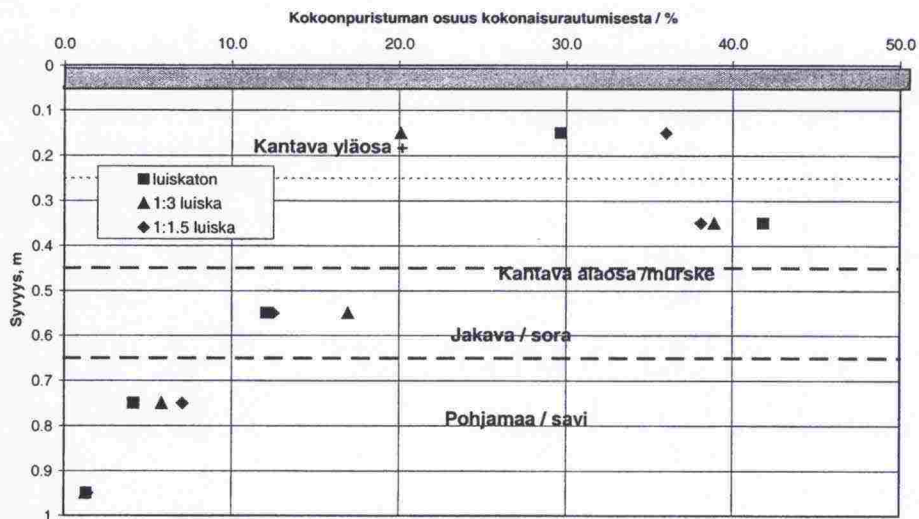
Pysyvien muodonmuutosten määrää rakenteessa seurattiin Emu-Coil mittauksin. Ylimpien Emu-Coil antureiden yläpinta vaaittiin kokeen jälkeen, josta laskettiin kantavan yläosan ja päällysteen kokoonpuristuma. Päällyste oletettiin kokoonpuristumattomaksi. Kuvassa 7.2 on esitetty näin määritetyt eri kerrosten kokoonpuristumien osuudet kokonaisurautumisen suhteen. Keskimääräisten urasyvyyksien kehittyminen profilometrimittausten perusteella on esitetty kuvassa 8.1.



Kuva 7.2. Kerroksen kokoonpuristuman osuus pinnan siirtymästä.

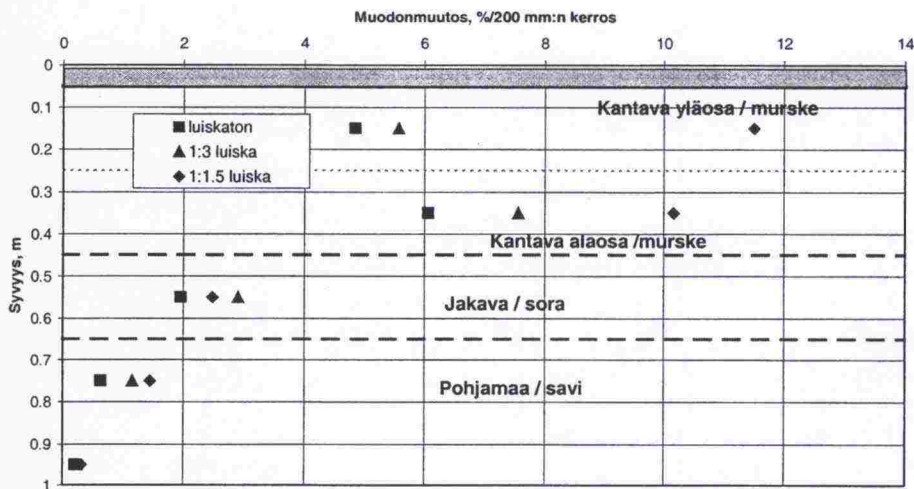
Tulokset on laskettu suhteessa kunkin mittaussarjan maksimiarvoon. Niistä näkyy, että luiskattomassa ja loivaluiskaisessa rakenteissa suurimmat muodonmuutokset tapahtuvat kantavan kerroksen alaosassa. Jyrkkäluiskaisessa rakenteessa suurimmat muodonmuutokset tapahtuvat kantavan kerroksen yläosassa. Muodonmuutossuhteita tarkasteltiin myös suhteessa loppuvaiheen keskiarvoihin. Tämä tarkastelu antoi samansuuntaisia tuloksia. Pysyvistä muodonmuutoksista 63 - 80 % tapahtuu 400 mm paksuisessa kantavassa kerroksessa ja päällysteessä. Jakavan kerroksen osuus (200 mm) painumista on noin 9 - 13 % ja pohjamaan yläosien (400 mm) 4 - 6 %.

Vedenpinnan muutokset vaikuttavat ratkaisevasti tuloksiin, siksi vertailtiin myös tapausta, jossa vedenpinnat olivat samat tasolla +15.95. Tulokset on esitetty kuvassa 7.3. Tulosten perusteella merkittävimmät kokoonpuristumat luiskattomalle ja loivaluiskaiselle rakenteelle tapahtuvat kantavan kerroksen alaosassa, kun jyrkkäluiskaisella rakenteella kokoonpuristumat olivat samaa suuruusluokkaa.



Kuva 7.3. Kokoonpuristumien osuus kokonaisurautumisesta 200 mm kerroksissa, kun vedenpinta on kaikissa rakenteissa tasolla +15.95.

Eri kerrosten pysyvät muodonmuutokset 200 mm paksuisille kerroksille on esitetty kuvassa 7.4.

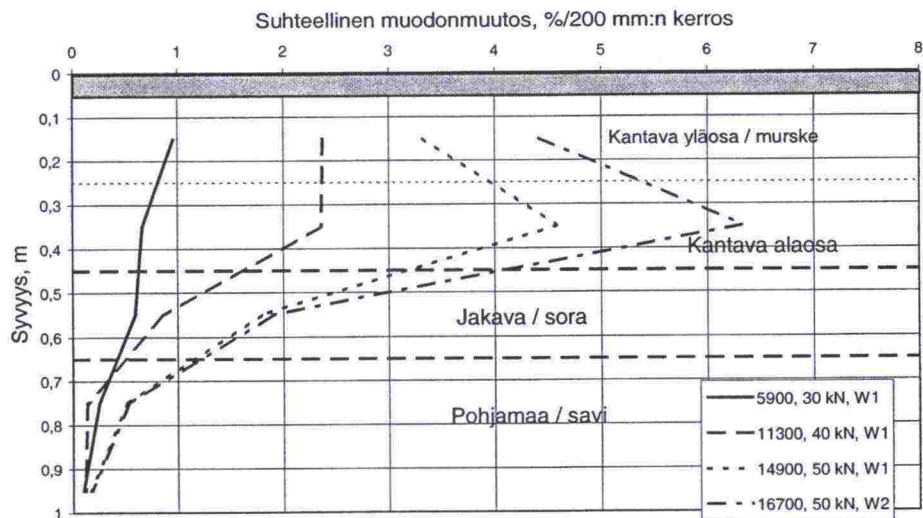


Kuva 7.4. Eri kerrosten muodonmuutokset (maksimipainumasta lasketut) 200 mm:n kerroksissa.

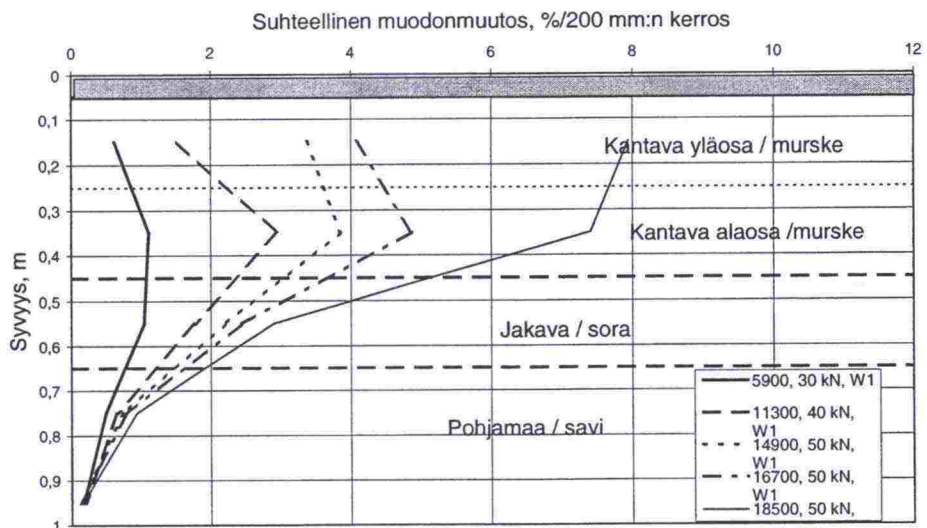
Pysyvien muodonmuutoksen kehittyminen eri rakenteissa eri kuormituksissa on esitetty kuvissa 7.5 - 7.7. Murskekerroksen yläosan muodonmuutos on laskennallinen, muut perustuvat Emu-Coil-mittauksiin. Luiskattomassa rakenteessa pysyvien muodonmuutosten maksimi kehitty murskekerroksen alaosaan noin 0.24 - 0.44 m syvyyteen maan pinnasta, kun kuormitus kas-



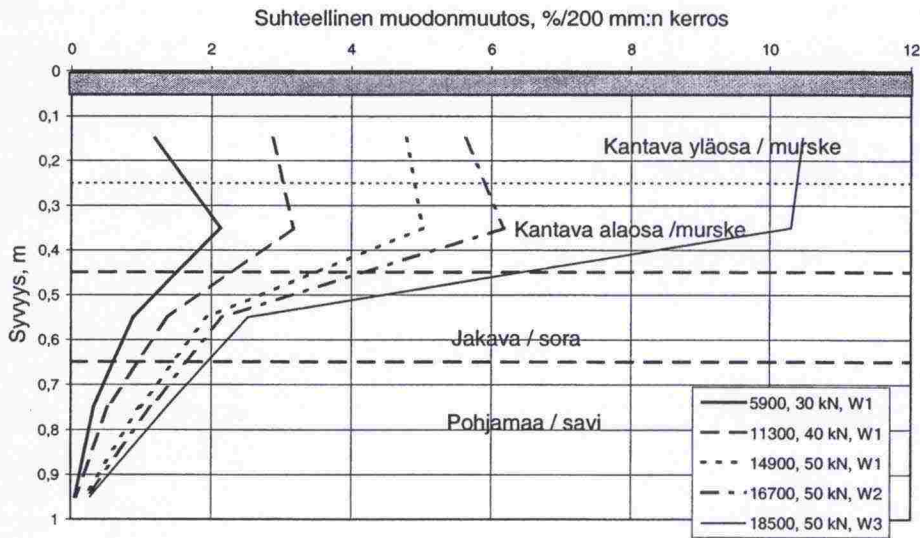
vaa 40 kN ja siitä suuremmaksi. Sitä vastoin molemmissa luiskallisissa rakenteissa muodonmuutokset keskittyvät sitä voimakkaammin murskekerroksen yläosaan, mitä suurempi kuormitus on ja mitä korkeammalla vedenpinta on. Laskelmien mukaan loivaluiskaisen rakenteen ohuempi päällyste lisää ylimpien kerrosten rasituksia ja siten myös muodonmuutoksien suhteessa muiden rakenteiden vastaaviin kerroksiin pitäisi olla suurempia. Mittausten mukaan mitään merkittävää kasvua pysyvillä muodonmuutoksilla ei kuitenkaan havaittu.



Kuva 7.5. Muodonmuutosten kehittyminen eri kuormituksilla luiskaton rakenne.

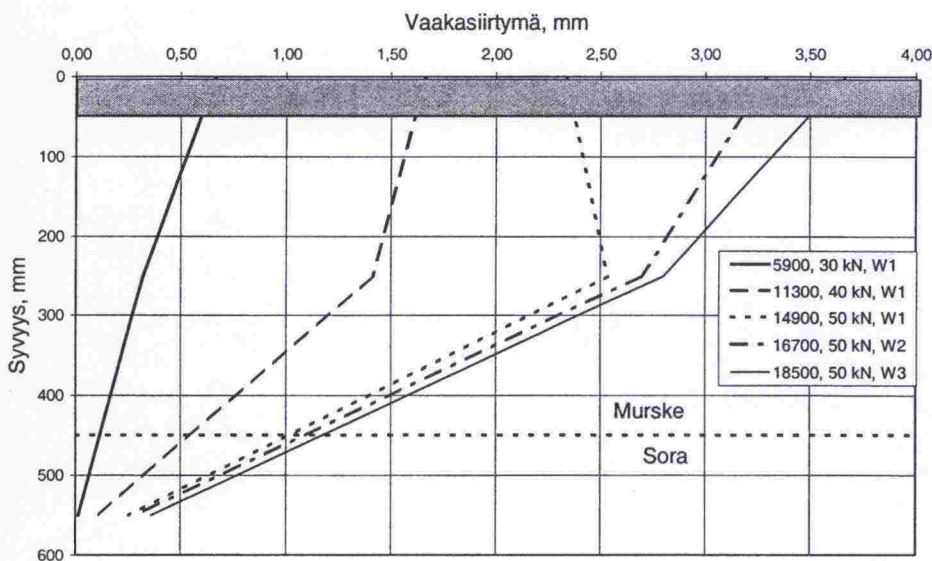


Kuva 7.6. Muodonmuutosten kehittyminen eri kuormituksilla 1:3 luiska.



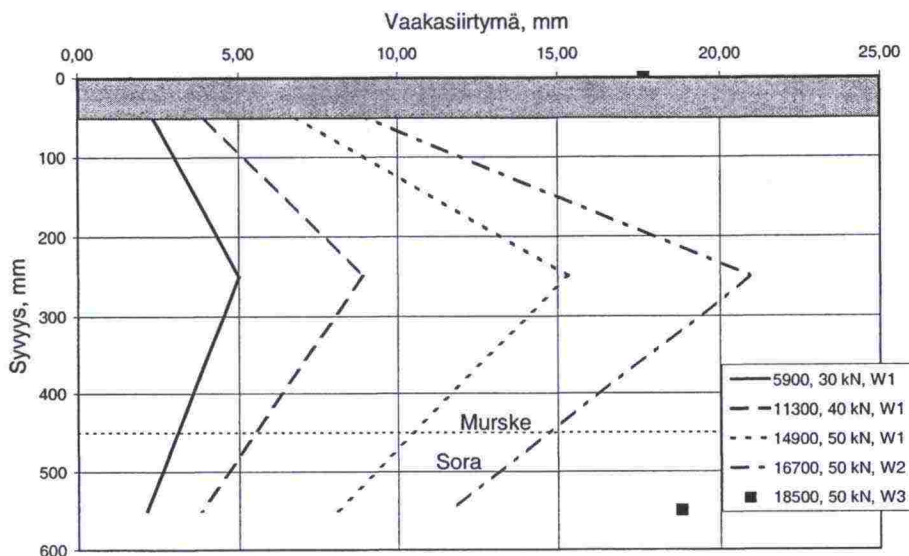
Kuva 7.7. Muodonmuutosten kehittyminen eri kuormituksilla 1:1.5 luiska.

Pysyvien vaakasiirtymien jakaantuminen luiska-alueella on esitetty kuvissa 7.8 (luiska 1:3) ja 7.9 (luiska 1:1.5) kuormituksen funktiona. Ylin mittausta perustuu rakenteen pinnassa olevien mittanastojen siirtymiin ja alemmat luiskissa olleisiin vaakasiirtymäantureihin. Mittausten mukaan loivalla luiskalla siirtymät ovat suurimmillaan pinnassa ja jyrkällä luiskalla siirtymät keskittyvät murskekerrokseen. Jyrkkäluiskainen rakenne on suurimmilla kuormituksilla jo hyvin lähellä murtorajatilaa ja syntyneet muodonmuutokset ovat suuria. Pysyvien muodonmuutosten keskittyminen murskekerrokseen osoittaa liukupinnan sijainnin tässä kerroksessa. Sitä vastoin loivaluiskaisessa rakenteessa muodonmuutokset keskittyvät rakenteen yläosiin, jolloin liukupinta sijainnee ylempänä ja tavoittanee maanpinnan ylempänä.



Kuva 7.8. Vaakasuuntaisen siirtymän kehittyminen eri kuormituksilla 1:3 luiska.





Kuva 7.9. Vaakasuuntaisen siirtymän kehittyminen eri kuormituksilla 1:1.5 luiskalla.

### 7.3 Hetkellisten ja pysyvien kokoonpuristumien suhteet

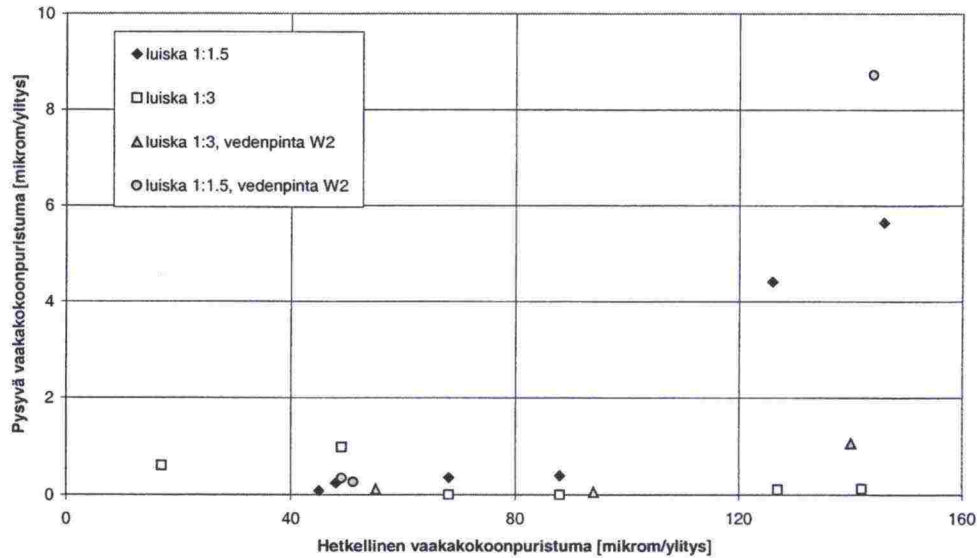
#### 7.3.1 Vaakasuuntaiset kokoonpuristumien suhteet

Hetkellisten ja pysyvien (plastisten) vaakasuuntaisten kokoonpuristumien suhteet noudattavat periaatetta, jonka mukaan pysyvät muodonmuutokset kasvavat hetkellisten muodonmuutosten kasvaessa. Kuvassa 7.10 on esitetty murskekerroksen alaosan ja kuvassa 7.11 sorakerroksen vaakasuuntaisten kokoonpuristumien suhteet 50 kN kuormalla. Sekä hetkelliset että pysyvät mittaukset on tehty luiskassa olleista sivusiirtymäantureista. Sivusiirtymäanturien sijainnit on esitetty liitteen 4 poikkileikkauksessa.

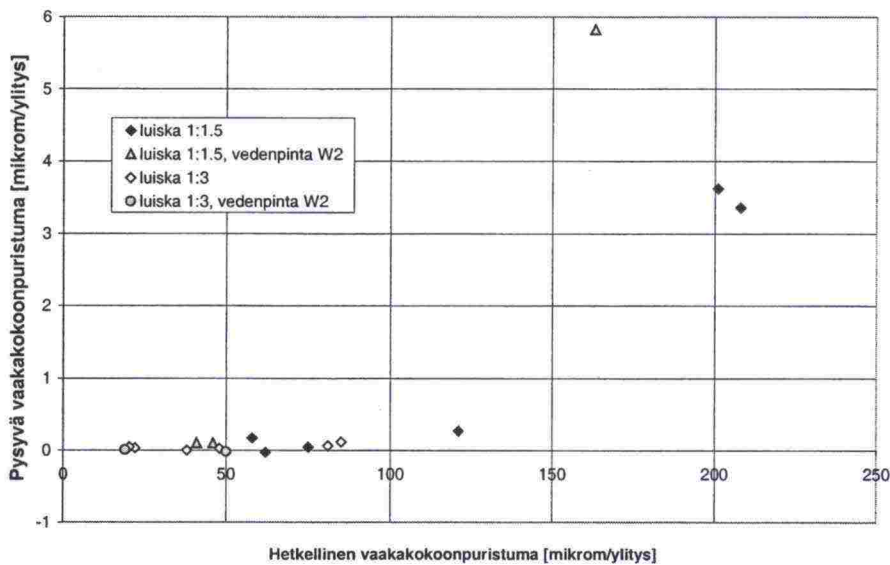
Molemmista kuvista on havaittavissa selvä pysyvien kokoonpuristumien kasvu yhtä ylityskertaa kohti, kun tietty kynnyisarvo hetkellisissä muodonmuutoksissa on ylitetty. Tämä kynnyisarvo molemmissa materiaaleissa on noin 100  $\mu\text{m}$ . Hetkellisen muodonmuutoksen suuruus riippuu rakenteesta vallitsevasta jännitystilasta. Pysyvien kokoonpuristumien kasvuun vaikuttavat lisäksi merkittävästi vesipitoisuuden muutokset sekä luiskän jyrkkyys.

Suuret erot hetkellisissä vaakasuuntaisissa kokoonpuristumisissa samalla luiskän jyrkkyydellä ja vesipitoisuudella aiheutuvat rakenteen kuormitustavasta. Rakennetta kuormitettiin 600 ylityskerran sykleissä siten, että kuormittava pyörä sijaitsi ensin uran vasemmassa reunassa noin 300 mm keskeltä, keskellä ja lopuksi 300 mm uran oikealla puolella (sijainnit 1, 2 ja 3 kuvassa 1.3). Suurimmat siirtymät havaittiin luonnollisesti kuormitustilantees-

sa 3, jolloin pyörä oli lähimpänä luiskaa ja pienimmät kuormituksen sijaitessa kauimpana luiskasta.



Kuva 7.10. Murskekerroksen alaosan vaakasuuntaisten kokoonpuristumien suhteet 50 kN kuormalla.



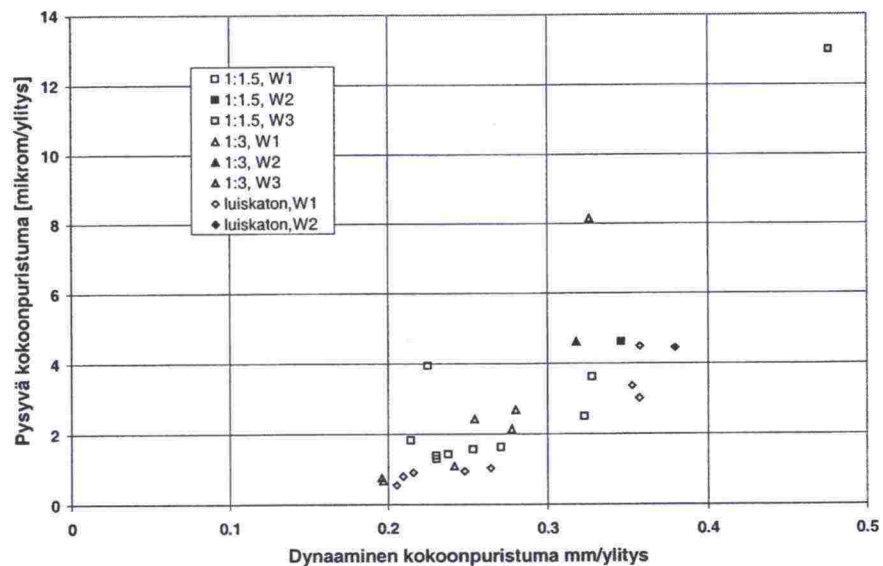
Kuva 7.11. Sorakerroksen alaosan vaakasuuntaisten kokoonpuristumien suhteet 50 kN kuormalla.



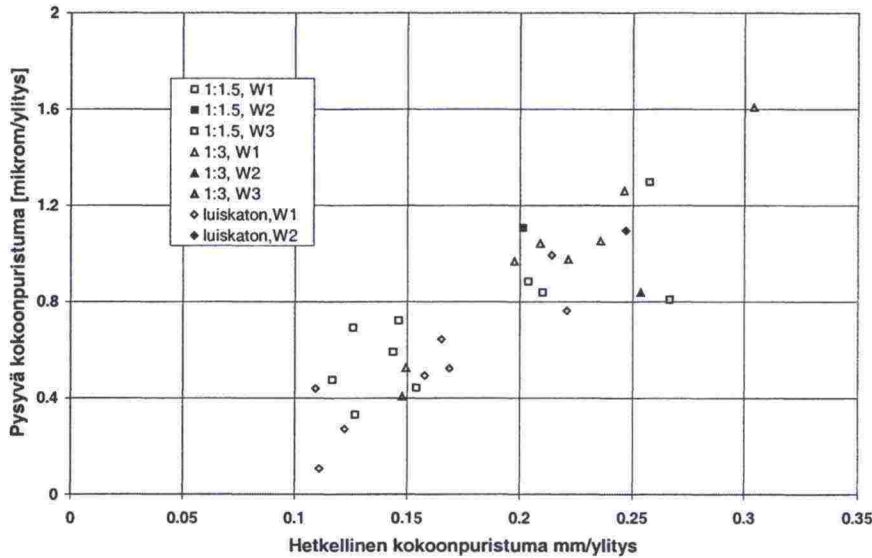
### 7.3.2 Pystysuuntaisten kokoonpuristumien suhteet

Pystysuuntaisia kokoonpuristumia on vertailtu Emu-Coil-mittausten perusteella. Vertailussa on noudatettu samoja periaatteita kuin vaakasuuntaisten kokoonpuristumien osalta. Merkittävä ero on kuitenkin anturien sijainnilla, sillä vaakasiirtymäanturit sijaitsivat luiskassa ja kokoonpuristuma-anturit suoraan kuormituksen keskilinjan alla. Pystysuuntaisten kokoonpuristumien tarkastelu on tehty vain suoraan kuormituksen alla olevien mittausten suhteen.

Kuvassa 7.12 on esitetty murskekerroksen alaosan ja kuvassa 7.13 sorakerroksen pystysuuntaisten hetkellisten ja pysyvien kokoonpuristumien suhteet 50 kN kuormalla. Hetkellinen kokoonpuristuma on tässä tarkastelussa kokonaiskokoonpuristuma, eli se on palautuvan ja palautumattoman hetkellisen kokoonpuristuman summa. Murskeen molemmat kokoonpuristumatyypit ovat selvästi suurempia kuin soran. Yhtä selvää taitekohtaa / kynnyсарvoa muodonmuutuskäyttäytymiselle kuin vaakasuuntaisissa kokoonpuristumissa ei ole havaittavissa.



Kuva 7.12. Murskekerroksen alaosan pystysuuntaisten kokoonpuristumien suhteet.



Kuva 7.13. Sorakerroksen pystysuuntaisten kokoonpuristumien suhteet.

### 7.3.3 Rakenteesta takaisinlasketut jäykkyysmoduulit

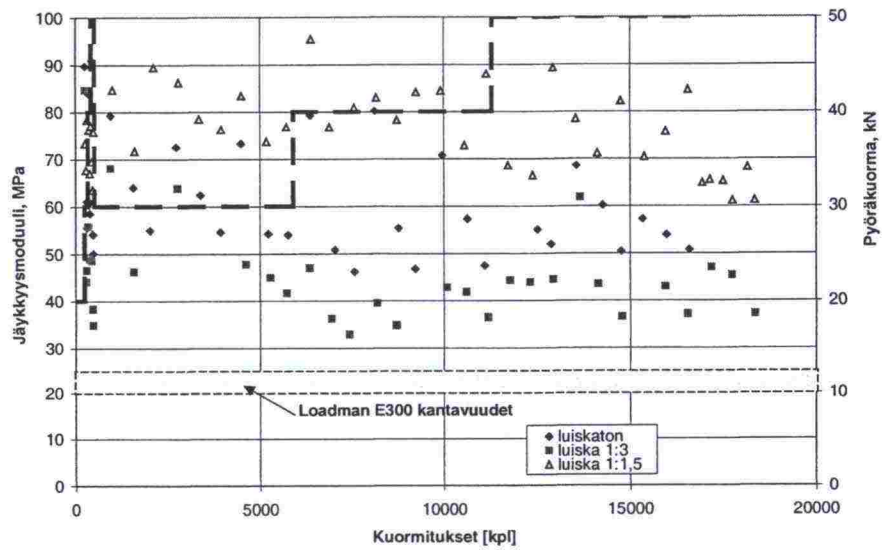
Kun tunnetaan rakenteen hetkellinen jännitystilä (maanpaine  $\sigma_{zmax}$ ) ja hetkellinen kokoonpuristuma  $\varepsilon_{zmax}$  (Emu-Coil), voidaan näistä määrittää vastaavat dynaamiset jäykkyysmoduulit kaavalla 7.1:

$$E = \frac{\sigma_{zmax}}{\varepsilon_{zmax}} \quad (7.1)$$

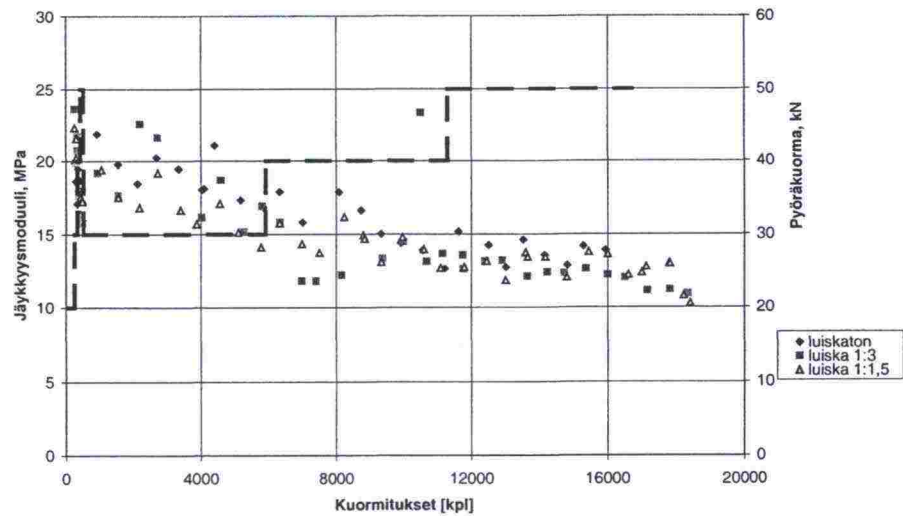
jossa  $E$  dynaaminen jäykkyysmoduuli (MPa)  
 $\varepsilon_{zmax}$  hetkellinen pystysuuntainen kokoonpuristuma  
 $\sigma_{zmax}$  hetkellinen pystysuuntainen maanpaine

Maanpainetta seurattiin sekä sora- että savikerroksessa, joista kuvassa 7.14 on esitetty soran dynaaminen jäykkyysmoduuli ja kuvassa 7.15 saven dynaaminen jäykkyysmoduuli. Kuvissa on lisäksi esitetty pyöräkuorman suuruuden muuttuminen kokeen aikana ja sorakerroksen Loadman kantavuusmittausten tulokset. Moduulien arvoissa - erityisesti sorassa - on havaittavissa merkittävää hajontaa. Moduulien keskiarvot on esitetty taulukossa 7.2.





Kuva 7.14. Sorakerroksen dynaaminen jäykkyyshmoduuli.



Kuva 7.15. Savikerroksen dynaaminen jäykkyyshmoduuli (määritetty kerroksen yläosasta).

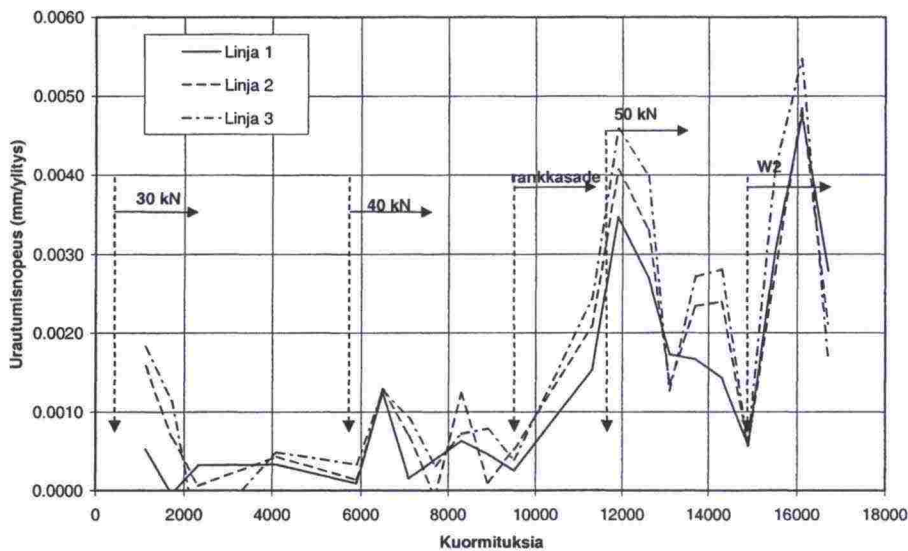
Tulosten perusteella ei ole havaittavissa, että luiskakaltevuus vaikuttaisi moduulien arvoihin yksikäsitteisesti. Varsinkin sorakerroksessa jyrkkäluiskaiselle rakenteelle on saatu suurempia moduuliarvoja kuin luiskattomalle tai loivaluiskaiselle. Mittaustulosten suurempi hajonta sorakerroksessa voi johtua maanpainesellien ja/tai Emu-Coil-mittausten toimintapuutteista rakeisissa materiaaleissa. Laboratoriokokeiden mukaan savelle määritetty moduuli 10 000 kuormitussyklin jälkeen on noin 7,0 MPa ja soralle 100 syklin jälkeen 80 MPa vastaavalla jännitysalueella. Soran pinnalta mitatut  $E_{300}$  jäykkyysharvot (Loadman) vaihtelivat välillä 20...25 MPa. Saven pinnalta rakentamisen aikaisia laadunvalvontamittauksia ei tehty.

Taulukko 7.2. Savi- ja sorakerrosten keskimääräiset jäykkyyshmoduulit eri rakenteille.

Rakenne	Jäykkyyshmoduuli, sora, MPa	Jäykkyyshmoduuli savi, MPa
laboratoriotulos	80	7
luiskaton	62	17
1:3	46	16
1:1,5	76	15

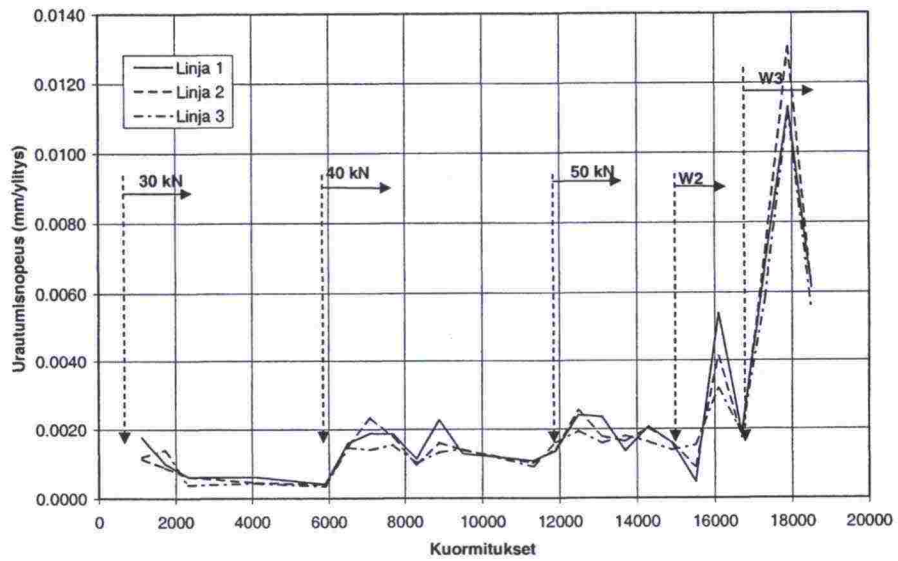
#### 7.4 Erilliset mielenkiintoiset ilmiöt

Urautumisnopeus kunkin kuormitusportaan sisällä pieneni (kuvat 7.16 - 7.18) kaikilla rakennetyypeillä profilometrimittausten mukaan. Tuloksissa oli jonkin verran huojuntaa, mutta keskimäärin trendi oli selvä. Kuitenkin, jos materiaalien vesipitoisuudet kasvoivat (rankkasade, vedenpinnan nosto W2 ja W3), kasvoivat myös urautumisnopeudet. Jyrkkäluiskaisessa rakenteessa veden nostaminen kalliomurskekerrokseen (W3) kiihdytti urautumisnopeutta merkittävästi. On jopa mahdollista, että kuormituksen jatkaminen olisi aiheuttanut paikallisen murtuman.

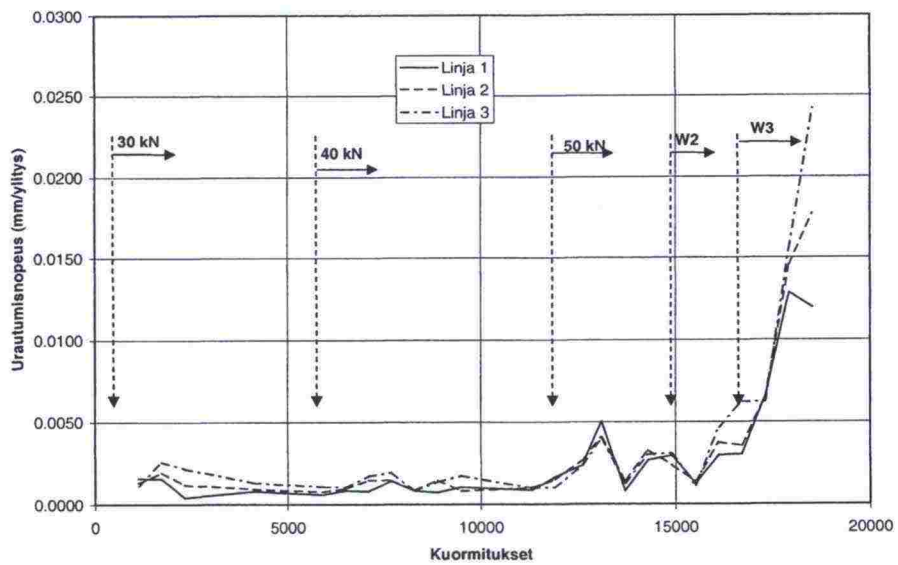


Kuva 7.16. Urautumisnopeus, luiskaton rakenne.





Kuva 7.17. Urautumisnopeus, luiska 1:3.



Kuva 7.18. Urautumisnopeus, luiska 1:1.5

## 8 GEOM-KERROIN

### 8.1 Tausta

TPPT-hankkeeseen liittyvä mitoitusmenettelyiden kehittämisen lähtöoletukset ovat seuraavat:

- ylin sitomaton kerros on tärkein tien pinnan urautumisen kannalta
- talvi nollaa tilanteen
- harjanteen kasvu on lineaarista (sama eri vuosina, jos liikenne sama)
- kolme periodia: kevät (osittain sulanut tila), kesä ja talvi
- TKT-testeissä (pienmittakaavakoelaitteisto) ei pystytä ottamaan huomioon poikkigeometriaa, mistä syystä tarvitaan erillinen poikkigeometriatekijä, mikä on funktio päällysteen leveydestä (liikenteen sivuttaisjakauma, eli kuinka lähellä tien reunaa pyörä liikkuu) ja luiskan kaltevuudesta
- vähäliikenteisillä teillä liikennekuormitus arvioidaan keskivuorokausiliikenteen avulla
- alusrakenne ja sen olosuhteet (routiminen) otetaan huomioon olosuhdekertoimella

Esitetyssä /Belt et al. 2001/ mitoitusmenettelylähestymistavassa GEOM-kerroin on kaavan 8.1 osatekijä, jolla arvioidaan parannettavan rakenteen harjanteen kasvua vuodessa ( $H_V$ ).

$$H_V = K \cdot H_{TKT} \cdot GEOM \cdot OLOS \quad (8.1)$$

missä

K	kalibroitikerroin (mittakaava, koejärjestely)
$H_{TKT}$	harjanteen kasvu vuodessa TKT-testien perusteella ottaen huomioon $\epsilon_e$ , N ja b ( $H_{TKT}$ kevät $H_{TKT}$ kesä)
GEOM	poikkigeometriakerroin f(leveys, luiska), määritetään HVS ko-keista
OLOS	olosuhdekerroin f(alusrakenteen deformatuminen ja / tai pituussuuntaisen epätasaisuuden (routimisen) aiheuttama dynaaminen kuormituslisä)

$H_{TKT}$  siis määritetään TKT-testien perusteella. TKT-testeistä saadaan kumulatiivinen suhteellinen muodonmuutos ( $\epsilon_p$ , kaava 8.2), jonka perusteella voidaan arvioida harjanteen kasvu vuodessa.

$$\epsilon_p = a' \cdot \epsilon_e \cdot N^b \quad (8.2)$$

missä

$\epsilon_e$	suhteellinen kimmainen muodonmuutos $\mu\text{m}/\text{m}$
N	kuormitusten lukumäärä
$a', b$	parametrejä

Parametri  $a'$  on vakio sekä kesä- että kevätolosuhteissa. Parametri  $b$  on luokkaa 0,6 kesäolosuhteissa ja kevätolosuhteissa funktio esim. hienoainespitoisuudesta.



Harjanteen kokonaiskorkeus (Harjanne) määritetään kaavan 8.3 perusteella.

$$\text{Harjanne} = H_{\text{alku}} + H_v \cdot Y \quad (8.3)$$

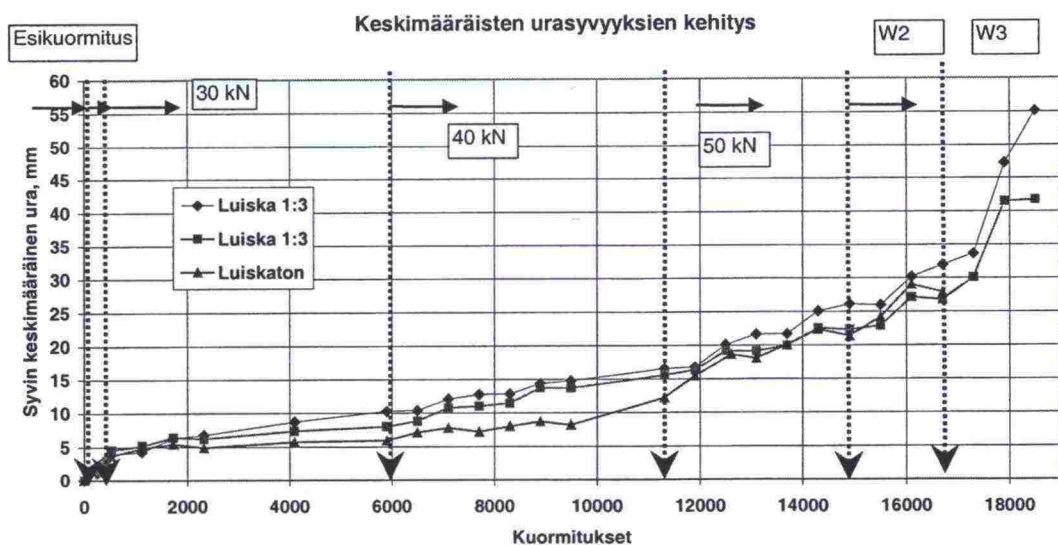
missä

$H_{\text{alku}}$  alkuharjanne  
 $Y$  vuosi

## 8.2 GEOM-kerroin HVS kokeiden perusteella

GEOM-kertoimen määrittäminen tapahtui HVS-kokeesta profilometrillä mitattujen urasyvyyskehitystulosten perusteella. Kuvassa 8.1 on nähtävissä urasyvyyskehitys kaikkien kolmen rakenteen osalta. Lisäksi kaikista rakenteista on olemassa kuvan 8.1 kaltaiset kuvaajat, joista on nähtävissä eri rakenteiden urasyvyyskehitys myös etäisyyden funktiona.

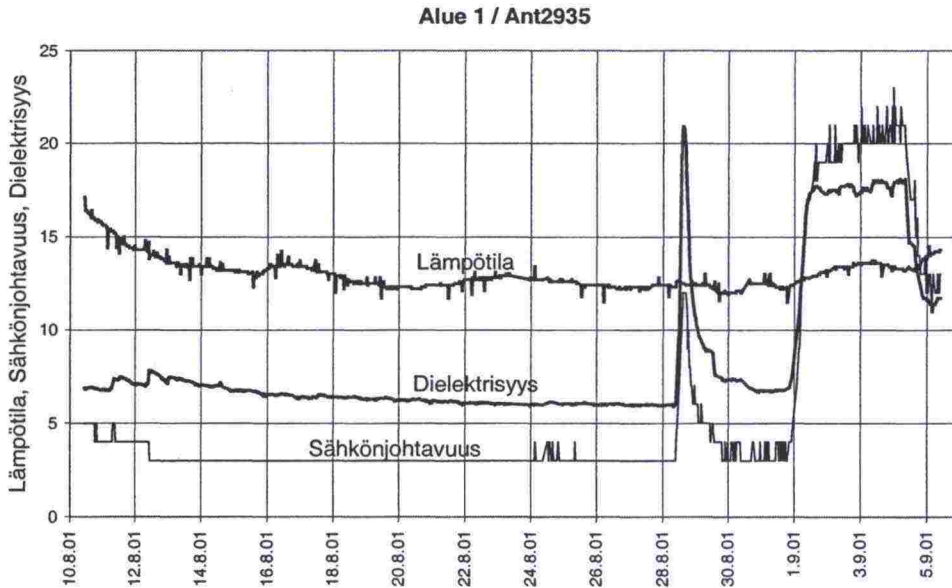
GEOM-kertoimen määrittämiseksi oli siis tiedot eri rakenteissa, eri etäisyyksillä luiskan reunasta ja eri kuormituksilla rakenteeseen aiheutettujen urasyvyyskehityksestä. Kertoimeen vaikuttavan tien leveyden suhteen päädyttiin tulosten perusteella siihen, että kuormitukset, jotka tehtiin 450 mm päässä reunasta vastaisivat 5,5 m leveätä tietä, 750 mm etäisyydellä olevat 6,5 m leveätä tietä ja 1050 mm päässä 7,5 m leveätä tietä. Tähän päädyttiin teiltä mitattujen urien keskimääräisten sijaintien perusteella. GEOM-kerroin ei siis ole suoraan verrattavissa teille, joilla penkereen leveys on tavallista suurempi. GEOM-kerrointa käytettäessä täytyy ottaa tämä lähtökohta huomioon.



Kuva 8.1. Urasyvyyden kehitys kuormitusten funktiona.

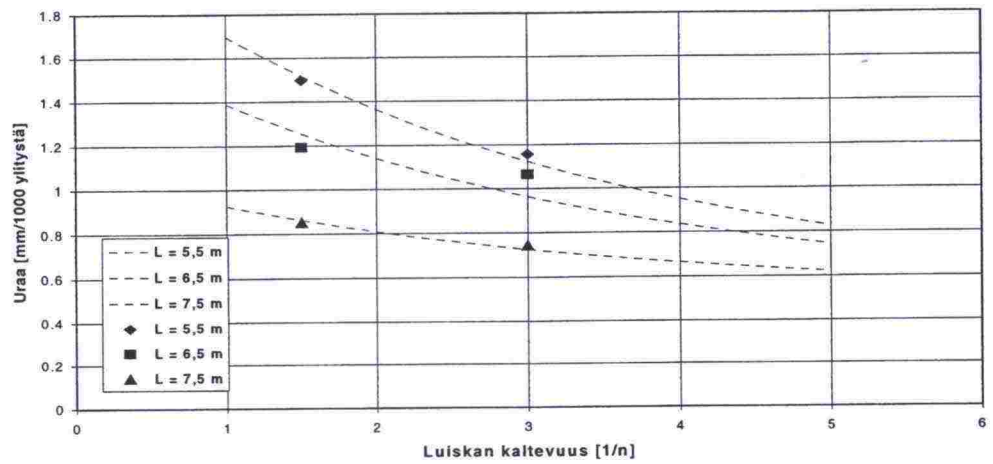
Urautumisnopeustulokset olivat vertailukelpoiset lukuun ottamatta luiskatton rakenteen 9500 kuormituksen jälkeisiä tuloksia (liite 10). Tämän kuormitusmäärän jälkeisissä urasyvyyskehityksissä on nähtävissä voimakasta kasvua verrattuna muiden rakenteiden vastaaviin tuloksiin. Tämä voimakas urautumisnopeus on selitettävissä sillä, että rakenne kastui rankkasateiden

vaikutuksesta lisäten urautumista. Vesipitoisuuden kasvu on nähtävissä dielektrisyiden ja sähkönjohtavuuden voimakkaana kasvuna kuvassa 8.2. Päivämäärien perusteella vesipitoisuuden normaalia korkeampi arvo ajoittuu juuri ajankohdalle, jolloin kuormituksessa olivat 9 500 – 14 900 ylitykset.

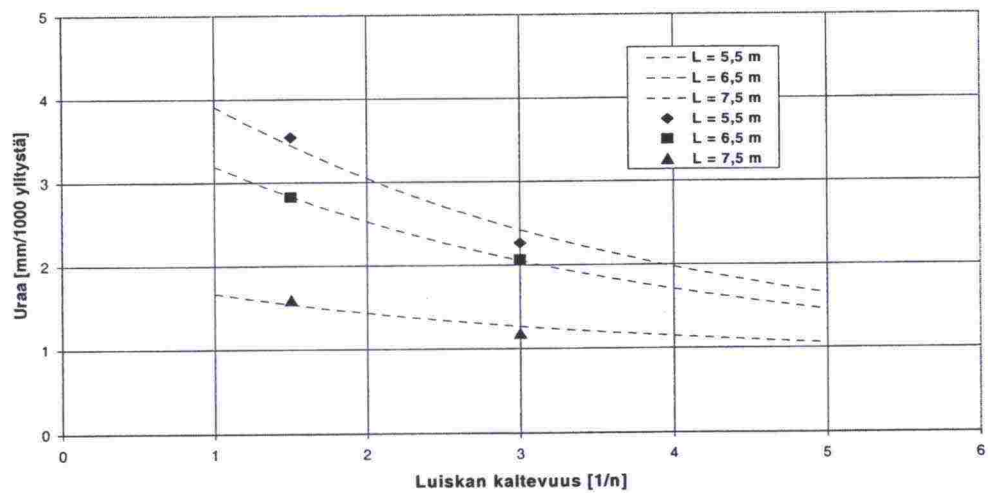


Kuva 8.2. Alueen 1 murskeesta mitatut dielektrisyys, sähkönjohtavuus ja lämpötila.

Vesipitoisuuden noususta johtuvan rajoituksen johdosta päätettiin käyttää perustietoina kaikilta rakenteilta urasyvyyskehitystuloksia 500 – 9 500 ylityksen osalta (kuormitus 30/40 kN) sekä rakenteista 17 ja 18 urasyvyyskehitystä, joka tapahtui 11 300 – 14 900 ylityksellä (kuormitus 50 kN). Näiden urautumisnopeuksien perusteella sovitettiin funktioita. Sovituksen yhteydessä päädyttiin kaavan 8.3 muotoa olevaan sovitusfunktioon. Kuvista 8.3 ja 8.4 on nähtävissä se, miten funktiot sopivat mitattuihin tuloksiin. Kuvista puuttuvat käyrien kolmannet pisteet eli ne pisteet jolloin rakenne on luiskaton eli x-akselilla oleva luiskan kaltevuus  $[1/n]$  on ääretön. Taulukosta 8.1 on nähtävissä kaavan 8.4 parametrit eri kuormitustapauksille. Parametri a on sama kuin luiskattomalla rakenteella saatu urasyvyystulos.



Kuva 8.3. Sovituskäyrästä GEOM-kertoimen määrittämiseksi 500 – 9 500 kuormitustulosten osalta.



Kuva 8.4. Sovituskäyrästä GEOM-kertoimen määrittämiseksi 11 300 – 14 900 kuormitustulosten osalta.

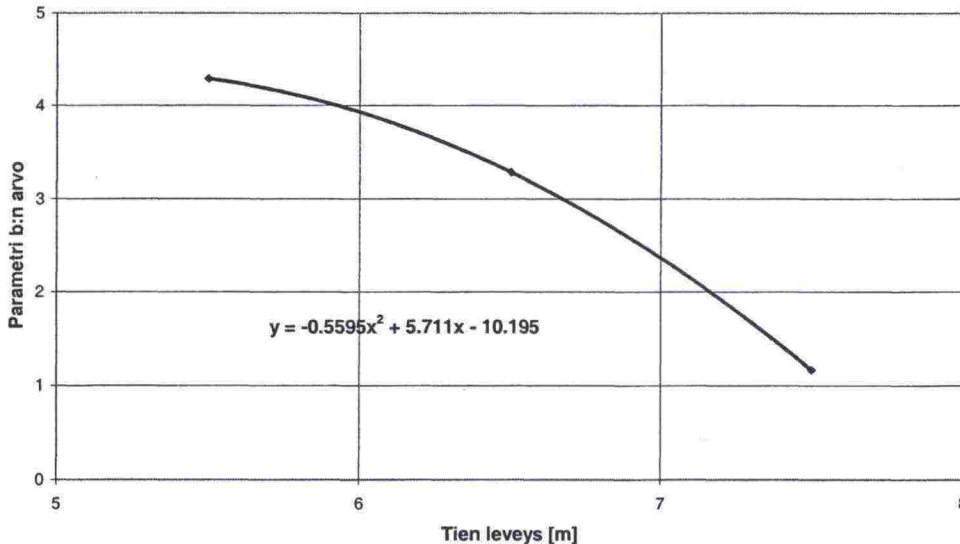
$$y = a + b/2.7^{(x/3)} \quad (8.4)$$

Taulukko 8.1. Sovitusfunktion 5 parametrit eri kuormitustapauksille.

Parametri / Tien leveys, [m]	30 – 40 kN (kuormitukset 500 – 9500)	50 kN (kuormitukset 11 300 – 14 900)
a	0,511	0,833
b	7,5	1,166
	6,5	3,288
	5,5	4,291



Jotta urautumisnopeudesta saataisiin kolmiulotteinen malli, jossa urautumisnopeus on tien leveyden sekä luiskan kaltevuuden funktiona määritettävissä, tuli saaduille  $b:n$  arvoille 50 kN kuormalla sovittaa funktio. Kuvassa 8.5 on esitetty  $b:n$  arvot tien leveyden suhteen sekä kolmen pisteen kautta sovitettu toisen asteen yhtälö.



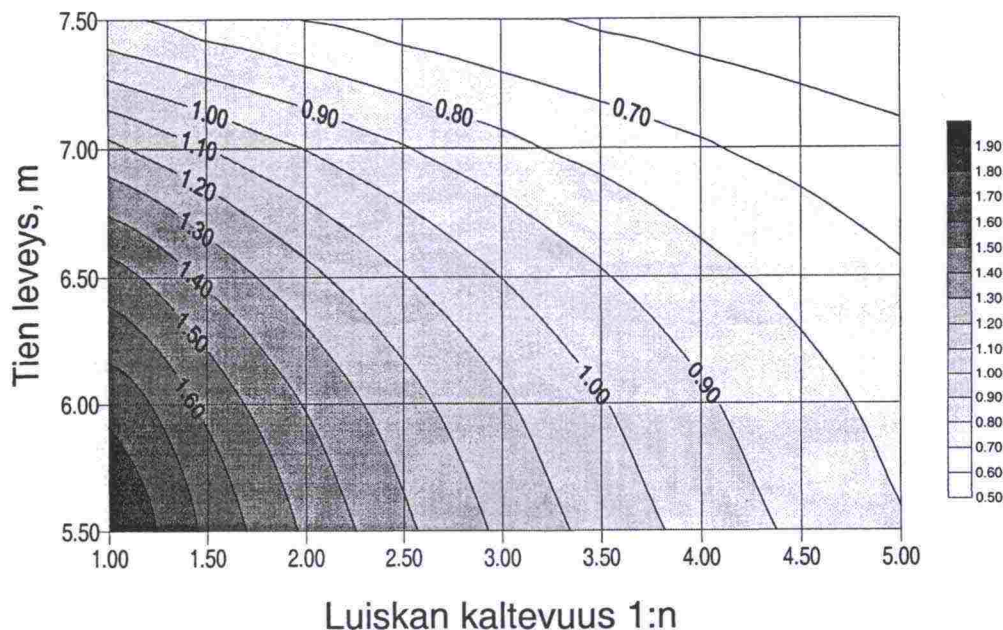
Kuva 8.5. Parametrille  $b$  sovitettu toisen asteen yhtälö.

Viimeisessä vaiheessa GEOM-kertoimen määrittämisessä asetettiin kertoimen vertailuarvoksi se arvo mikä saatiin 6,5 metrin levyisellä tiellä ja luiskan 1:3-kaltevuudella urasyvyyden nopeudeksi. Tämän urautumisnopeuden arvoksi asetettiin 1 ja muut lukemat muutettiin vastaamaan suhdelukua. Näin saatiin kaavan 8.5 mukainen yhtälö GEOM-kertoimeksi. Kuvassa 8.6 on esitetty GEOM-kertoimen arvo graafisessa muodossa.

$$GEOM = 0.407 + \frac{-0.273 \cdot B^2 + 2.785 \cdot B - 4.971}{2.7^{\left(\frac{kalt}{3}\right)}} \quad (8.5)$$

missä

$B$  tien leveys, m  
kalt luiskan kaltevuus, 1:kalt



Kuva 8.6. GEOM-kerroin luiskan kaltevuuden ja tien leveyden funktiona.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Tehtyjen HVS-kokeiden eri vaiheissa syntyi suuri määrä mittaustietoa. Tätä tietoa on tässä raportissa analysoitu tutkimuksen tavoitteiden kannalta. Tuloksia on tarkoitus analysoida edelleen tulevissa jatkotutkimuksissa. Jatkotutkimuksissa paneudutaan syvällisemmin rakenteen pysyvien muodonmuutosten syntytapaan sekä vesipitoisuuden muutosten vaikutukseen niihin.

Tehtyjen tutkimusten perustella voidaan päätellä, että:

- Koerakenteiden deformaatiosta suurin osa tapahtui kantavan kerroksen alaosassa 240...440 mm syvyydessä tien pinnasta. Sitomattomien kerrosten ylimmän 400 mm alueella tapahtui 63 - 80 % kokonaisurautumisesta. Alempana olevan sorakerroksen osuus oli 9 - 13 %. Luiskattomalla rakenteella kokoonpuristuman maksimi sijaitsi syvemmillä 250 - 450 mm syvyydessä, kun luiskallisilla rakenteilla - erityisesti 1:3 luiskaisella - maksimi sijaitsi ylimpänä (50 - 250 mm:ssä).
- Loivaluiskaisen rakenteen muodonmuutokset eivät olleet juurikaan suurempia toisiin rakenteisiin verrattuna, vaikka sen päällyste keskimäärin oli ohuin.
- Rakenteen vesipitoisuuden muutoksilla on merkittävä vaikutus pysyviin muodonmuutoksiin
- Pysyvät muodonmuutokset alkavat kasvaa merkittävästi ylitettyään materiaaliikohtaisen ja tiivistilasta riippuvan jännityksen (palautuvan muodonmuutoksen) kynnyksarvon. Tämä ilmiö havaittiin sekä laboratoriokokeissa että koerakenteissa. Erityisen selvästi tämä oli havaittavissa vaa-



- kasuuntaisilla siirtymillä. Vaakasuuntaisen hetkellisen muodonmuutoksen kynnyсарvo sekä soralle että murskeelle oli noin 100 µm.
- Tehty koerakenne pystyttiin mitoittamaan etukäteen melko hyvin.
  - Vaikka rakentaminen tehtiin varsin huolellisesti, päällysteen paksuudessa, kantavuuksissa sekä kerrosten tiiviyksissä oli merkittäviä vaihteluita. Rakenteiden esikuormitus ennen testausta tasoitti hieman näitä eroja.
  - Muodonmuutostenmittaustulokset olivat letkupainumamittauksia lukuunottamatta luotettavia.
  - Suoritettujen mallinustarkastelujen perusteella voidaan todeta, että koerakenteissa kuormitusvaiheessa tapahtuvia muodonmuutoksia ja jännityksiä voidaan kohtuullisesti arvioida melko karkeillakin lähtöarvoilla ja malleilla.
  - Muodonmuutosmittaustulosten perusteella voidaan päätellä liukupinnan sijaintia eri rakenteissa.
    - Jyrkkäluiskainen rakenne oli suurimmilla kuormituksilla jo hyvin lähellä murtorajatilaa ja syntyneet muodonmuutokset olivat suuria. Suurimmat vaakasiirtymät luiskassa sijaitsivat sorakerroksessa, joka viittaa siihen, että koko luiska liikkui vaakasuuntaan merkittävästi ja liukupinta sijaitsi syvemmillä sorakerroksessa.
    - Loivaluiskaisen rakenteen suurimmat vaakasiirtymät tapahtuivat luiskan yläosissa. Pääosa siirtymistä sekä vaaka- että pystysuuntaan tapahtui rakenteen yläosissa, joten liukupintakin on sijainnut pääosin murskekerroksessa.
    - Luiskattomassa rakenteessa liukupinta kulki murskekerroksen alaosan kautta ja nousi ylös heti kuormitusalueen ulkopuolella.
  - Sorakerrokselle mittauksista takaisinlasketut jäykkyysmoduulit olivat pienempiä kuin laboratoriokeilla määritetyt ja savikerroksen takaisinlasketut moduulit olivat suurempia. Vastaavasti havaittiin, että mittauksien mukaan sorakerrokseen keskittyy vähemmän ja savikerroksen yläosaan enemmän jännityksiä kuin mallinnuksen perusteella voitiin ennakoita.
  - Urautumisenopeus kussakin kuormitusportaassa pieneni kuormien määrän kasvaessa.
  - Urasyvyyden, luiskan kaltevuuden sekä kuormituksen etäisyyksien avulla johdettiin tienpoikkileikkauksen muotoa kuvaavan GEOM-kertoimen yhtälö parannettavan tierakenteen mitoittamista varten. Tällä kertoimella voidaan arvioida poikkileikkauksen vaikutusta urautumisnopeuteen.

## 10 VIITTEET

Belt J., Lämsä V-P. ja Ehrola E., Kevytpäällysteisten teiden rakenteen parantaminen. Mitoitusmenettely. Tiehallinnon selvityksiä 85/2001. Helsinki 2001. 63 s.

Kangas H. ja Törnqvist J. Tutkimusaltaan vaikutus rakenteiden muodonmuutoksiin HVS-kuormituksessa. Luonnos 6.2.2001. 15 s.

Korkiala-Tanttu L., Rathmayer H. ja Kangas H., Performance evaluation of a Bi-component geotextile in accelerated pavement test. Seventh International Conference on Geosynthetics 22.9.-27.9.2002 Nice. In print.



Tielaitos. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset (TYLT). Osa Penger- ja kerrosrakenteet. TIEL 2212460-94. Helsinki. 1994.

Vuorimies Nuutti. Percoasemamittaukset kevytpäällysteisten teiden koerakenteista Otaniemessä 2001. Luonnos 2002.

## 11 LIITTEET

- Liite 1. Eri kerrosten yläpintojen vaaitustulokset
- Liite 2. Rakennekerrosten tiiviysmittaukset
- Liite 3. Rakennekerrosten kantavuusmittaukset
- Liite 4. Testausalueiden kartta ja poikkileikkaukset
- Liite 5. Pudotuspainolaitemittaukset ennen koestusta
- Liite 6. Radiometrinen mittausten tulokset ennen koestusta
- Liite 7. Huokospainemittaukset
- Liite 8. Maanpainemittaukset
- Liite 9. Kiihtyvyyssanturimittaukset
- Liite 10. Profilometri- ja oikolautamittaukset
- Liite 11. Loadman mittaukset
- Liite 12. Murskeen muodonmuutokset
- Liite 13. Soran muodonmuutokset
- Liite 14. Saven muodonmuutokset
- Liite 15. Letkupainumamittaukset
- Liite 16. Sivusiirtymät
- Liite 17. Vauriokartoitukset
- Liite 18. Laskentaverkko, materiaalien tilavuusmoduulit, siirtymien tasavokäyrät laskentamallissa ja elementtien tila kuormitustasossa, luiskan kaltevuus 1:1.5, kuorma 50 kN.
- Liite 19. Päätulosten vertailu eri luiskan kaltevuuksilla, kuorma 50 kN. Jännitykset. Päätulosten mitatut ja lasketut arvot luiskan kaltevuudella 1:3.0, kuormat 30, 40 ja 50 kN. Jännitykset.

## ERI KERROSTEN YLÄPINTOJEN VAAITUKSET JA KERROSTEN KESKIMÄÄRÄISET PAKSUUDET

**Saven pinta**  
**Vaaituspäivä:** 27.10.2000 / jue

	Luiskaton	Luiska 1:3	Luiska 1:1,5	Suunniteltu
keskiarvo	15.739	15.738	15.746	+15.75
hajonta	0.012	0.011	0.010	
min	15.722	15.713	15.729	
max	15.762	15.754	15.767	

### Sorakerroksen pinnan vaaitukset alueiden keskimmäiseltä vaaituslinjalta

**Vaaituspäivä:** 13.11.2000 / jue

	Luiskaton	Luiska 1:3	Luiska 1:1,5	Suunniteltu
keskiarvo	15.951	15.950	15.959	+15.95
hajonta	0.005	0.005	0.003	
min	15.939	15.934	15.954	
max	15.966	15.960	15.967	
kerrospaksuus	0.212	0.212	0.213	

**Murskeen pinta**  
**Vaaituspäivä:** 15.11.2000 / jue

	Luiskaton	Luiska 1:3	Luiska 1:1,5	Suunniteltu
keskiarvo	16.348	16.343	16.362	+16.35
hajonta	0.007	0.007	0.004	
min	16.337	16.329	16.351	
max	16.359	16.356	16.368	
kerrospaksuus	0.396	0.393	0.402	

**Päällysteen pinta**  
**Vaaituspäivä:** 24.11.2000 / jue

	Luiskaton	Luiska 1:3	Luiska 1:1,5	Suunniteltu
keskiarvo	16.395	16.380	16.403	+16.40
hajonta	0.002	0.006	0.003	
min	16.391	16.369	16.397	
max	16.398	16.389	16.407	
kerrospaksuus	0.047	0.037	0.041	

Eri kerrosten keskimääräiset paksuudet.

Kerros ja suunniteltu paksuus	Luiskaton	Luiska 1:3	Luiska 1:1,5
Päällyste 40 mm	47	37	41
Murske 400 mm	396	393	402
Sora 200 mm	212	212	213

## RAKENNEKERROSTEN TIIVIYSMITTAUKSET

*Sorakerroksen Troxler ja vesivolymetrikoetulokset. Laboratoriokokeiden mukainen maksimikuivatilavuuspaino on 21,3 kN/m<sup>3</sup>. Tiiviysastevertailu on tehty suhteessa sen ja luotettavampana pidettyjen volymetrimittausten välillä.*

Mittaus 7.11.2000	Vesipitoisuus w-% Troxler / vesivolymetri	Tilavuuspaino, kN/m <sup>3</sup> Troxler / vesivolymetri	Kuiva- tilavuuspaino kN/m <sup>3</sup> Troxler / vesivolymetri	Tiiviysaste % hiekkavolymetri /maksimikuiva- tilavuuspaino
Luiskaton	7.70 / 9.07	21.56 / 21.27	20.02 / 19.49	91.5
Luiska 1:3	8.37 / 8.05	21.77 / 22.31	20.08 / 20.65	96.9
Luiska 1:1,5	7.27 / 7.83	21.53 / 21.22	20.07 / 19.69	92.4
Keskiarvot	7.8 / 8.3	21.6 / 21.6	20.1 / 19.9	93.6

*Murskekerroksen Troxler ja hiekkavolymetrikoetulokset. Laboratoriokokeiden mukainen maksimikuivatilavuuspaino on 21,9 kN/m<sup>3</sup>. Tiiviysastevertailu on tehty suhteessa sen ja luotettavampana pidettyjen volymetrimittausten välillä.*

Mittaus 15.11.2000	Vesipitoisuus w-% Troxler / hiekkavolymetri	Tilavuuspaino, kN/m <sup>3</sup> Troxler / hiekkavolymetri	Kuiva- tilavuuspaino kN/m <sup>3</sup> Troxler / hiekkavolymetri	Tiiviysaste % hiekkavolymetri /maksimikuiva- tilavuuspaino
Luiskaton	3.26 / 3.3	21.34 / 20.15	20.67 / 19.49	89.0
Luiska 1:3	4.95 / 4.5	19.47 / 21.85	18.58 / 20.91	95.5
Luiska 1:1,5	4.78 / 4.6	20.58 / 21.28	19.65 / 21.28	97.2
Keskiarvot	4.3 / 4.1	20.5 / 21.1	19.6 / 20.6	93.9



## KANTAVUUDEN LAADUNVALVONTAMITTAUKSET

Sorakerroksen Loadman mittaukset eri vaaituslinjoilta

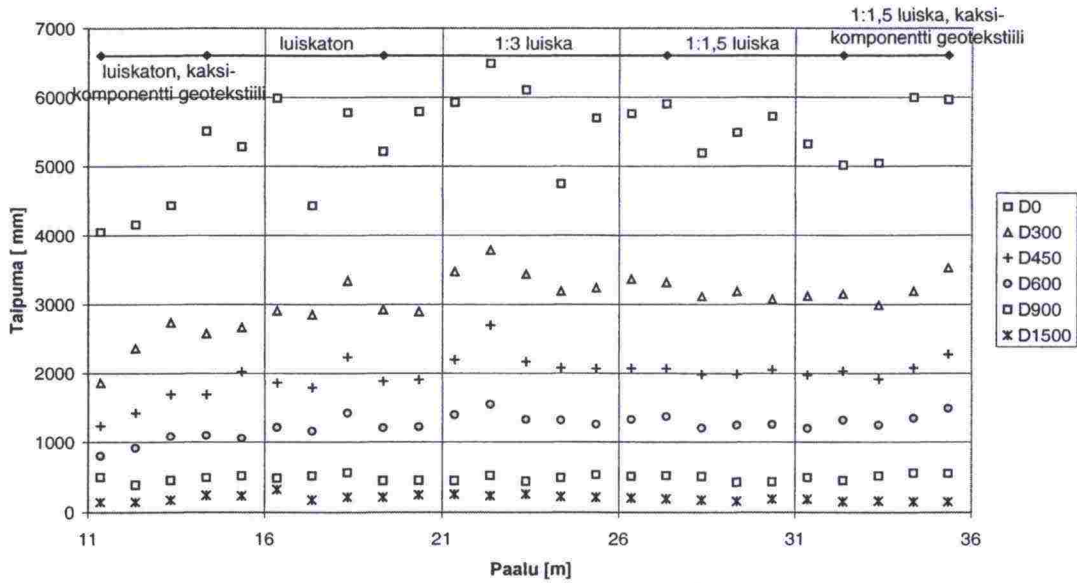
$E_{300}$ (MPa)	Luiskaton	Luiska 1:3	Luiska 1:1,5
Linja 1, piste 1	24	20	23
Linja 1, piste 2	24	19	25
Linja 1, piste 3	23	16	25
Linja 1, piste 4	23	17	24
Linja 1, piste 5	23	15	23
Linja 2, piste 1	21	20	30
Linja 2, piste 2	21	20	27
Linja 2, piste 3	20	20	28
Linja 2, piste 4	20	20	28
Linja 2, piste 5	20	20	28
Linja 3, piste 1	24.0	22.0	23.0
Linja 3, piste 2	23	24	24
Linja 3, piste 3	22	23	25
Linja 3, piste 4	22	23	24
Linja 3, piste 5	22	23	23
<b>Keskiarvo</b>	<b>22.13</b>	<b>20.13</b>	<b>25.33</b>

Murskekerroksen Loadman mittaukset

$E_{300}$ (MPa)	Luiskaton	Luiska 1:3	Luiska 1:1,5
Linja 1, piste 1	35	38	29
Linja 1, piste 2	43	46	46
Linja 1, piste 3	51	46	48
Linja 1, piste 4	52	47	47
Linja 1, piste 5	51	46	51
Linja 2, piste 1	22	26	28
Linja 2, piste 2	34	40	40
Linja 2, piste 3	39	42	41
Linja 2, piste 4	40	44	42
Linja 2, piste 5	40	44	43
Linja 3, piste 1	29	36	25
Linja 3, piste 2	43	51	38
Linja 3, piste 3	48	54	41
Linja 3, piste 4	48	57	42
Linja 3, piste 5	48	56	44
<b>Keskiarvo</b>	<b>43.2</b>	<b>50.8</b>	<b>38</b>

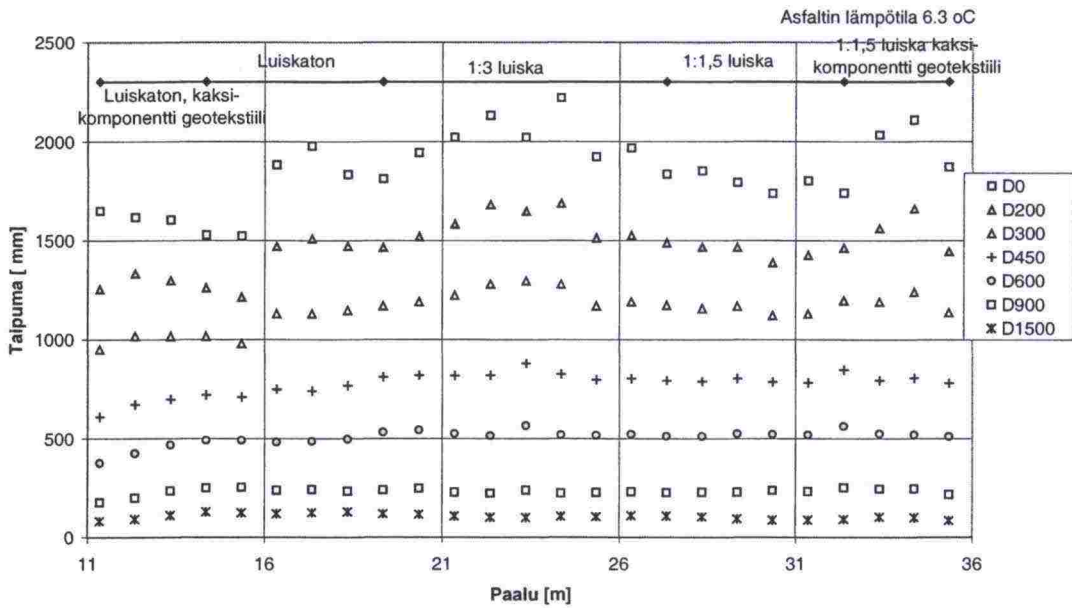
PUDOTUSPAINOLAITEMITTAUKSET

Pudotuspainolaitemittaukset murskeen päältä  $\phi = 450$  mm/ Taipumat [50 kN]



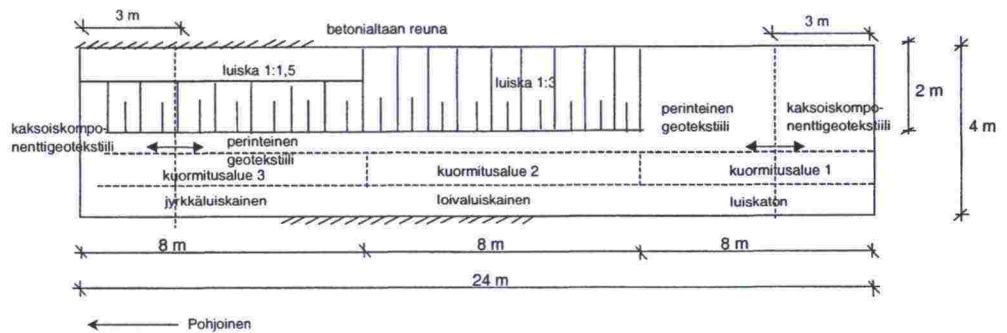
Murskeen päältä mitatut pudotuspainolaitemittausten tulokset. 30.11.2002. Taipumat.

Pudotuspainolaitemittaukset asfaltin päältä / Taipumat [50 kN]

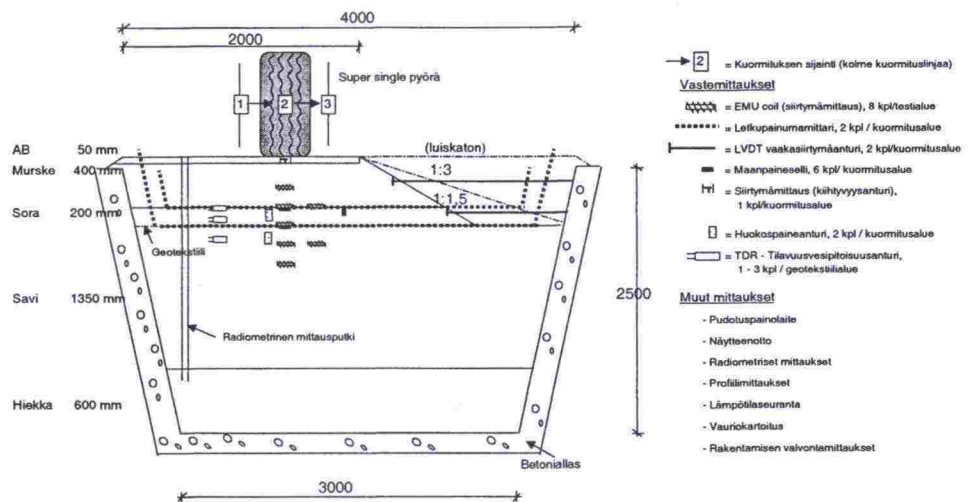


Asfaltin päältä mitatut pudotuspainolaitemittausten tulokset heti rakentamisen jälkeen. 30.11.2002. Taipumat.

## TESTAUSALUEIDEN KARTTA JA POIKKILEIKKAUS



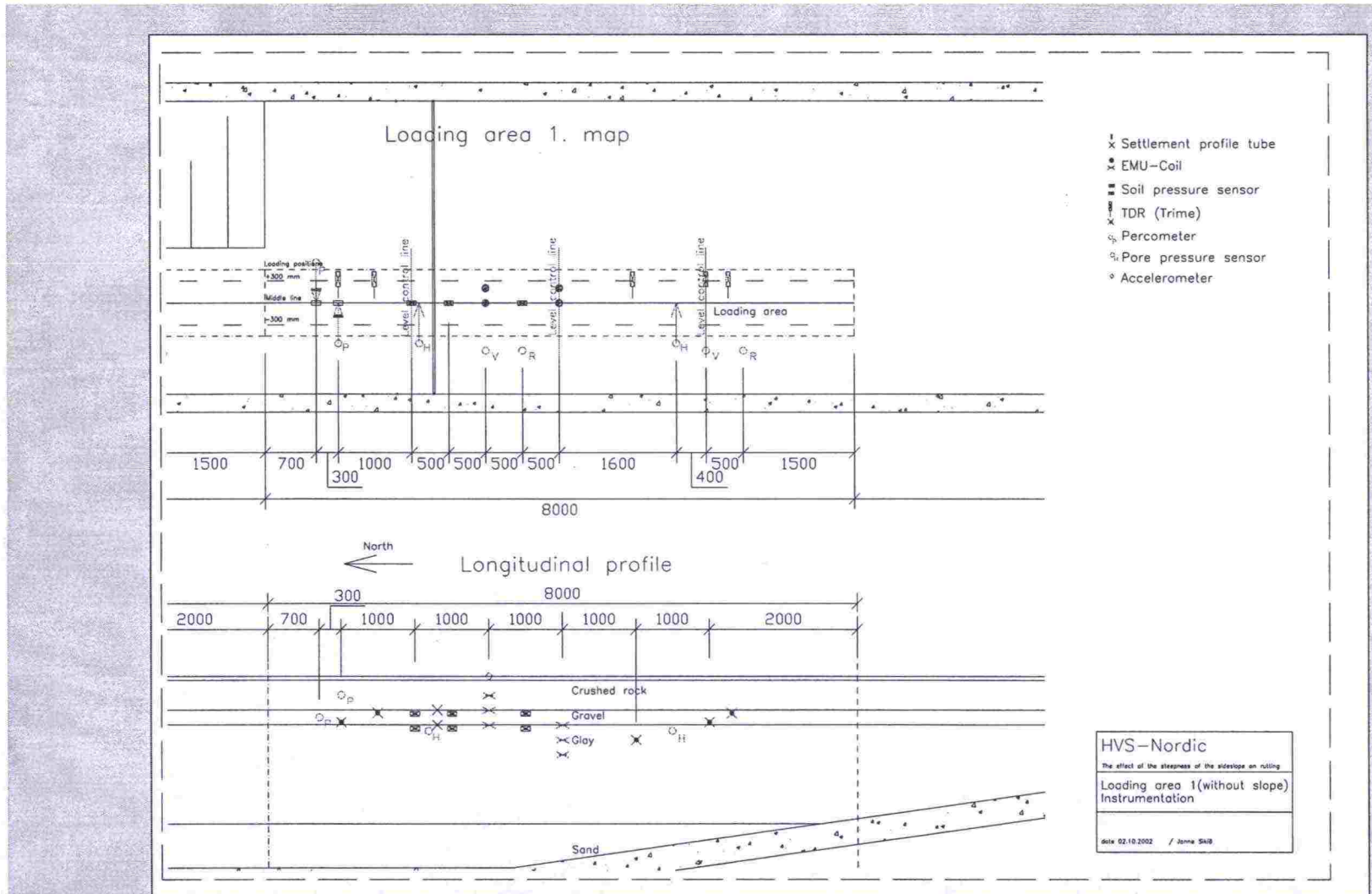
### Testausalueiden kartta



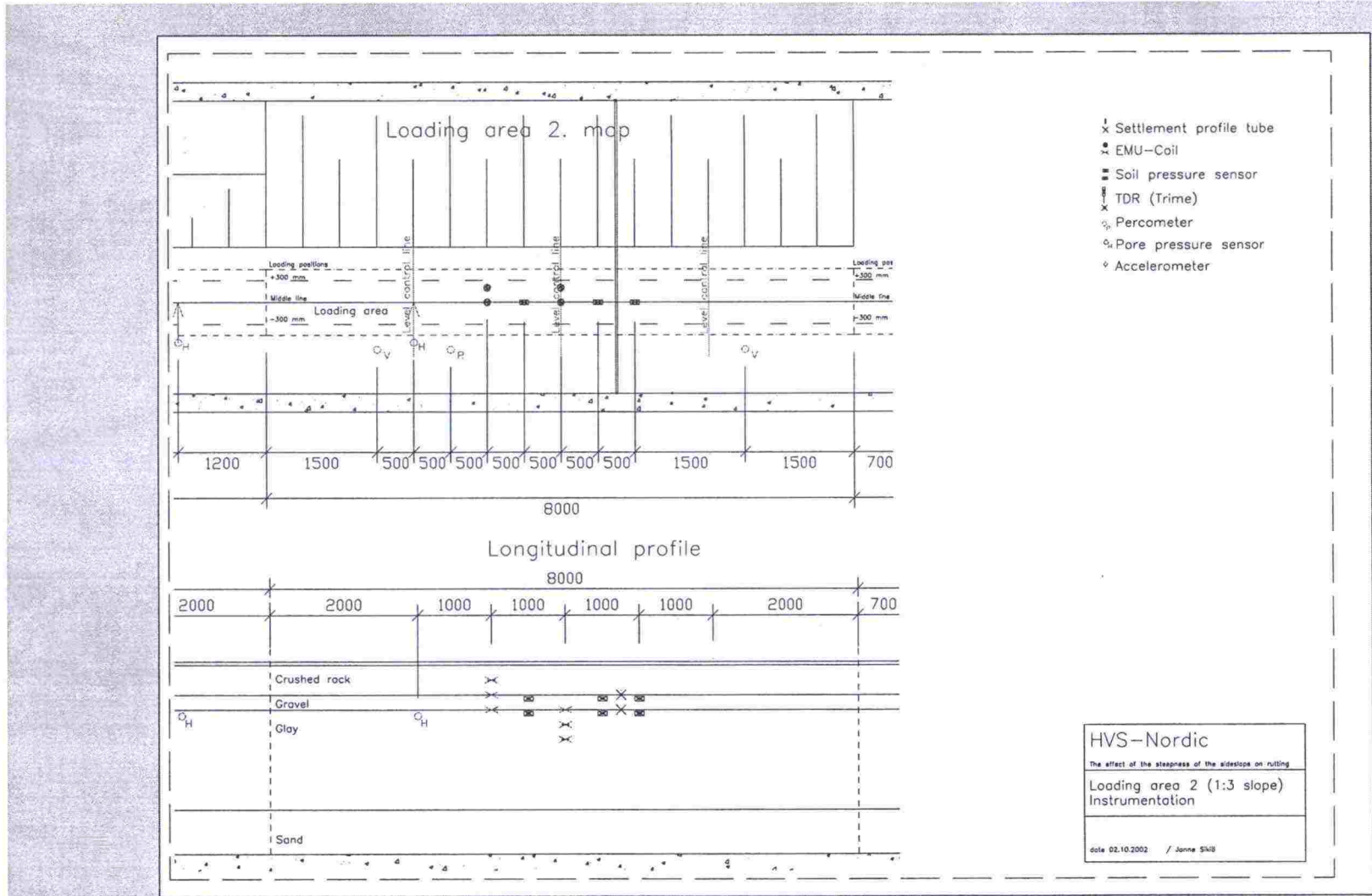
### Poikkileikkaus



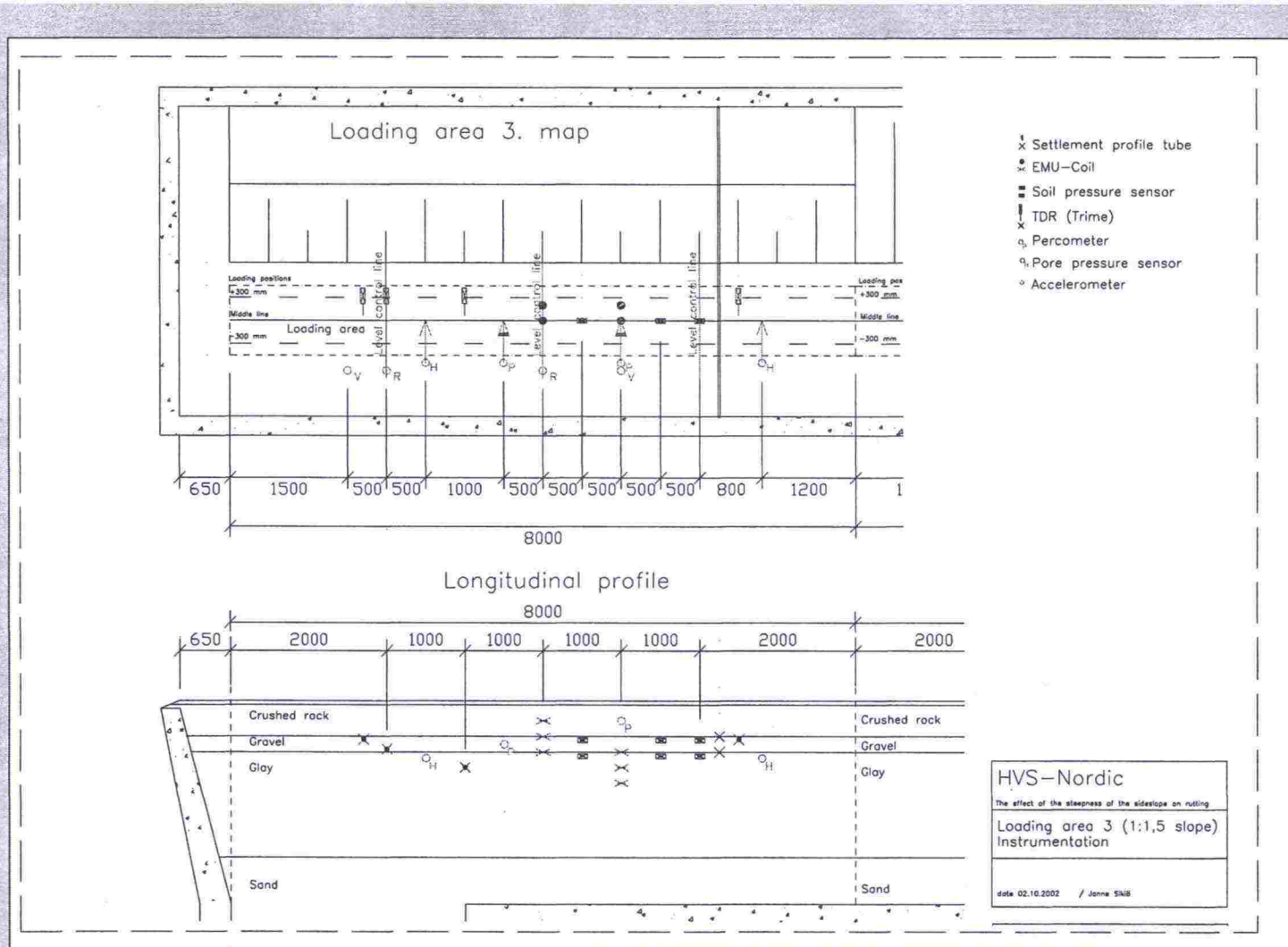
# LUISKATON RAKENNE, INSTRUMENTOINTI, POHJA-, POIKKI- JA PITUUSLEIKKAUS



# LOIVALUISKAINEN (1:3) RAKENNE, INSTRUMENTOINTI, POHJA-, POIKKI- JA PITUUSLEIKKAUS

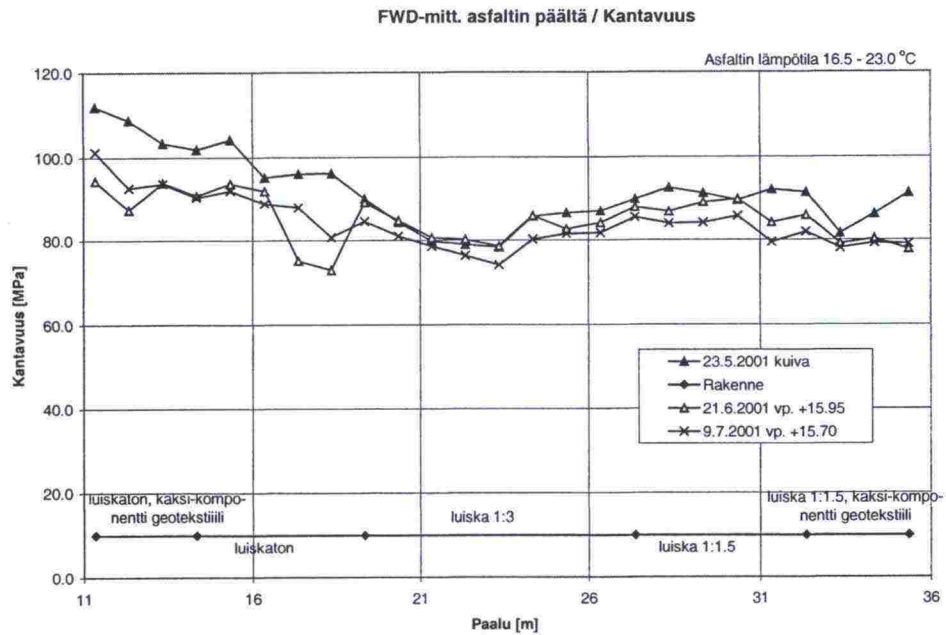


# JYRKKÄLUISKAINEN (1:1,5) RAKENNE, INSTRUMENTOINTI, POHJA-, POIKKI- JA PITUUSLEIKKAUS

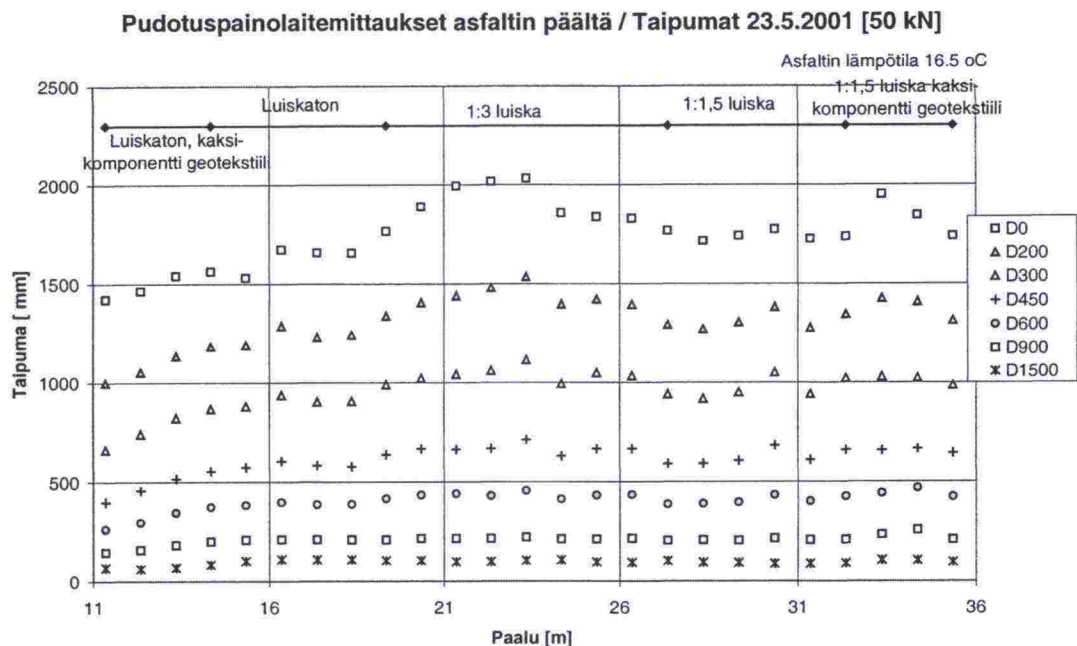




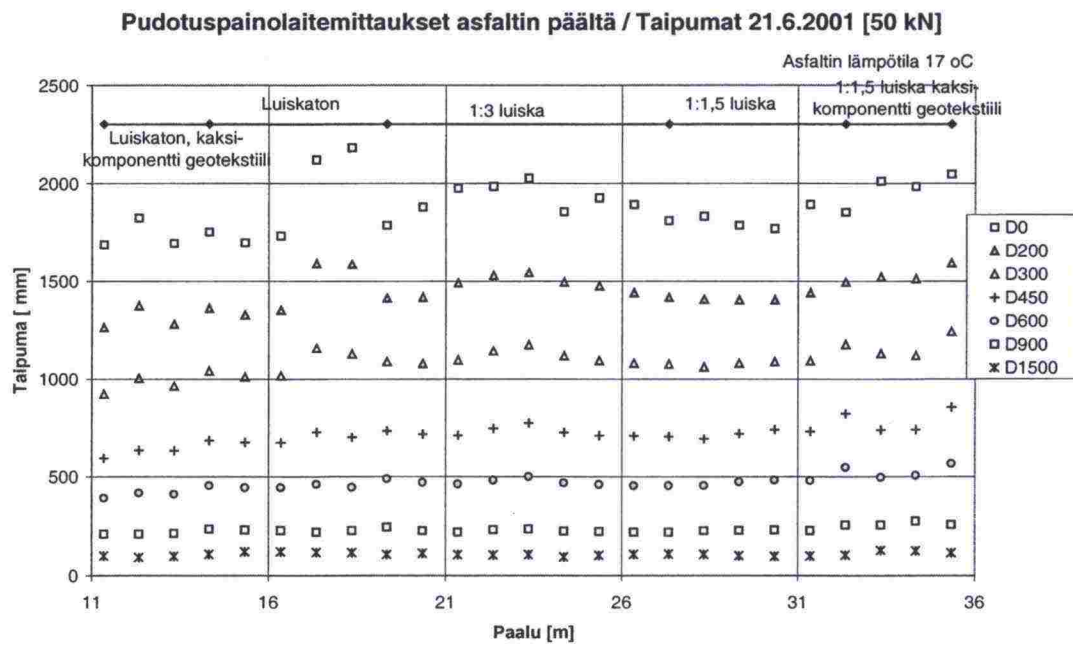
## PUDOTUSPAINOLAITEMITTAUKSET ENNEN KOESTUSTA



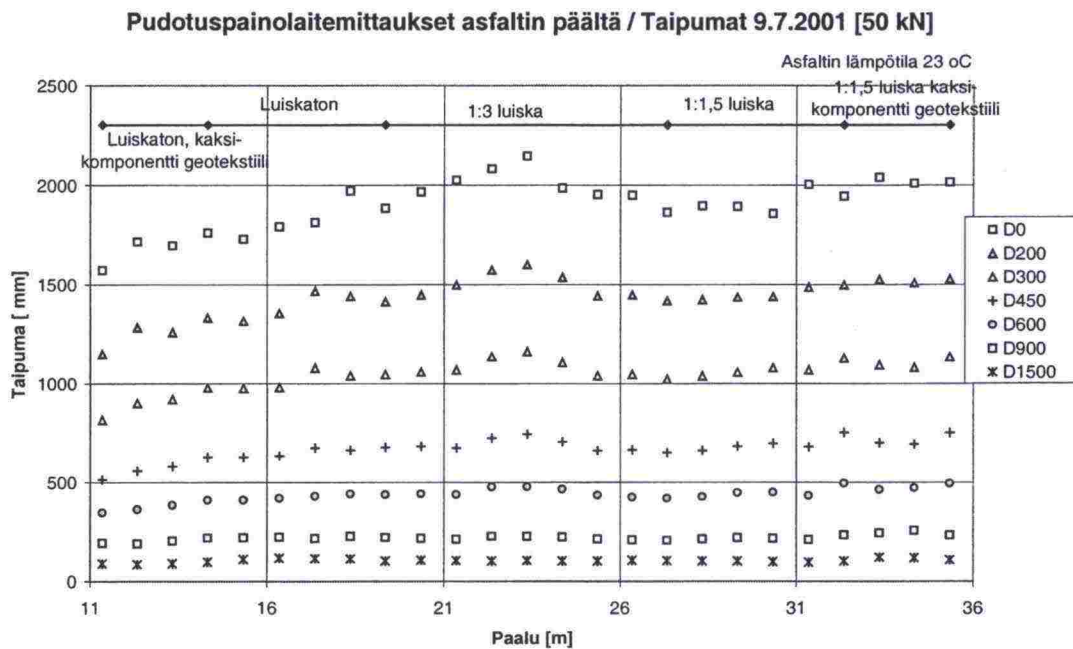
Kuva 1. Kantavuusmittausten tulokset 23.5., 21.6. ja 9.7.2001.



Kuva 2. Kantavuusmittaukset 23.5.2001, taipumat.



Kuva 3. Kantavuusmittaukset 21.6.2001, taipumat.

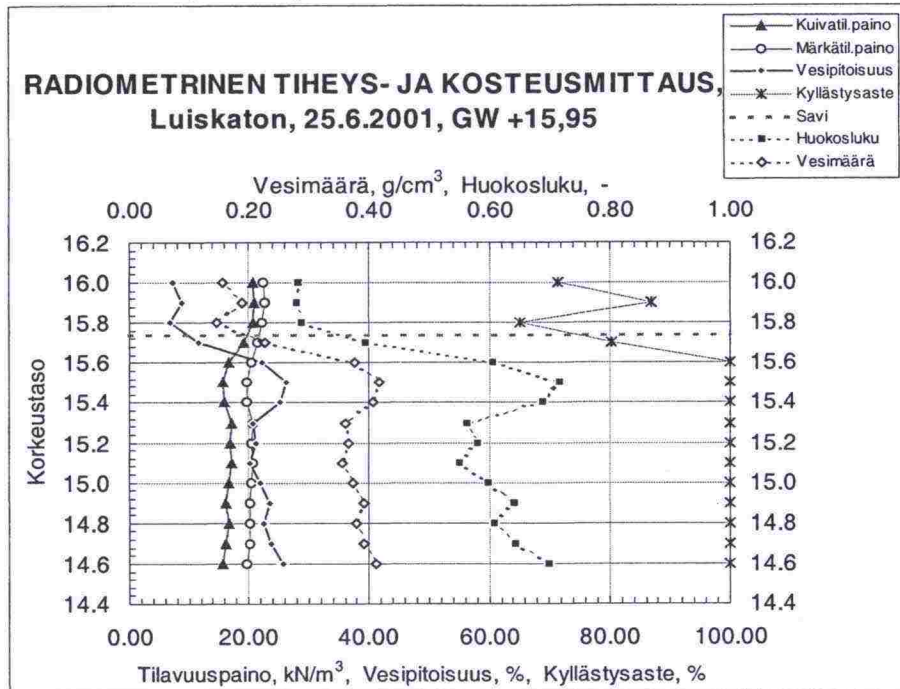


Kuva 4. Kantavuusmittaukset 9.7.2001, taipumat.

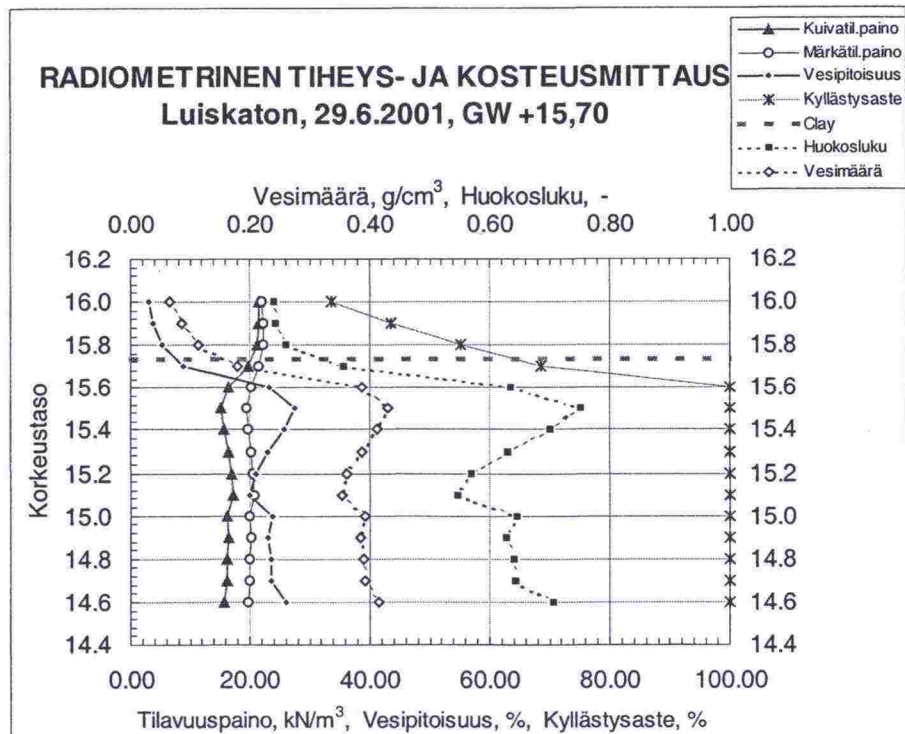
## RADIOMETRISET MITTAUKSET ENNEN KOESTUSTA

25.6.2002 Pohjavedenpinta taso W2 +15,95

29.6.2002 Pohjavedenpinta laskettu tasolle W1 +15,70

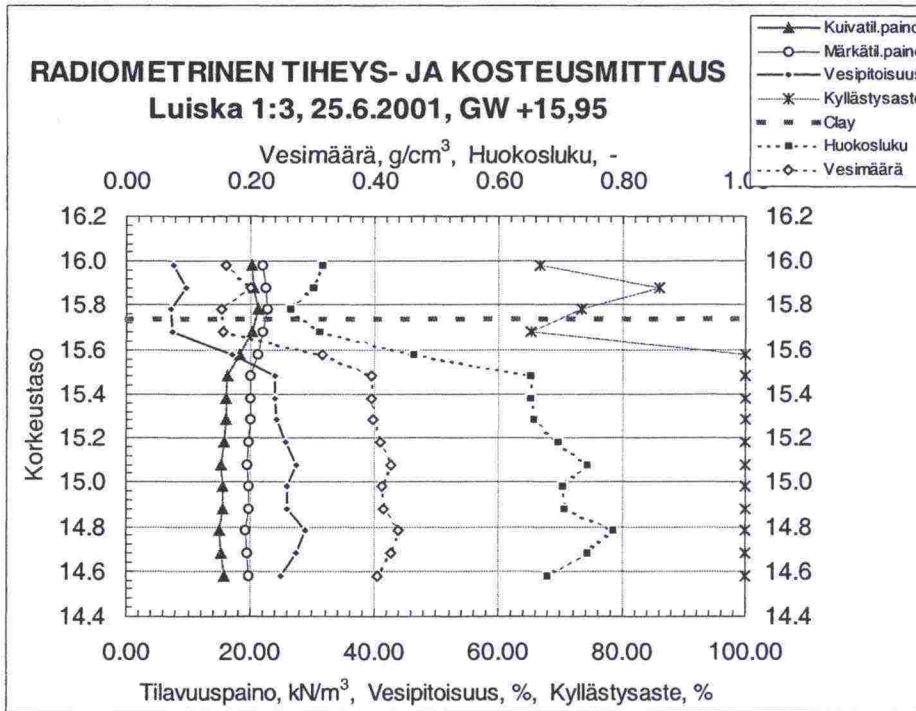


Kuva 1. Luiskaton rakenne, tavanomainen geotekstiili

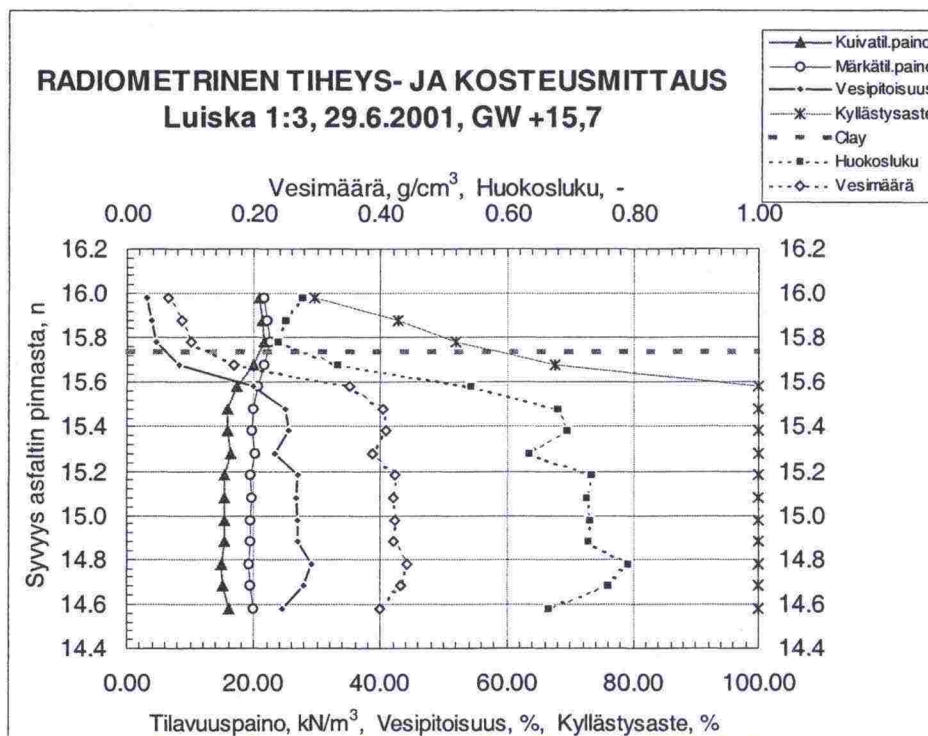


Kuva 2. Luiskaton rakenne, tavanomainen geotekstiili.

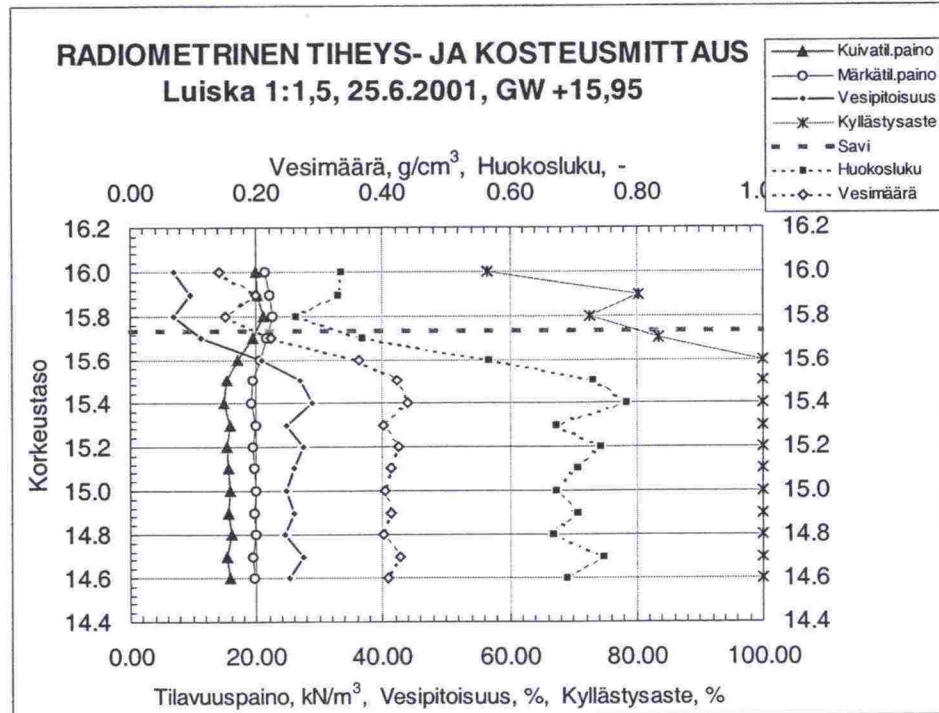




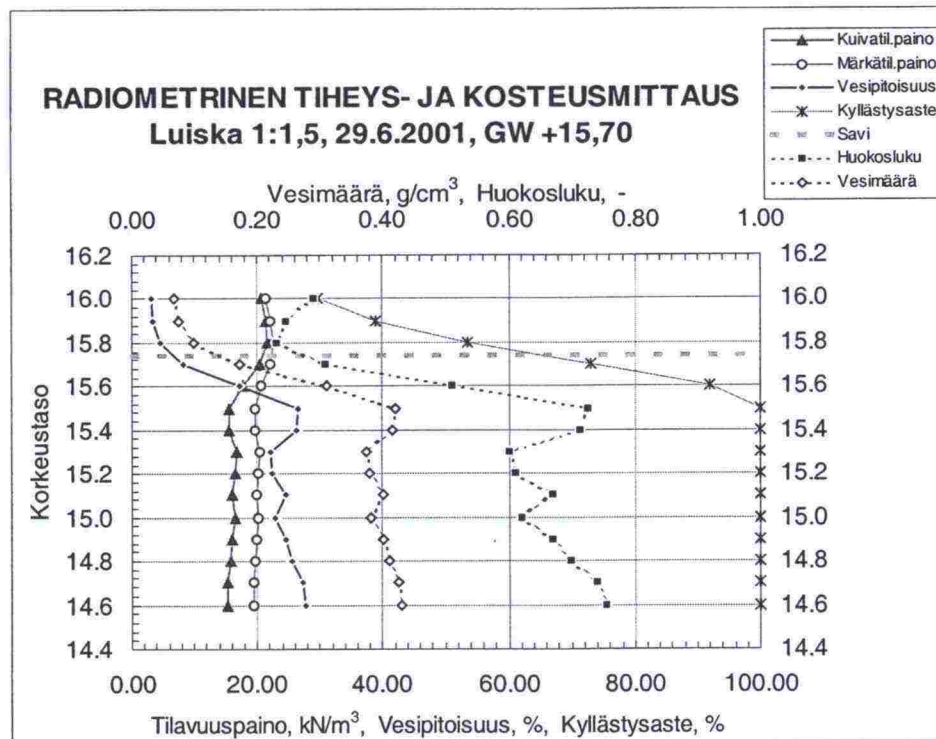
Kuva 3. Luiska 1:3, tavanomainen geotekstiili



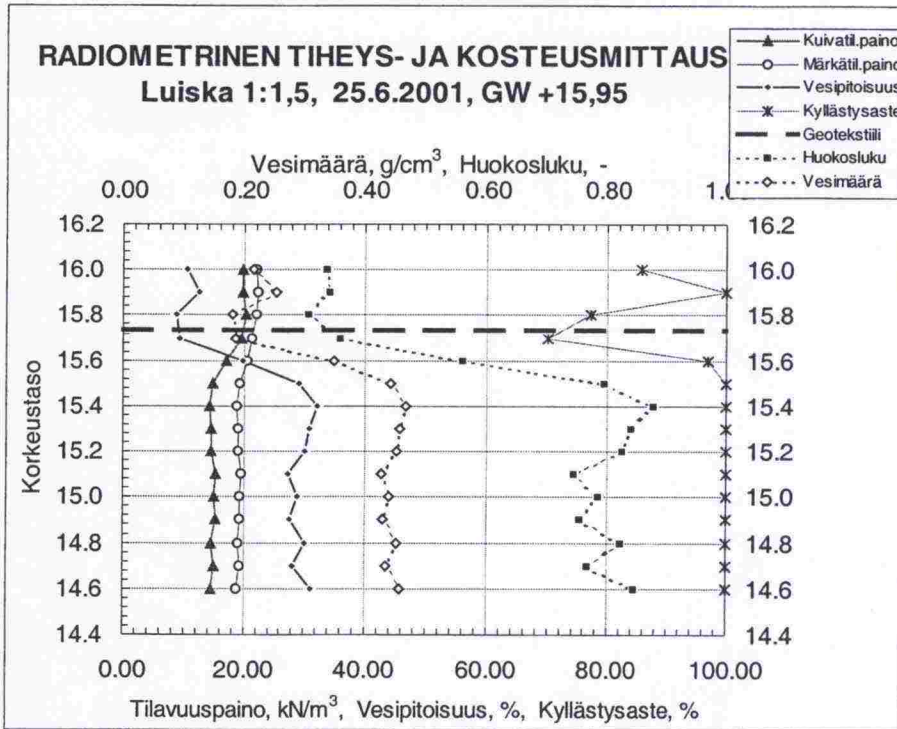
Kuva 4. Luiska 1:3, tavanomainen geotekstiili



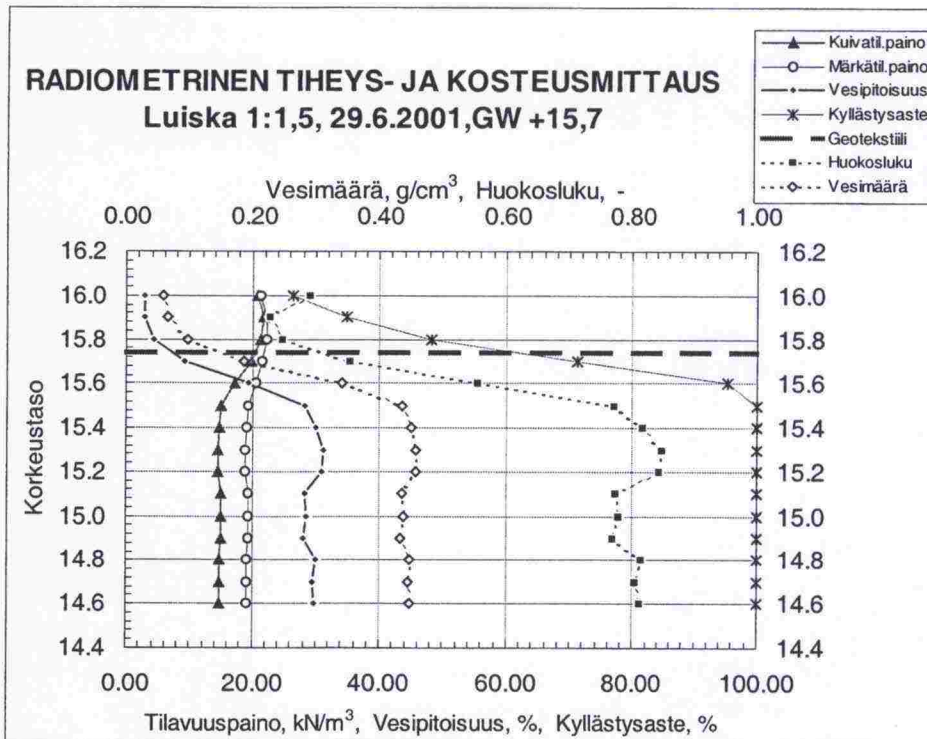
Kuva 5. Luiska 1:1,5, tavanomainen geotekstiili



Kuva 6. Luiska 1:1,5, tavanomainen geotekstiili



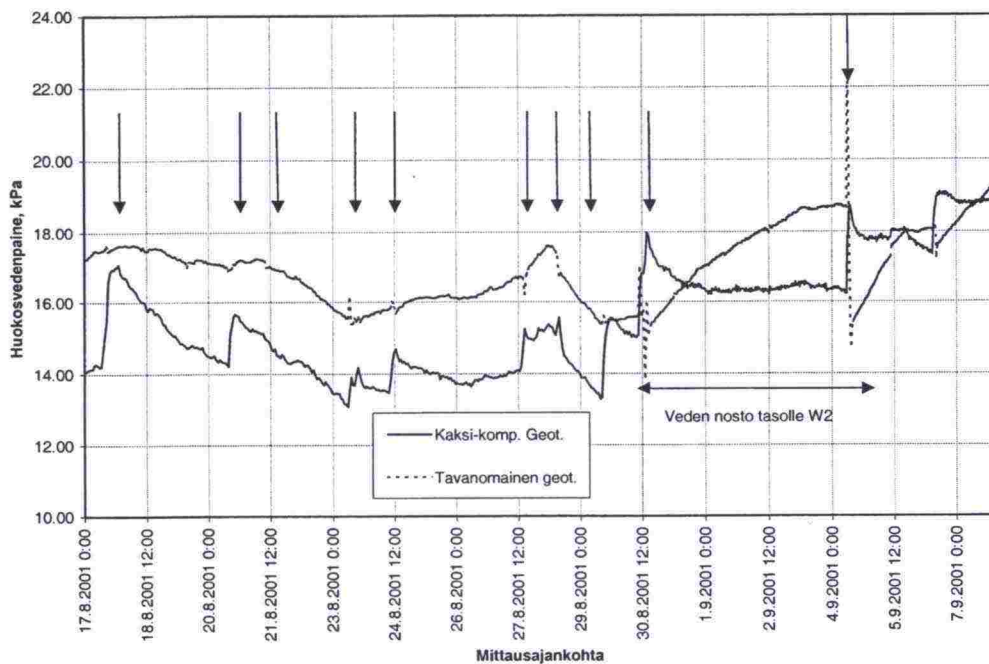
Kuva 7. Luiska 1:1,5, kaksikomponenttigeotekstiili



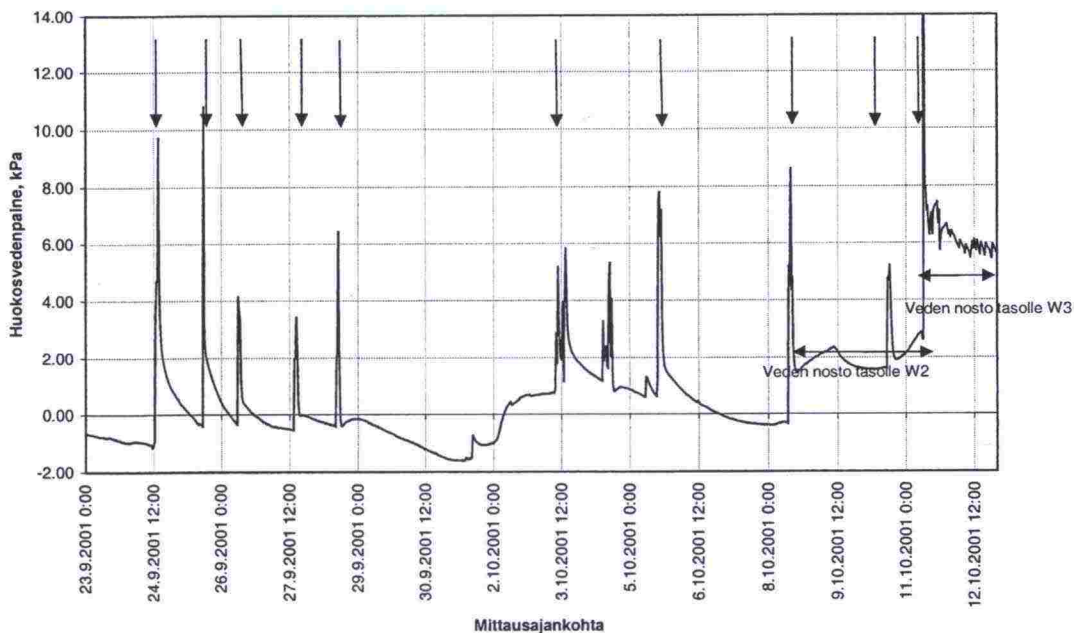
Kuva 8. Luiska 1:1,5, kaksikomponenttigeotekstiili



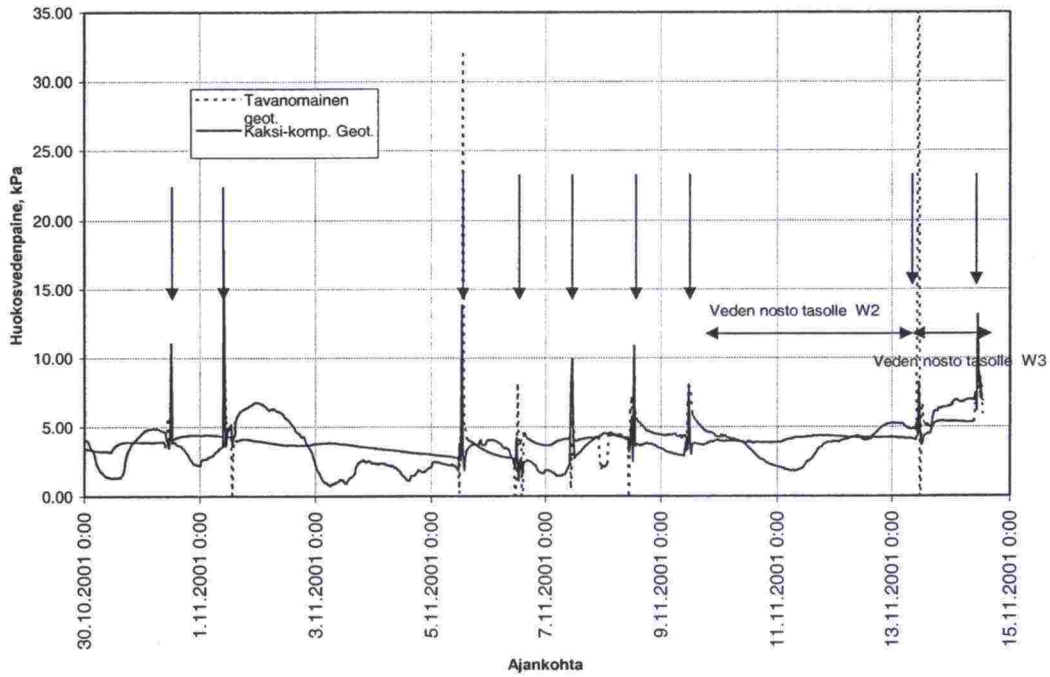
## HUOKOSPAINEMITTAUKSET



Kuva 1. Luiskatun rakenne. Huokospainemittaukset. Nuolet esittävät koestusajankohtia.



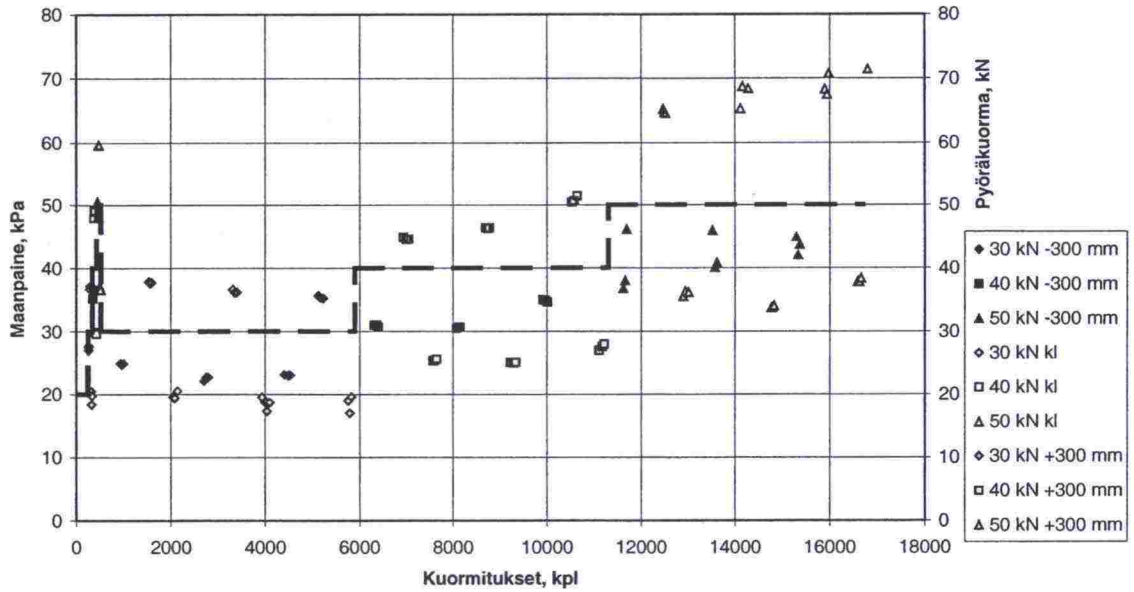
Kuva 2. Luiska 1:3. Huokospainemittaukset. Nuolet esittävät koestusajankohtia.



Kuva 3. Luiska 1:1,5. Huokospainemittaukset. Nuolet esittävät koestusajankohtia.

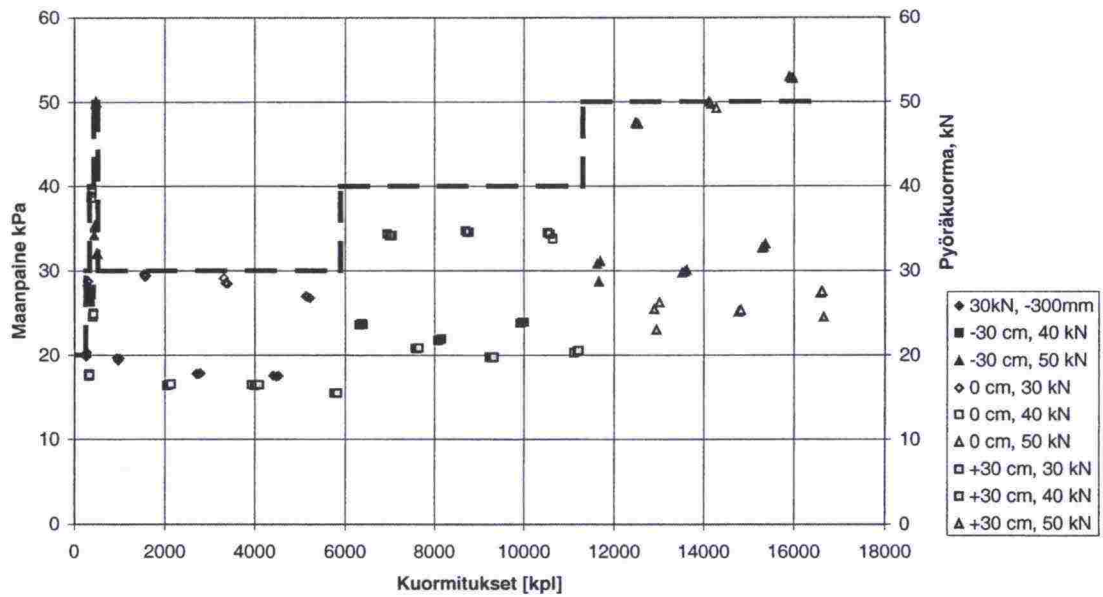
## MAANPAINEMITTAUKSET

Maanpaine sorassa, luiskaton rakenne



Kuva 1. Luiskaton rakenne. Maanpaine soran yläpinnassa.

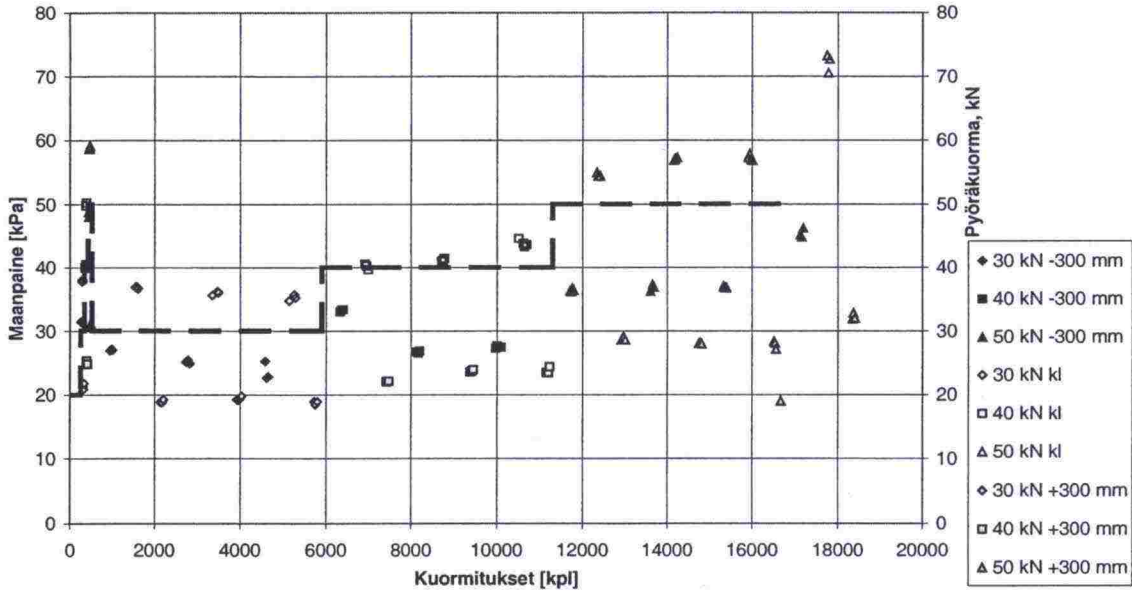
Maanpaine savessa, luiskaton rakenne



Kuva 2. Luiskaton rakenne. Maanpaine savikerroksen yläpinnassa.

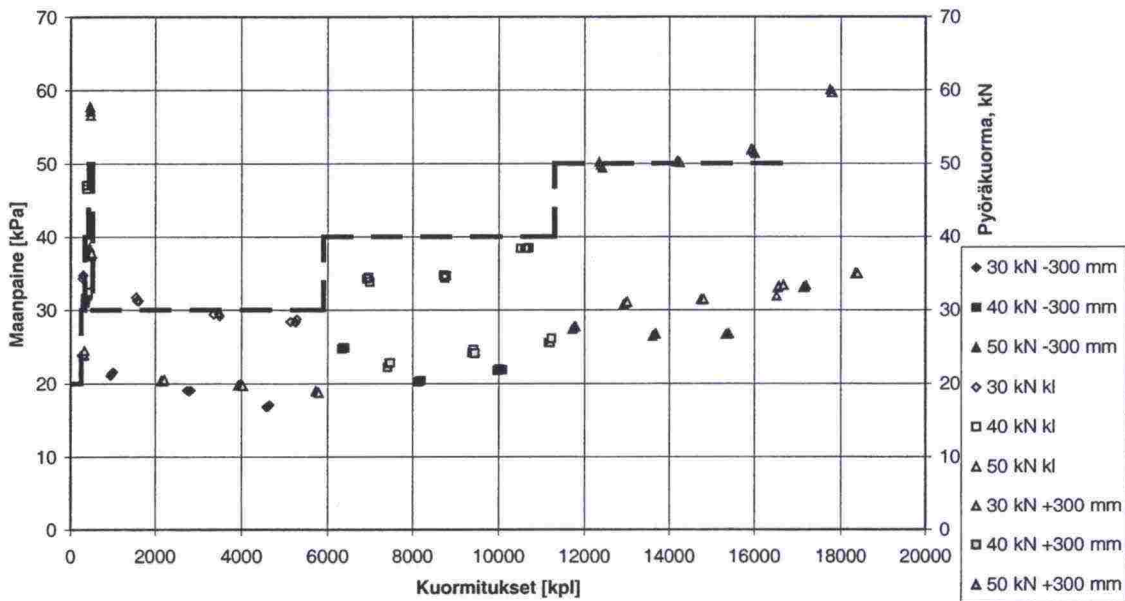


Maanpaine sorassa, 1:3 luiska

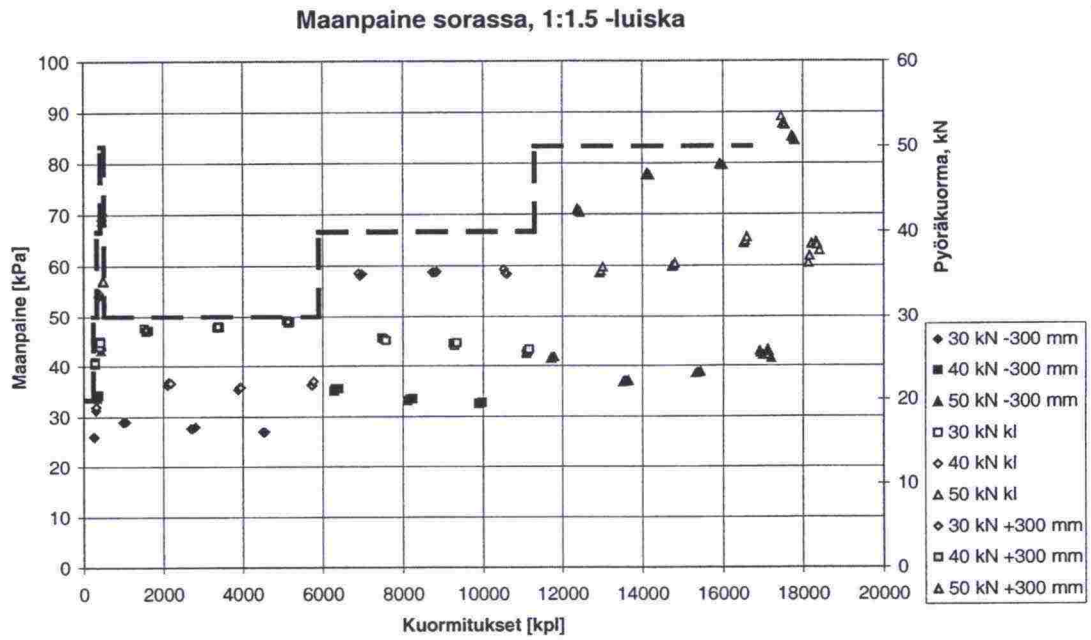


Kuva 3. Luiska 1:3. Maanpaine soran yläpinnassa.

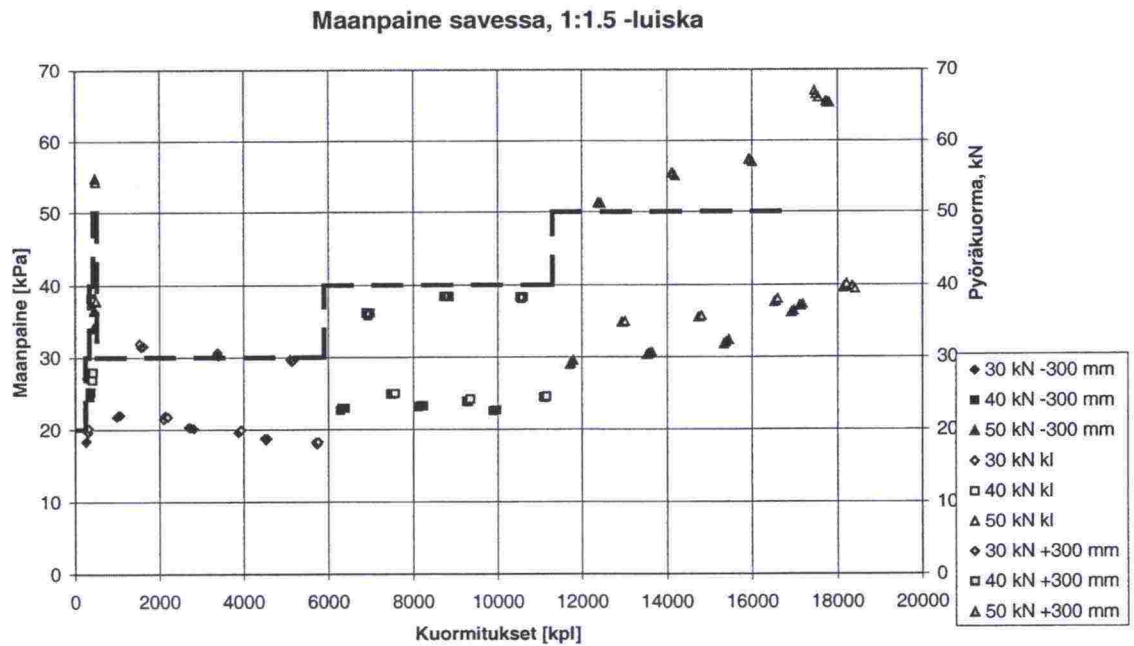
Maanpaine savessa, 1:3 -luiska



Kuva 4. Luiska 1:3. Maanpaine savikerroksen yläpinnassa.

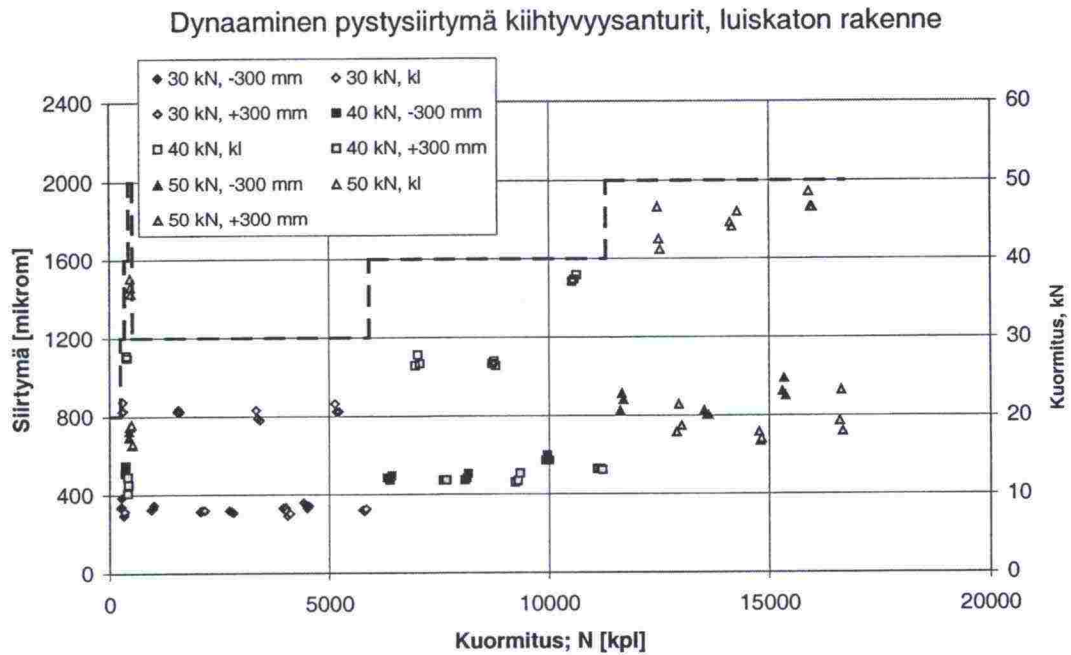


Kuva 5. Luiska 1:1,5. Maanpaine soran yläpinnassa.

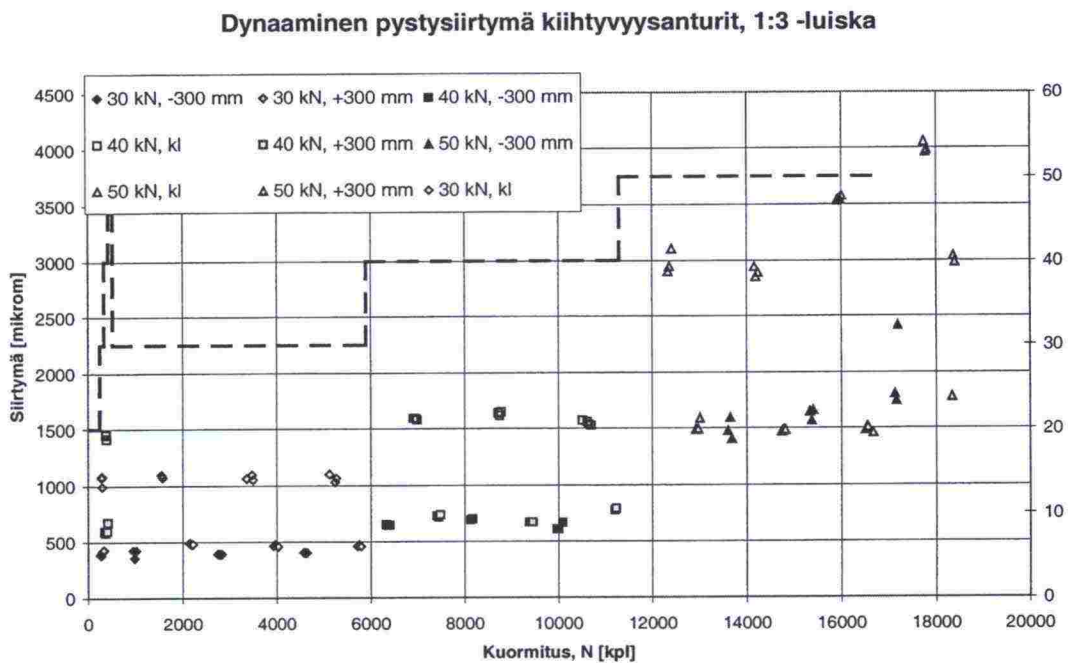


Kuva 6. Luiska 1:1,5. Maanpaine savikerroksen yläpinnassa.

## KIIHTYVYYSANTURIMITTAUKSET



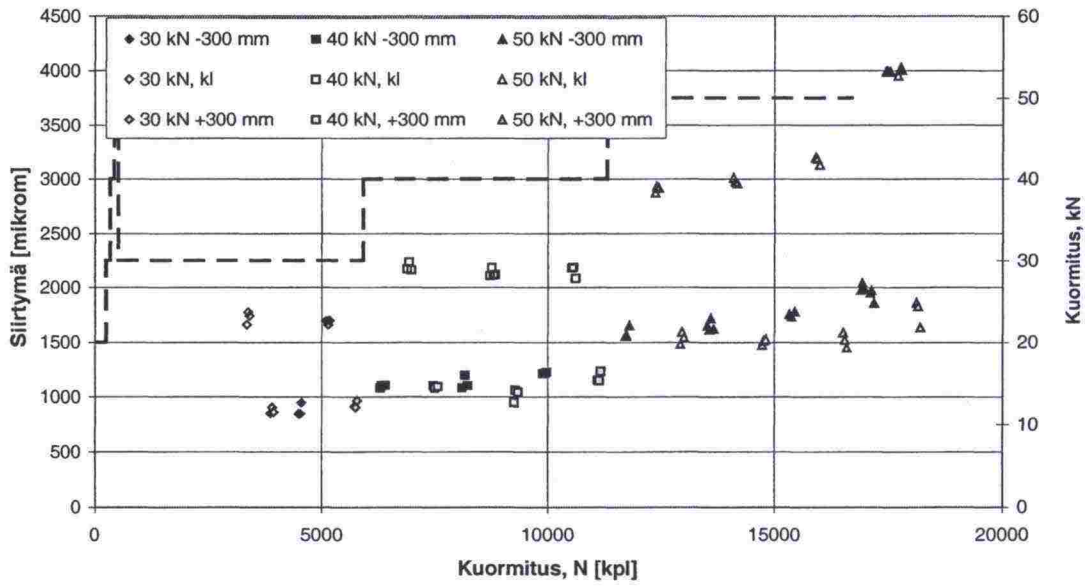
Kuva 1. Hetkellinen pystysiirtymä kiihtyvyyssanturilla, luiskaton koalue.



Kuva 2. Hetkellinen pystysiirtymä kiihtyvyyssanturilla, 1:3 luiska.



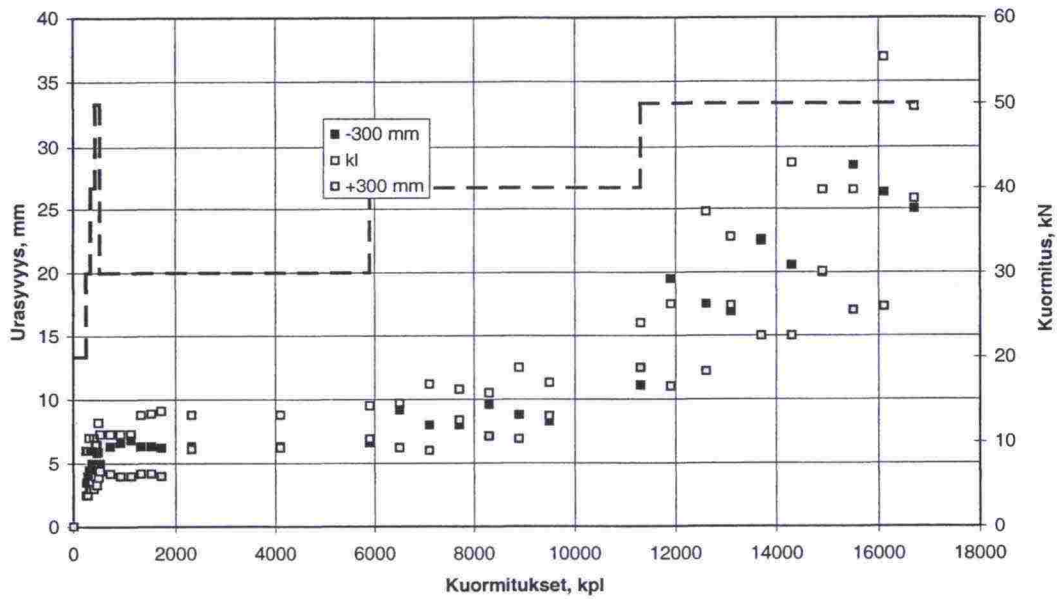
Dynaaminen pystysiirtymä kiihtyvyyssanturit, 1:1.5 -luiska



Kuva 3. Hetkellinen pystysiirtymä kiihtyvyyssanturilla, 1:1,5 luiska.

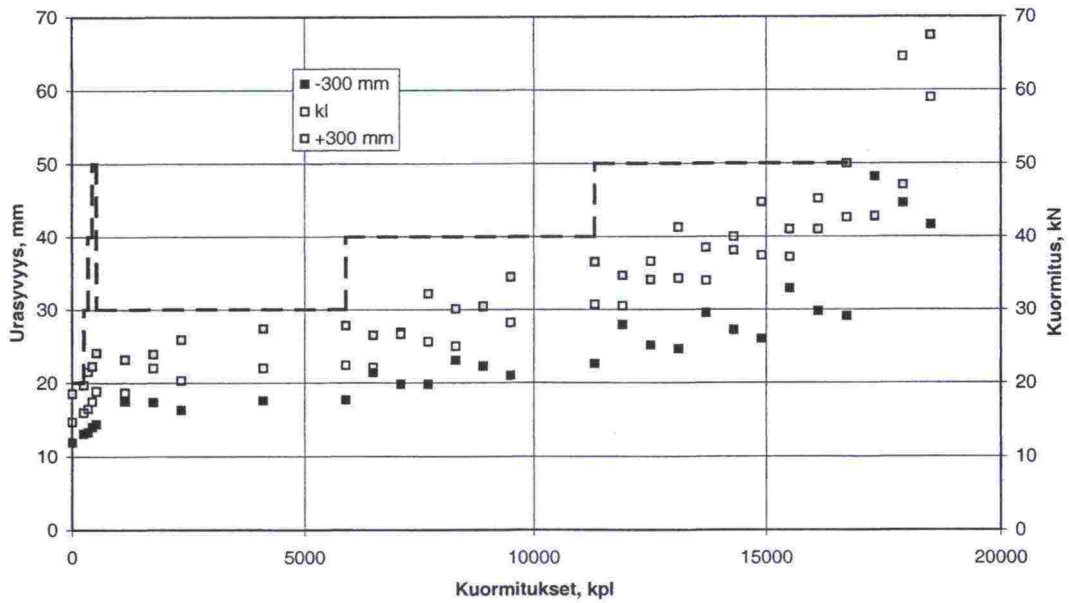
## PROFILOMETRI JA OIKOLAUTAMITTAUKSET

Oikolautamittaukset, luiskaton rakenne



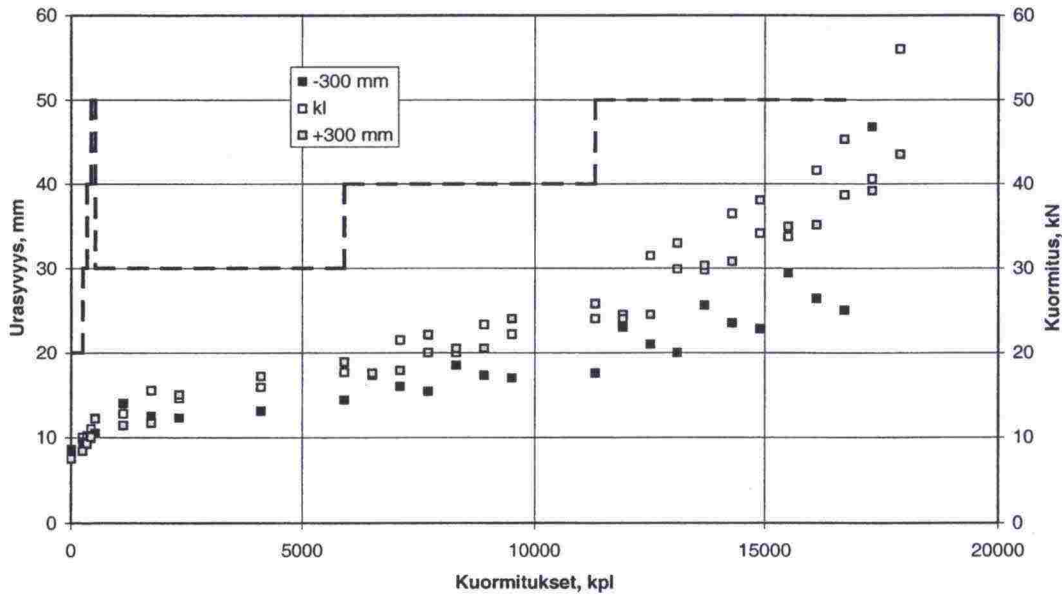
Kuva 1. Oikolautamittaukset, luiskaton koalue.

Oikolautamittaukset, 1:3 luiska

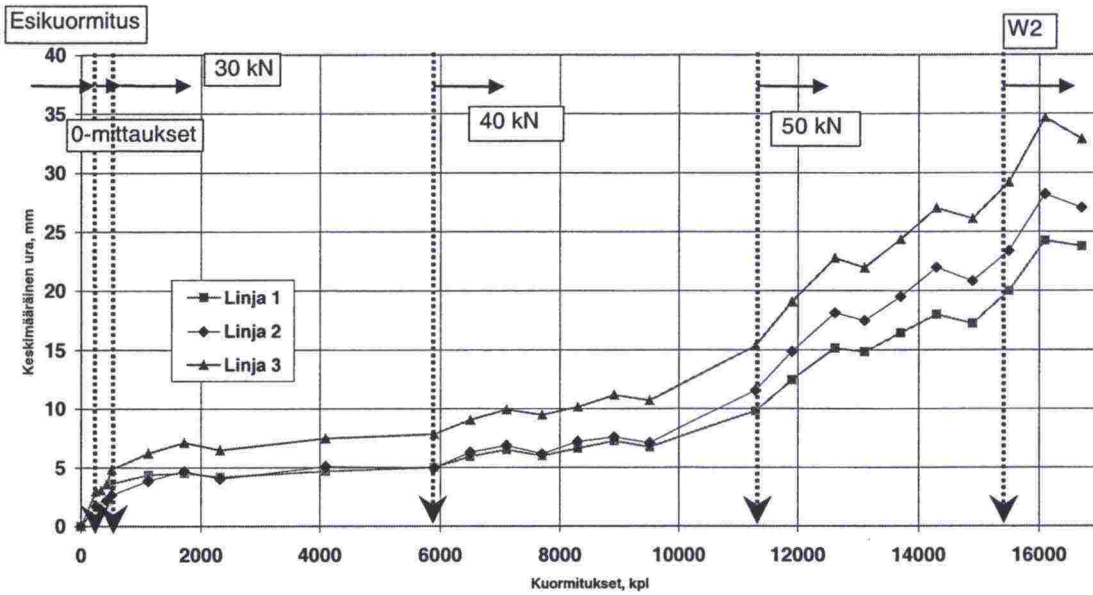


Kuva 2. Oikolautamittaukset, 1:3 luiska.

Oikolautamittaukset, 1:1,5 luiska

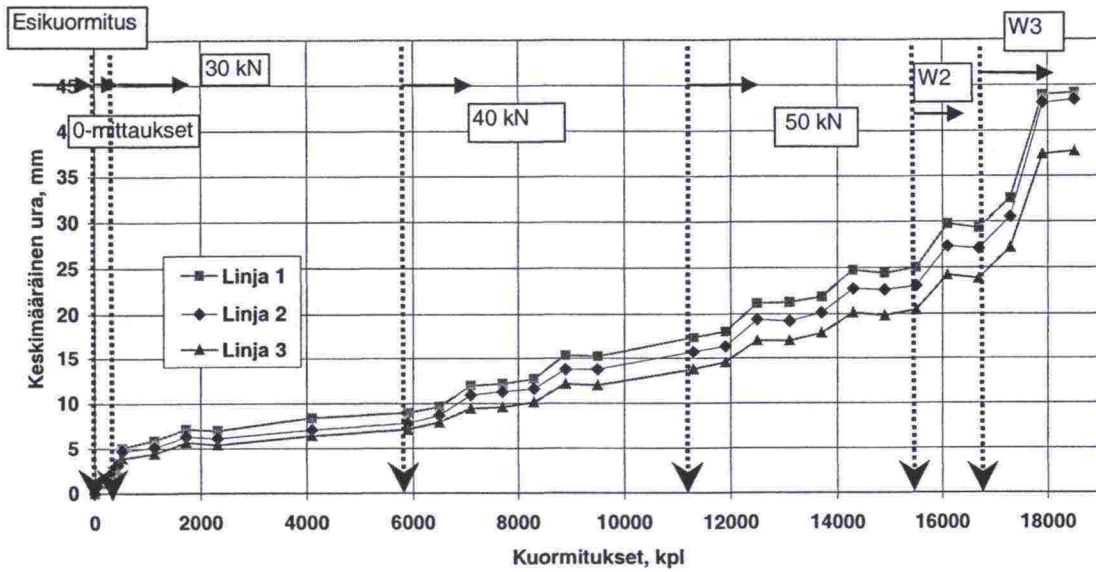


Kuva 3. Oikolautamittaukset, 1:1,5 luiska.

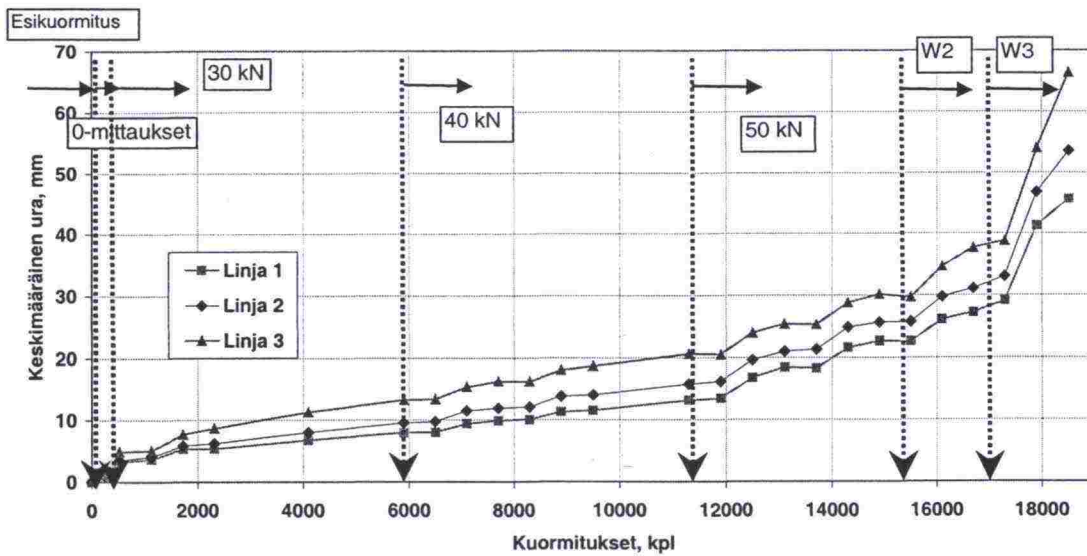


Kuva 4. Profilometrimittaukset, luiskatun alue. Vaaituslinja 1 = Linja 1 jne.





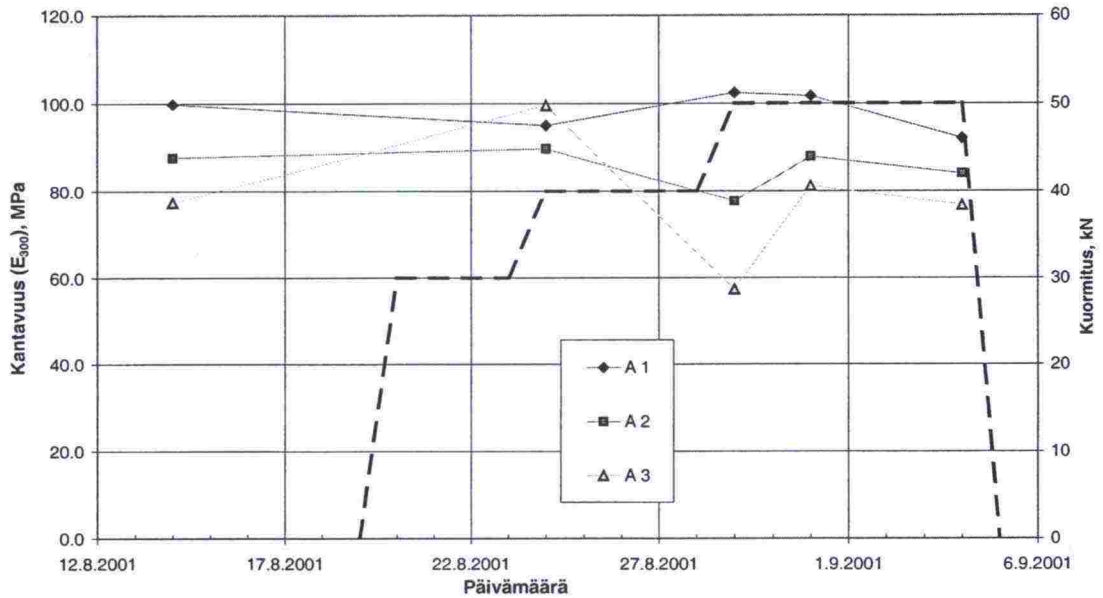
Kuva 5. Profilometrimittaukset, 1:3 luiska. Vaaituslinja 1 = Linja 1 jne.



Kuva 6. Profilometrimittaukset, 1:1,5 luiska. Vaaituslinja 1 = Linja 1 jne.

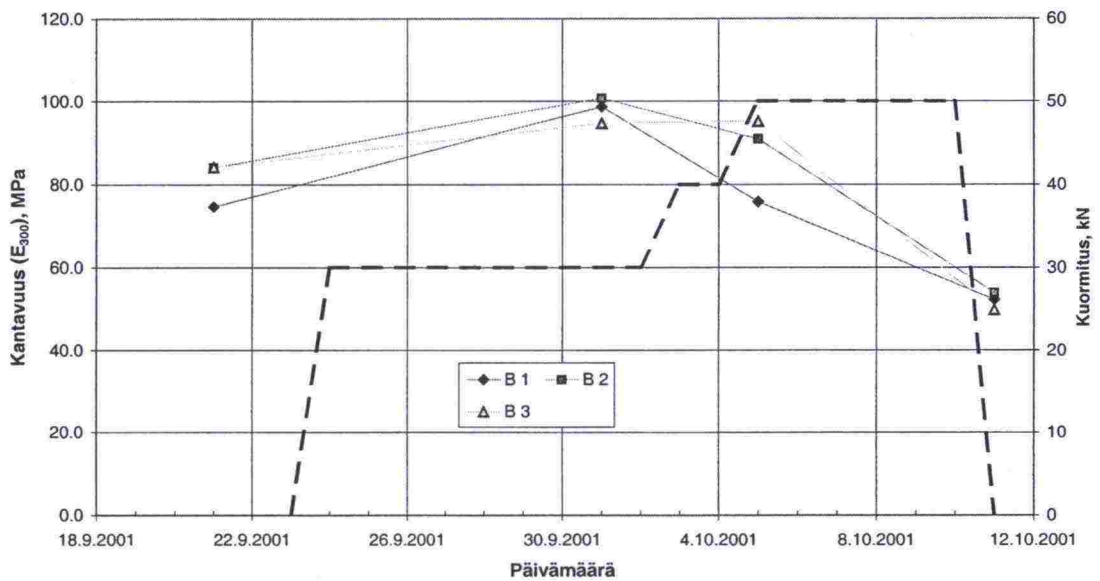
## LOADMAN

LOADMAN-mittaukset päällysteen päältä, luiskaton alue



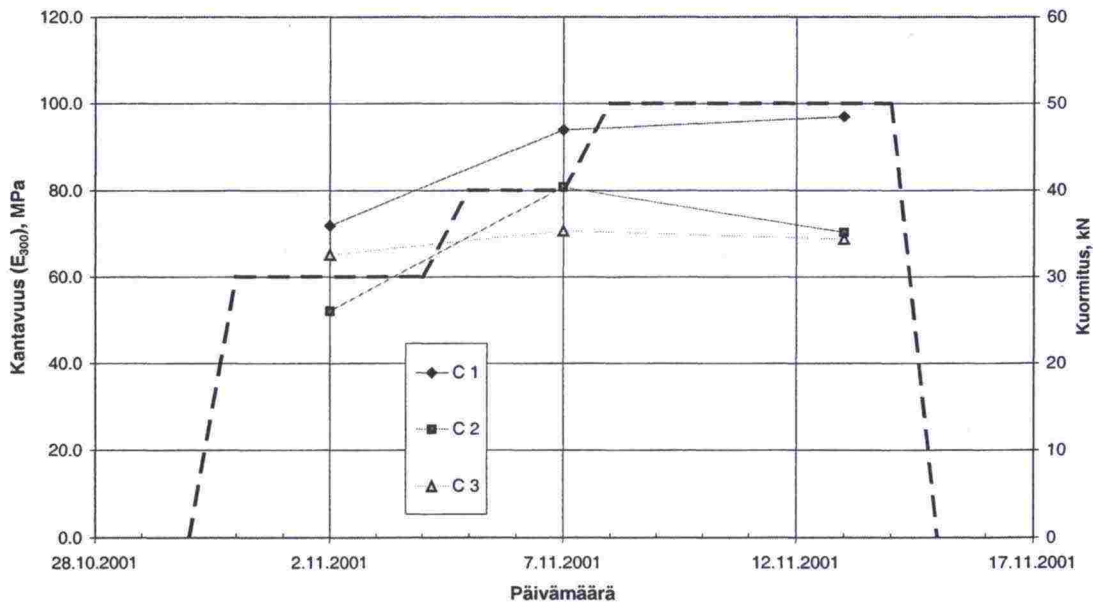
Kuva 1. Loadman-mittaukset asfaltin päältä, luiskaton alue. Mittaukset eri vaaituslinjoilta A1, A2 ja A3. Vaaituslinja A1 sijaitsee kaksikomponenttigeotekstiili-alueella. Linjat A2 ja A3 sijaitsevat tavanomaisen geotekstiilin alueella. 28.8.2001 oli rankkasade ja rakenne kastui.

LOADMAN-mittaukset päällysteen päältä, 1:3 luiska



Kuva 2. Loadman mittaukset asfaltin päältä, 1:3 luiska. Mittaukset eri vaaituslinjoilta B1, B2 ja B3.

## LOADMAN-mittaukset päällysteen päältä, 1:1,5 luiska

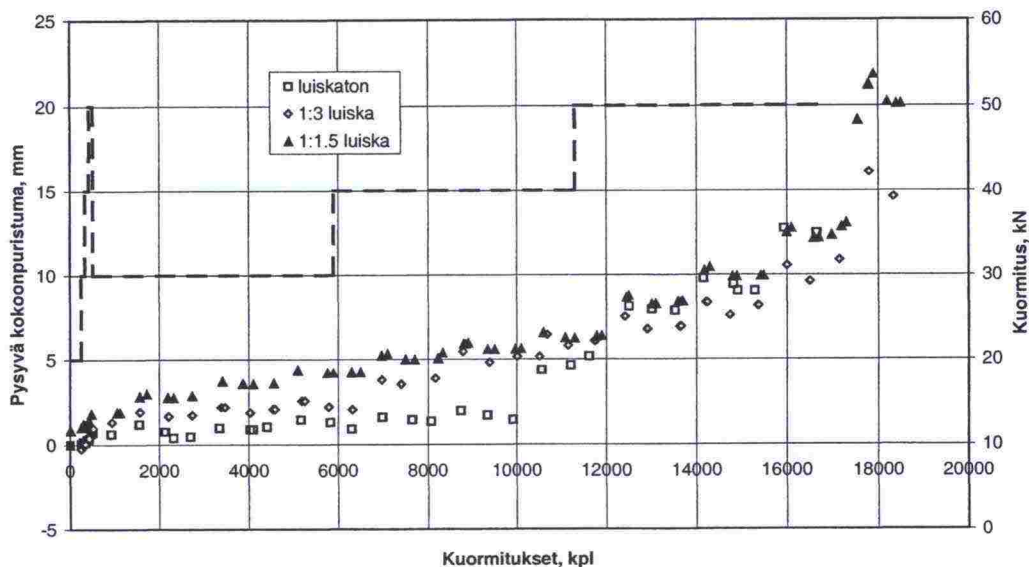


Kuva 3. Loadman mittaukset asfaltin päältä, 1:1,5 luiska. Mittaukset eri vaaituslinjoilta C1, C2 ja C3. Vaaituslinja C3 sijaitsee kaksikomponenttigeotekstiilialueella. Linjat C1 ja C2 sijaitsevat tavanomaisen geotekstiilin alueella.



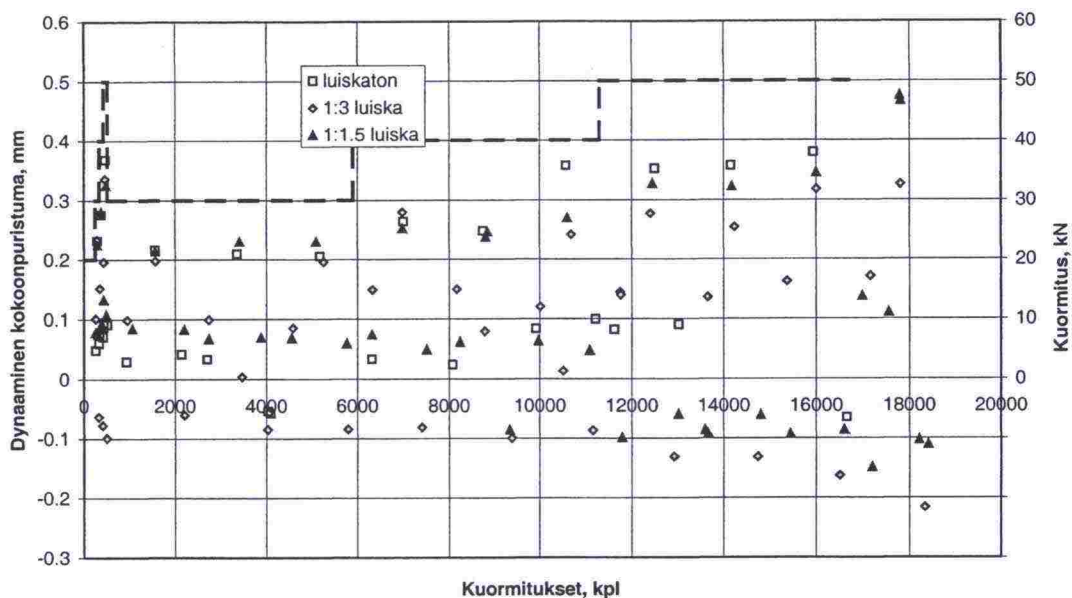
## MURSKEEN MUODONMUUTOKSET

Eri alueiden pysyvät kokoonpuristumat murskeen alaosaassa



Kuva 1. Pysyvät pystysuuntaiset kokoonpuristumat murskekerroksen alimman 200 mm:n alueella.

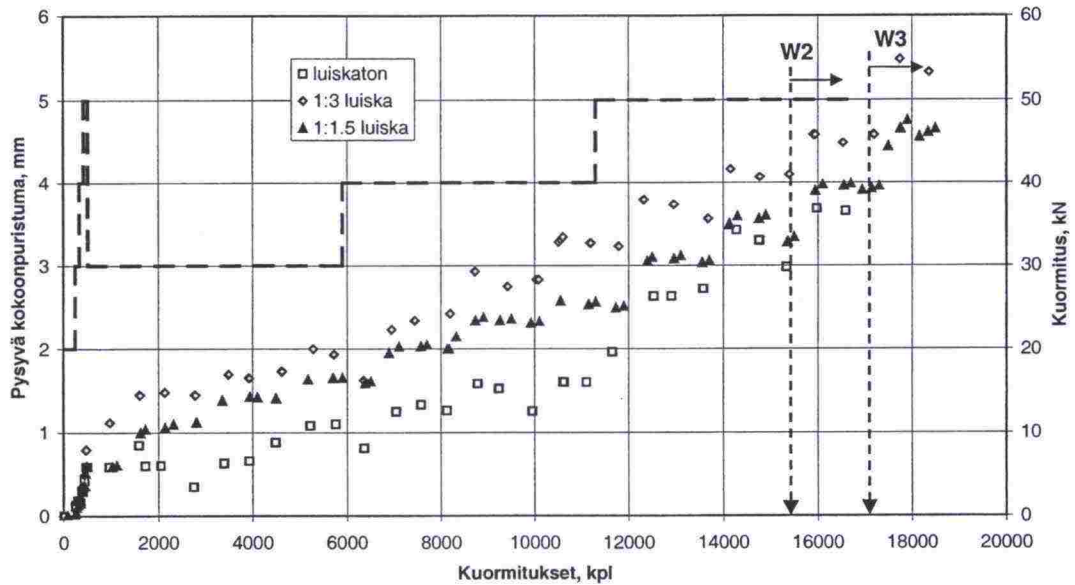
Eri alueiden dynaamiset kokoonpuristumat murskeen alaosaassa



Kuva 2. Hetkelliset pystysuuntaiset kokonaiskokoonpuristumat murskekerroksen alimman 200 mm:n alueella.

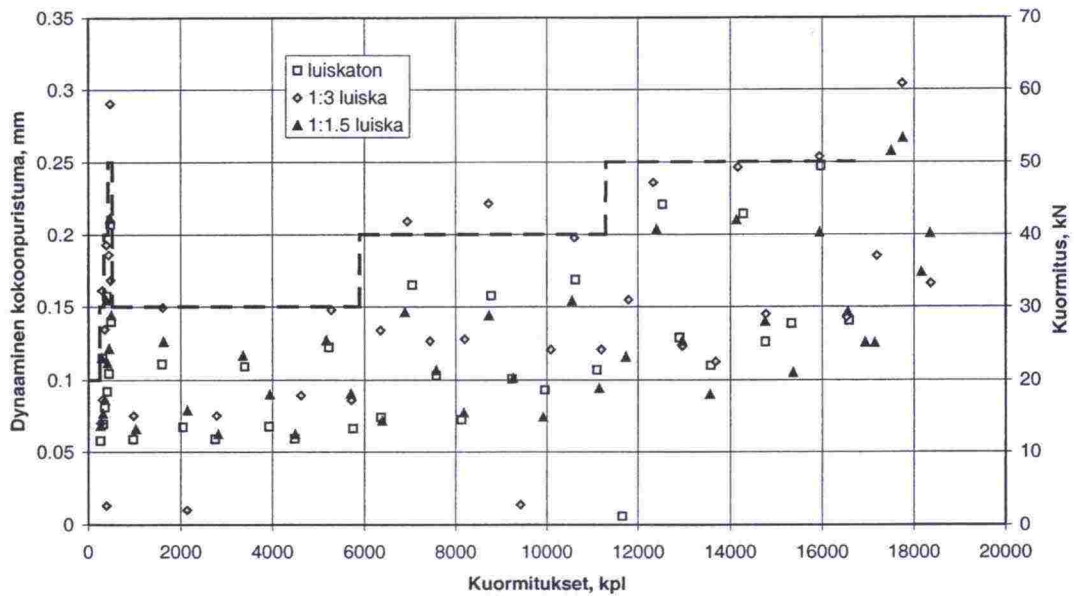
## SORAN MUODONMUUTOKSET

Eri alueiden pysyvät kokoonpuristumat sorassa



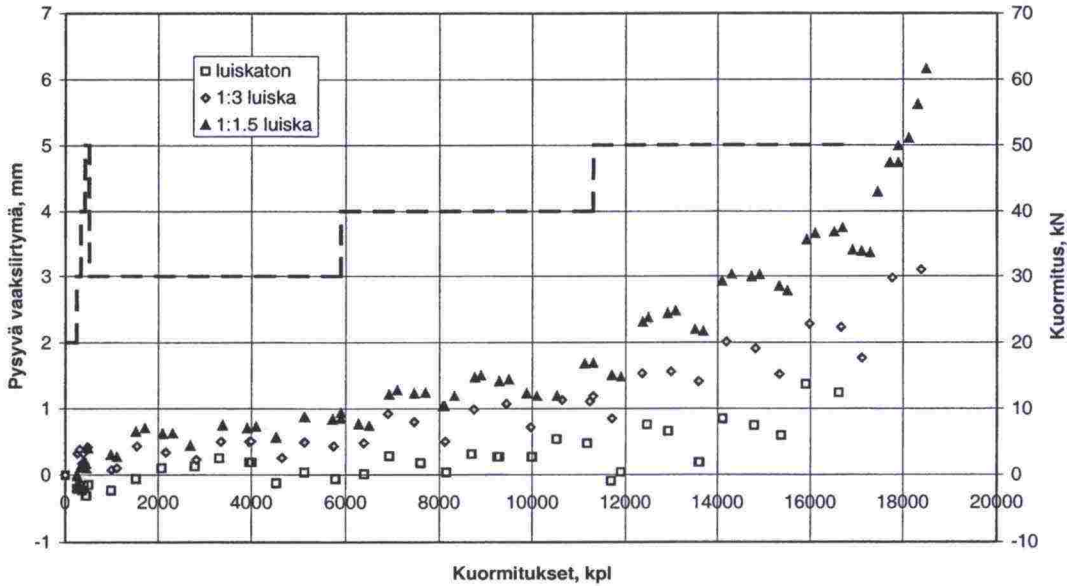
Kuva 1. Pysyvät pystysuuntaiset kokoonpuristumat sorakerroksessa (200 mm).

Eri alueiden dynaamiset kokoonpuristumat sorassa



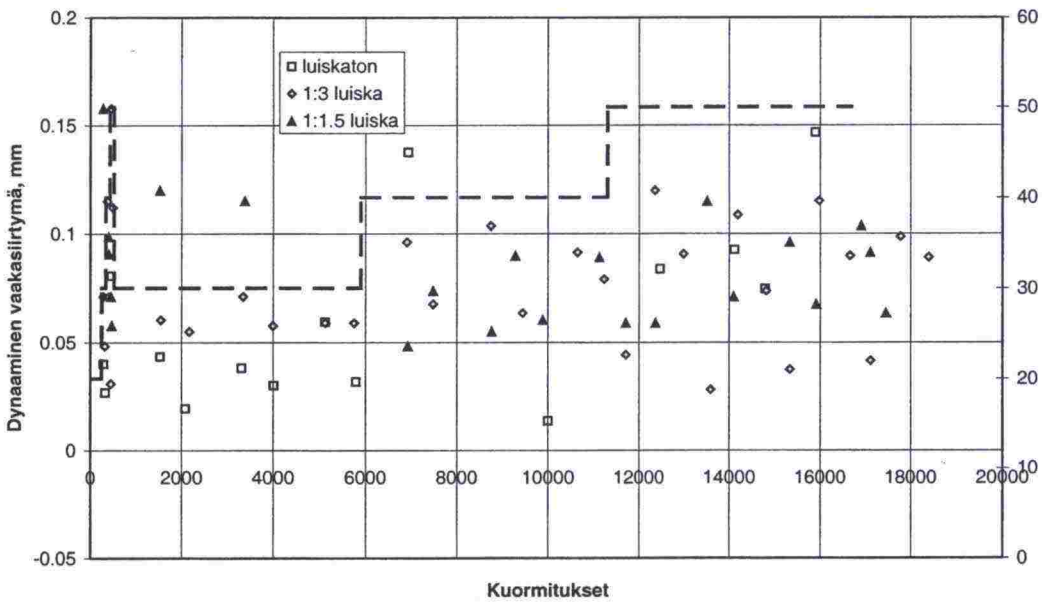
Kuva 2. Hetkelliset pystysuuntaiset kokonaiskokoonpuristumat sorakerroksessa (200 mm).

Eri alueiden pysyvät vaakasiirtymät Kam:n ja soran rajapinnassa



Kuva 3. Pysyvät vaakasiirtymät murskeen ja soran rajapinnassa.

Eri alueiden dynaamiset vaakasiirtymät KaM:n ja soran rajapinnassa

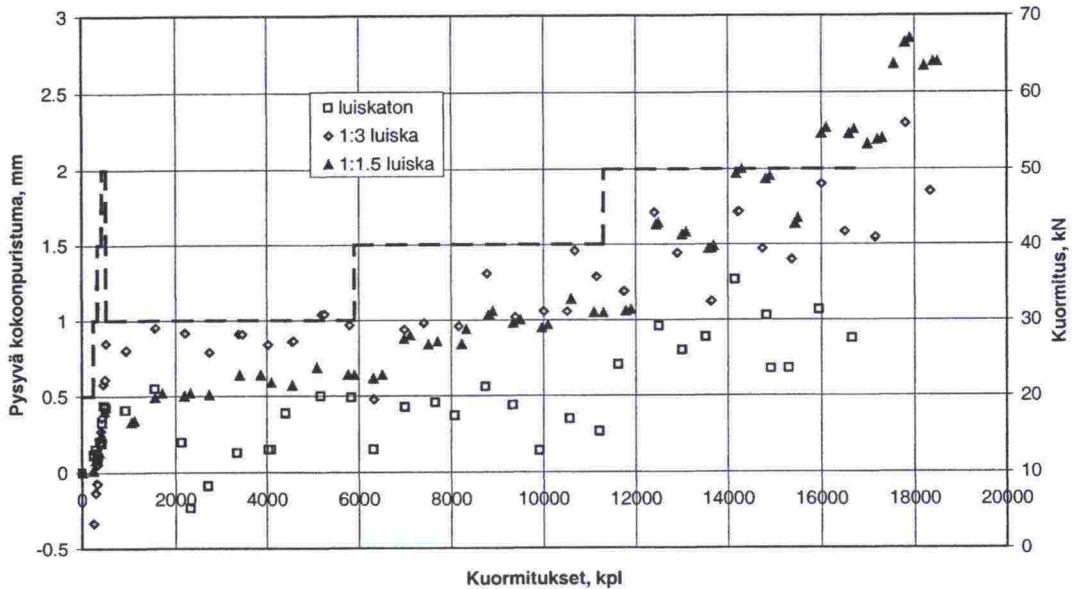


Kuva 4. Hetkelliset vaakasiirtymät murskeen ja soran rajapinnassa.



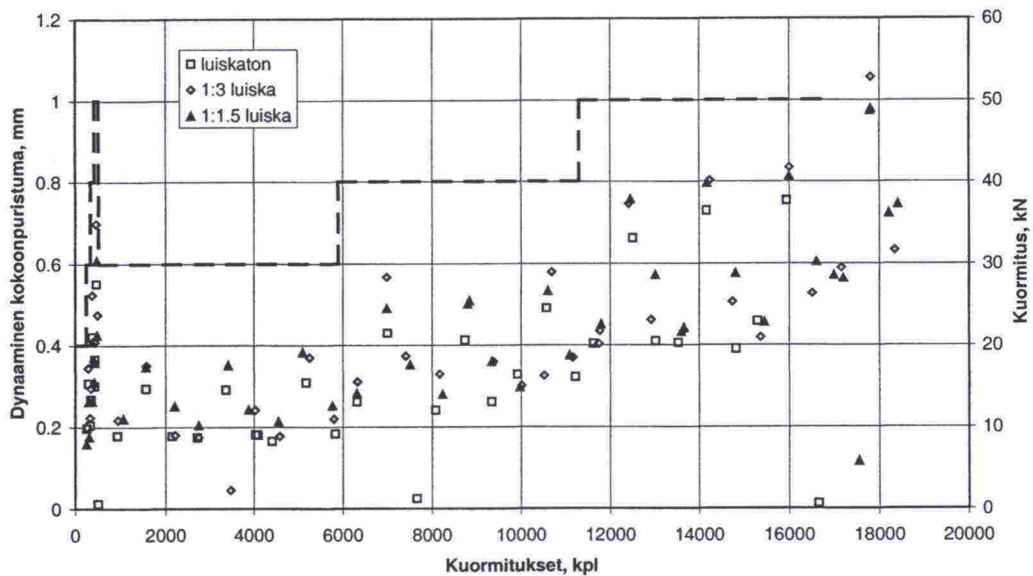
## SAVEN MUODONMUUTOKSET

Eri alueiden pysyvät kokoonpuristumat savessa (0-200 mm)



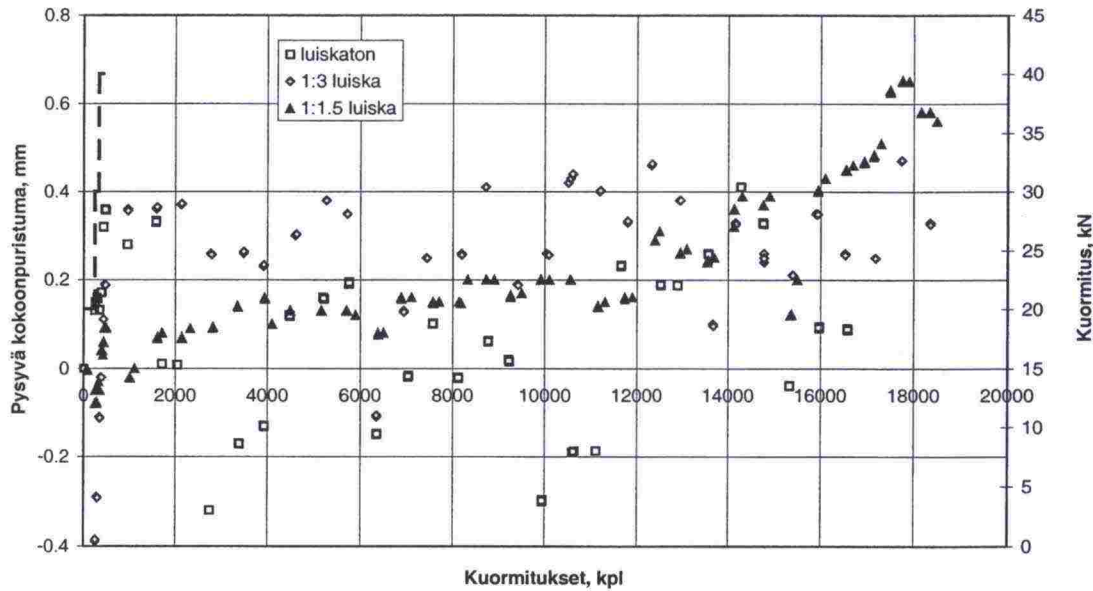
Kuva 1. Pysyvät pystysuuntaiset kokoonpuristumat savikerroksen ylimmällä 200 mm:n alueella.

Eri alueiden dynaamiset kokoonpuristumat savessa (0-200 mm)



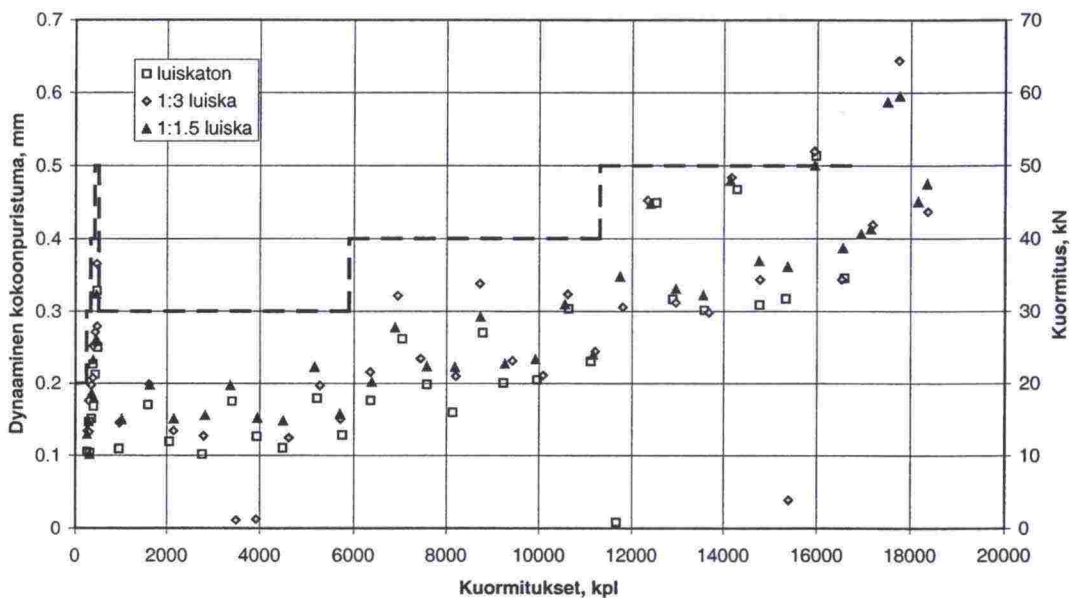
Kuva 2. Hetkelliset pystysuuntaiset kokonaiskokoonpuristumat savikerroksen ylimmällä 200 mm:n alueella.

Eri alueiden pysyvät kokoonpuristumat savessa (200-400 mm)



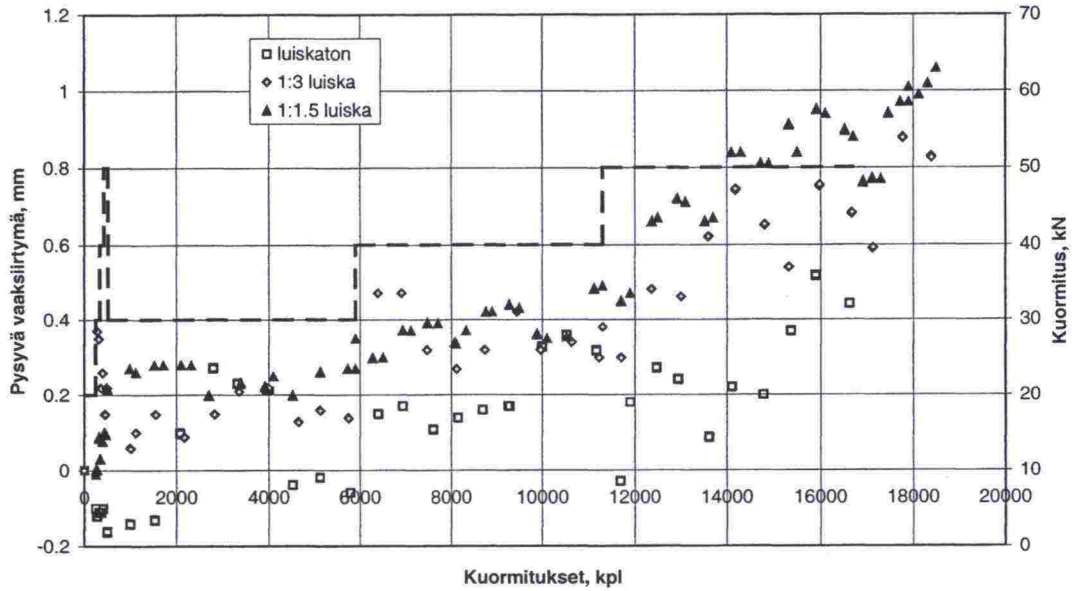
Kuva 3. Pysyvät pystysuuntaiset kokoonpuristumat savikerroksessa 200 - 400 mm:n alueella.

Eri alueiden dynaamiset kokoonpuristumat savessa (200-400 mm)



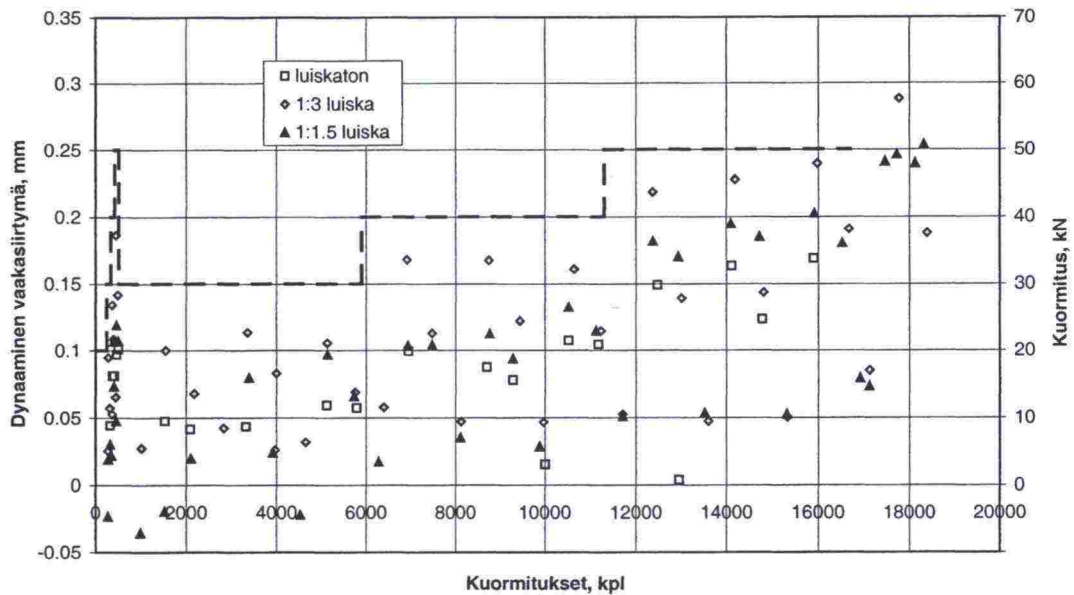
Kuva 4. Hetkelliset pystysuuntaiset kokonaiskokoonpuristumat savikerroksessa 200 - 400 mm:n alueella.

Eri alueiden pysyvät vaakasiirtymät savessa (syv.200 mm)



Kuva 5. Pysyvät vaakasiirtymät savikerroksessa 200 mm:n syvyydellä.

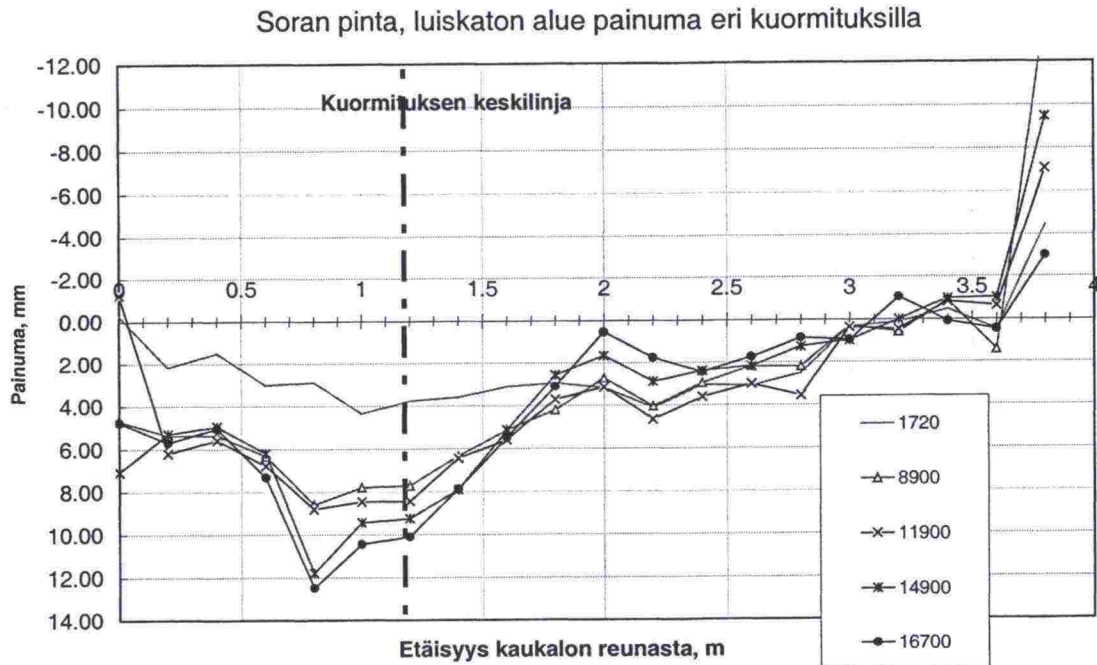
Eri alueiden dynaamiset vaakasiirtymät savessa (syv. 200 mm)



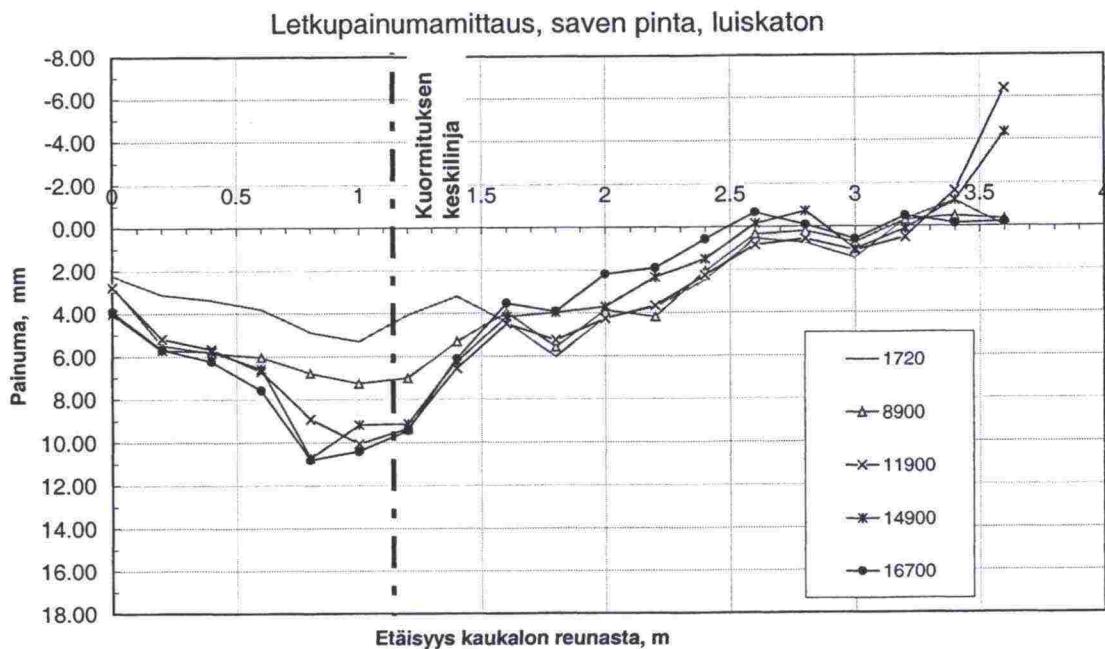
Kuva 6. Hetkelliset vaakasiirtymät savikerroksessa 200 mm:n syvyydellä.



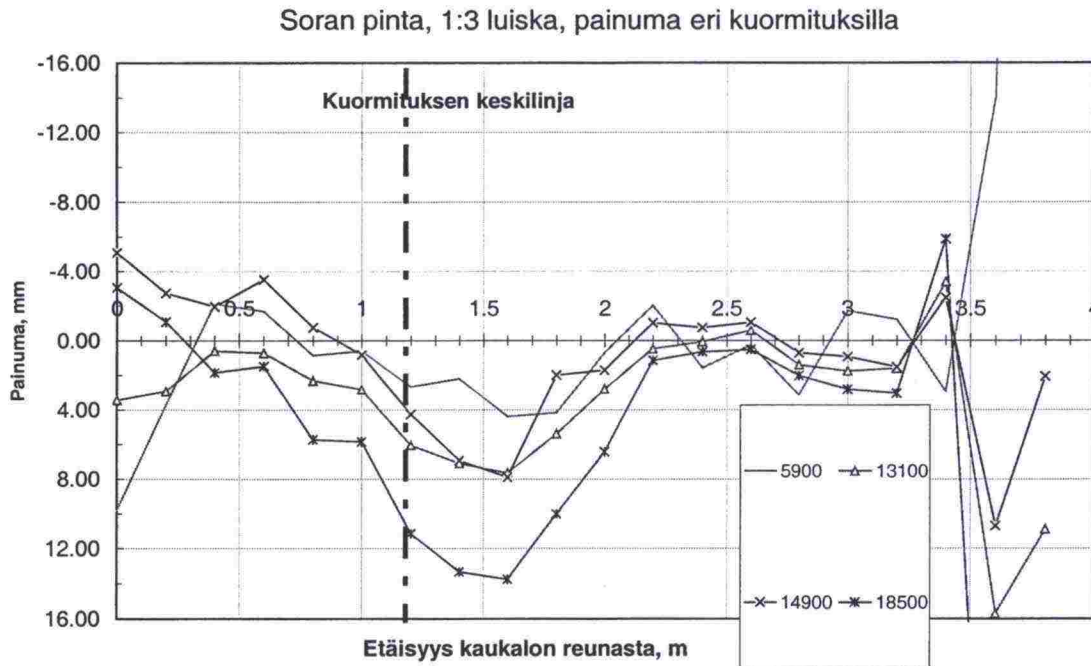
## LETKUPAINUMAMITTAUKSET



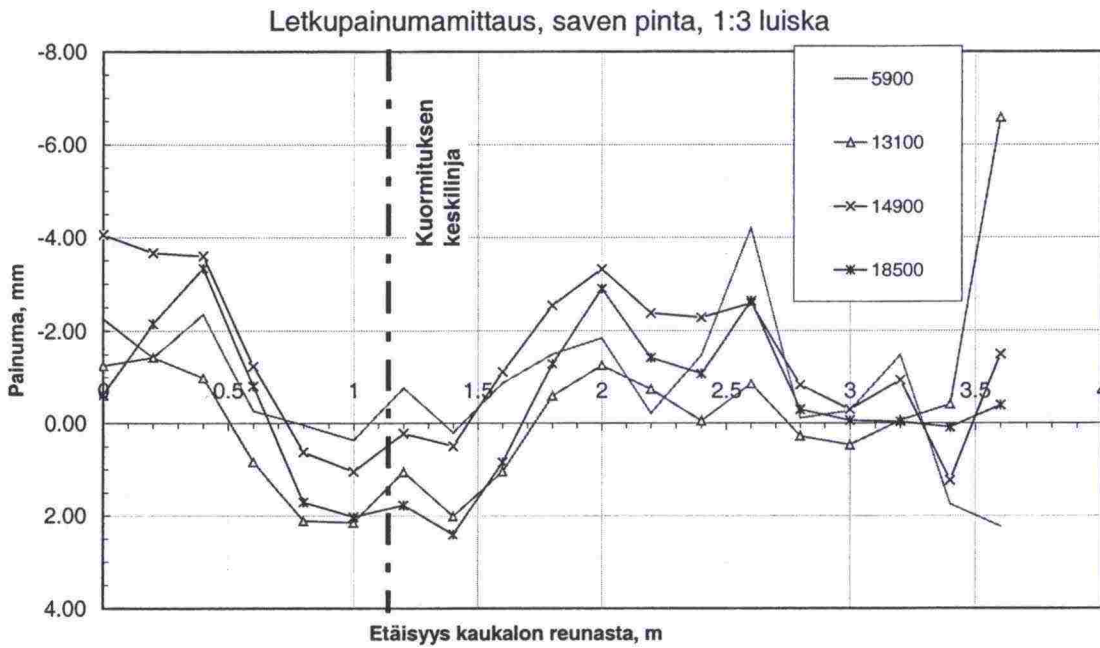
Kuva 1. Letkupainumamittarit, pysyvät painumat, soran yläpinta, luiskaton alue.



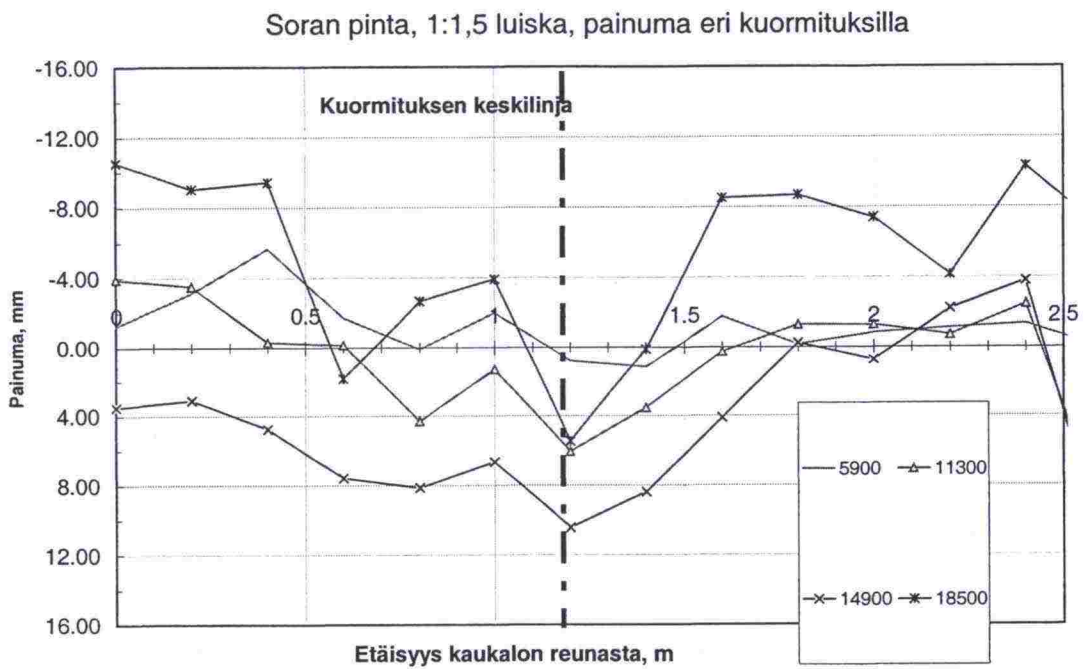
Kuva 2. Letkupainumamittarit, pysyvät painumat, saven yläpinta, luiskaton alue.



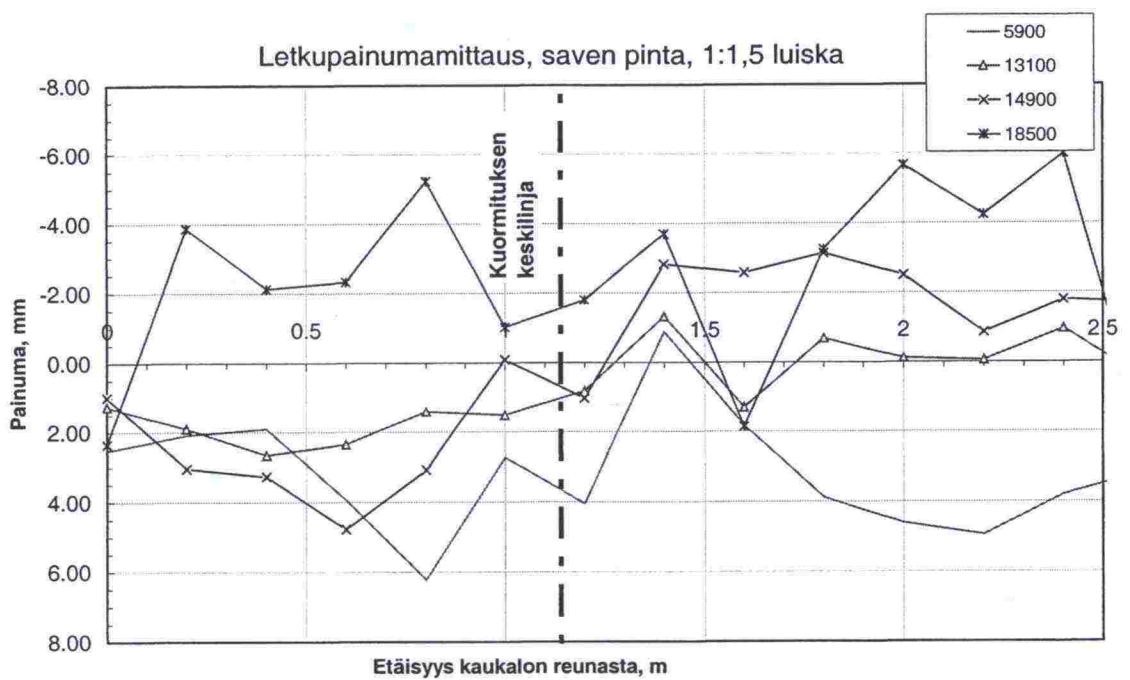
Kuva 3. Letkupainumamittarit, pysyvät painumat, sorran yläpinta, 1:3 luiska.



Kuva 4. Letkupainumamittarit, pysyvät painumat, saven yläpinta, 1:3 luiska.



Kuva 5. Letkupainumamittarit, pysyvät painumat, soran yläpinta, 1:1;5 luiska.

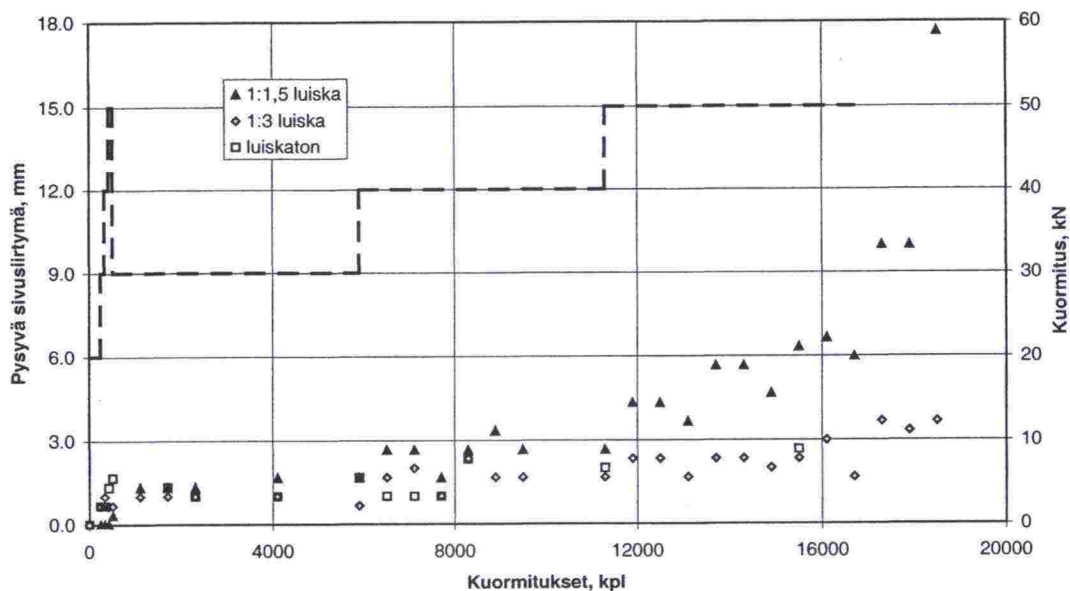


Kuva 6. Letkupainumamittarit, pysyvät painumat, saven yläpinta, 1:1,5 luiska.



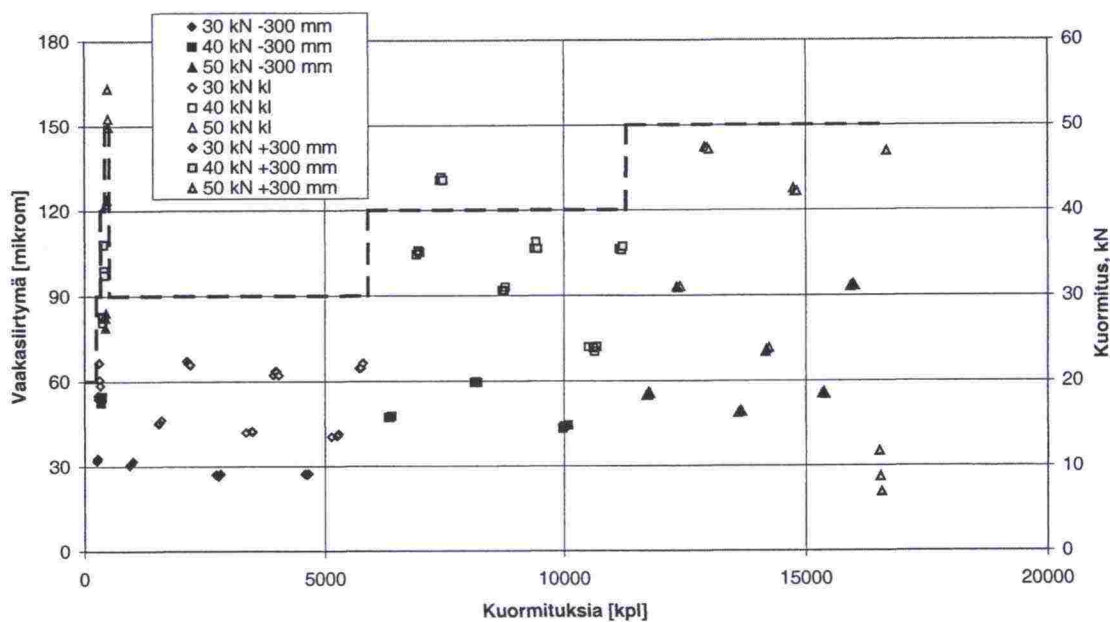
## SIVUSIIRTYMÄT

Pysyvä sivusiirtymä mittanastan suhteen

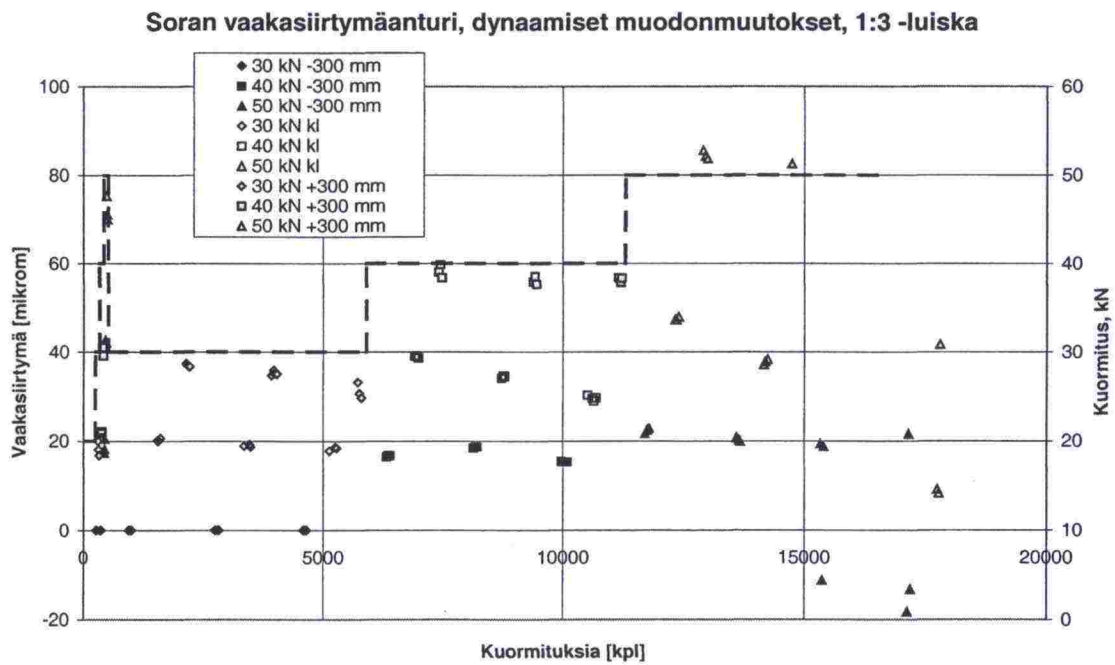


Kuva 1. Pysyvät sivusiirtymät suhteessa mittanastaan, eri luiska-alueet.

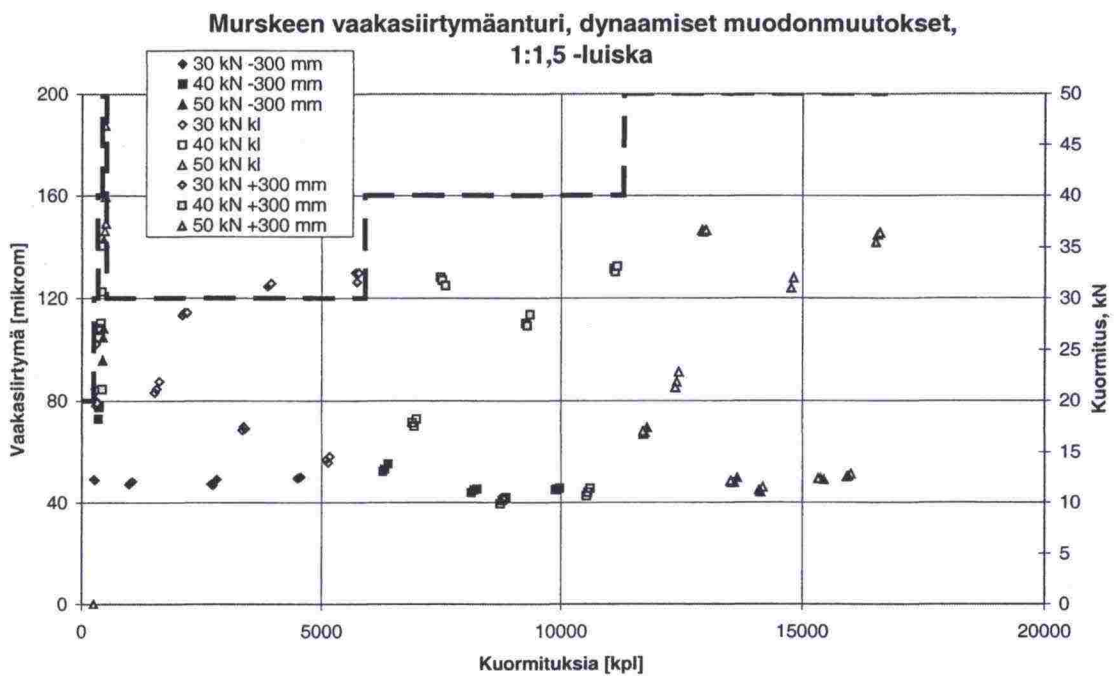
Murskeen vaakasiirtymäanturi, dynaamiset muodonmuutokset, 1:3 -luiska



Kuva 2. Hetkelliset vaakasuuntaiset kokonaissiirtymät murskeessa, 1:3 luiska.

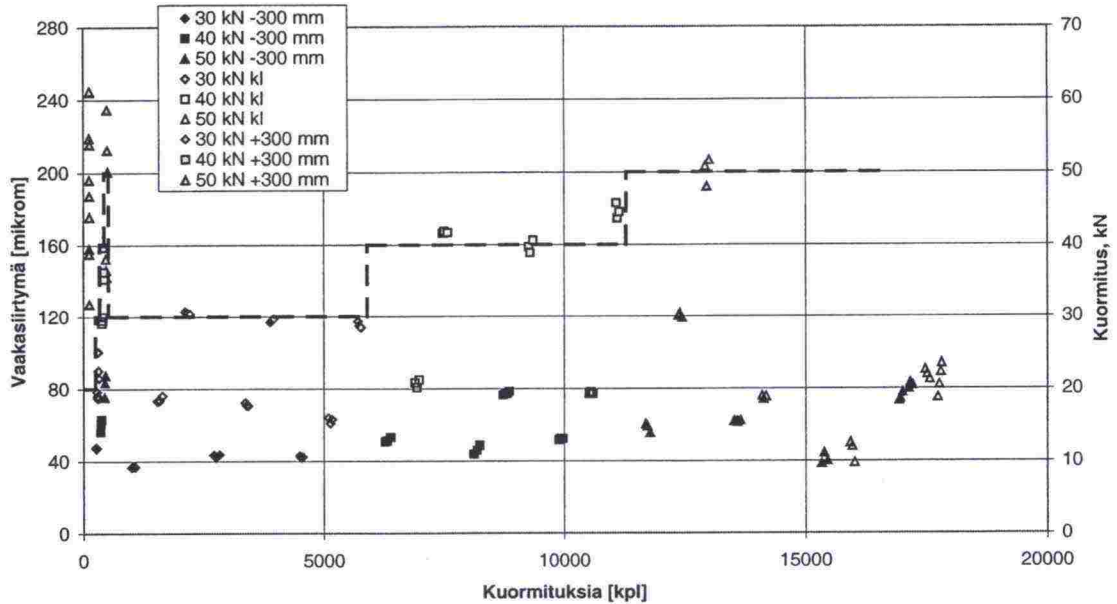


Kuva 3. Hetkelliset, vaakasuuntaiset kokonaissiirtymät sorassa, 1:3 luiska.



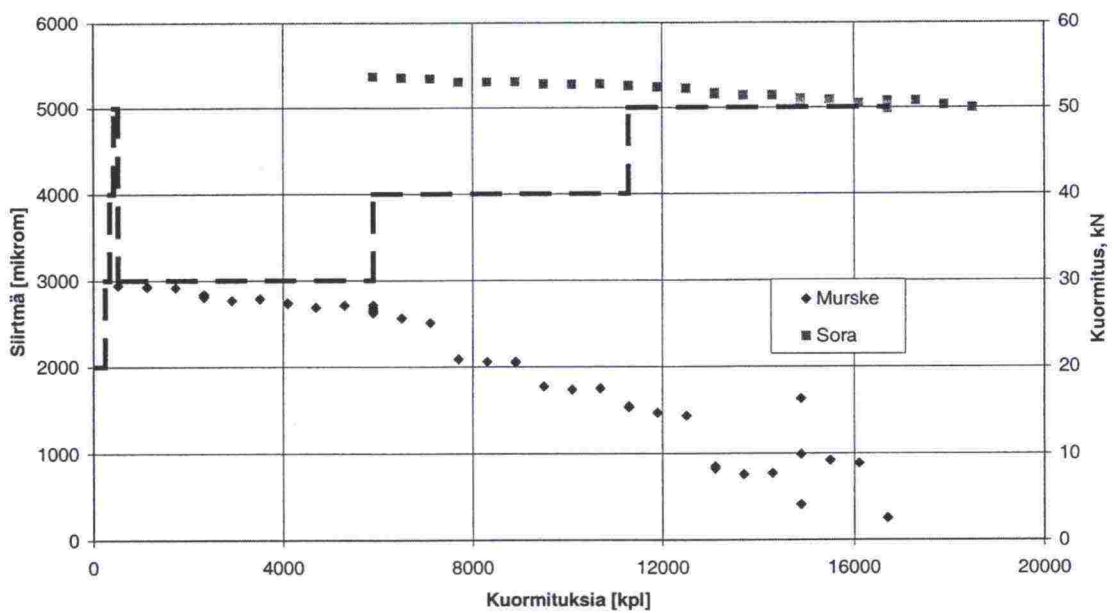
Kuva 4. Hetkelliset vaakasuuntaiset kokonaissiirtymät murskeessa, 1:1,5 luiska.

Soran vaakasiirtymäanturi, dynaamiset muodonmuutokset, 1:1,5-luiska



Kuva 5. Hetkelliset vaakasuuntaiset kokonaissiirtymät sorassa, 1:1,5 luiska.

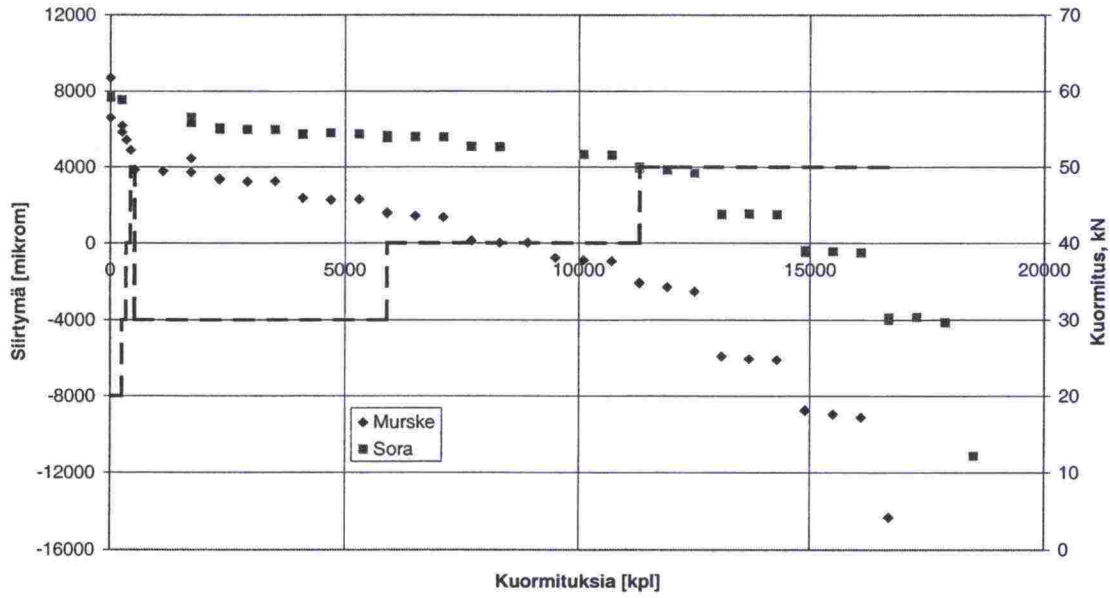
Sivusiirtymäanturien staattiset arvot, 1:3 luiska



Kuva 6. Pysyvät vaakasuuntaiset siirtymät murskeessa ja sorassa, 1:3 luiska.



Sivusiirtymäantureiden staattisia arvoja, 1:1,5-luiska

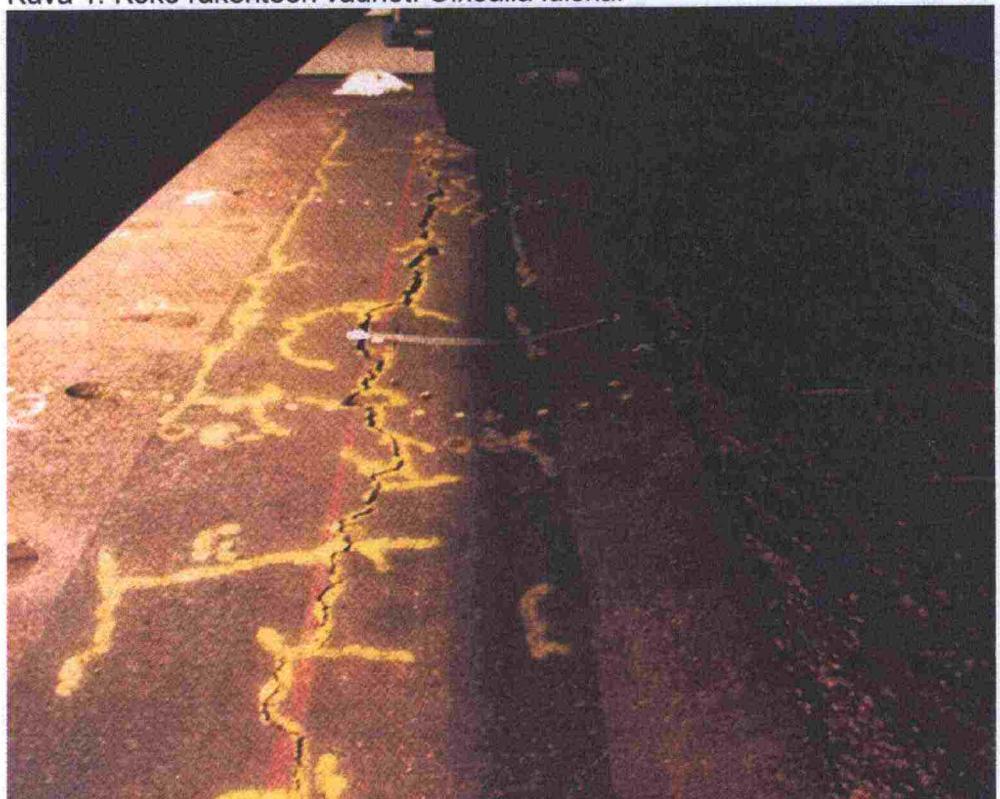


Kuva 7. Pysyvät, vaakasuuntaiset siirtymät murskeessa ja sorassa, 1:1,5 luiska.

## VAURIOKARTOITUKSET. JYRKKÄLUISKAINEN RAKENNE.



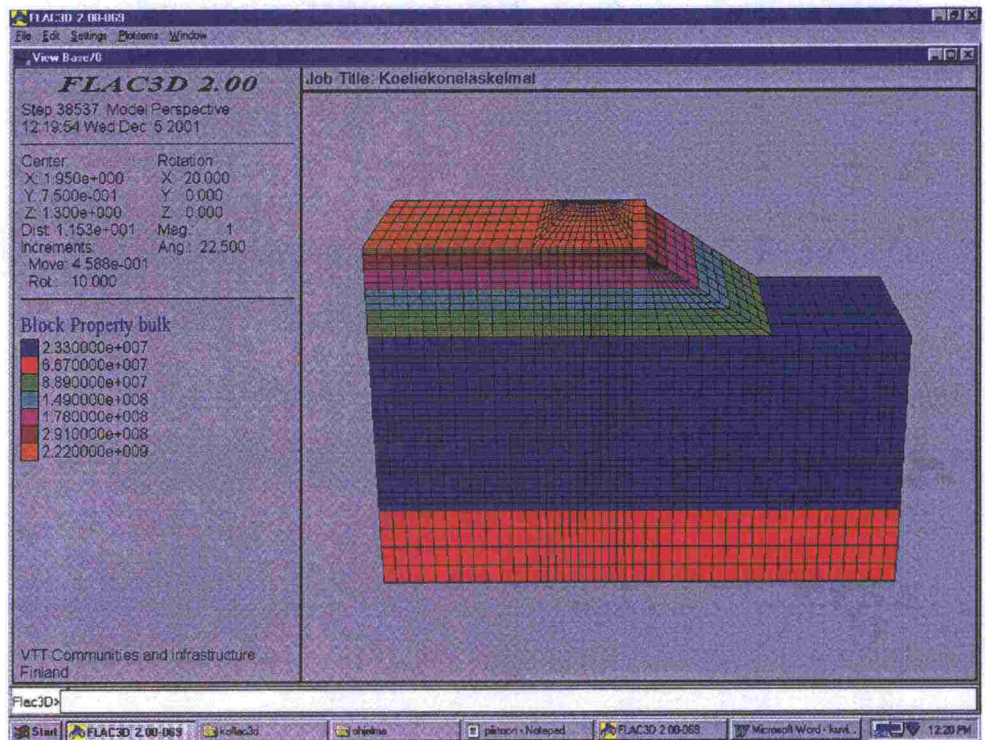
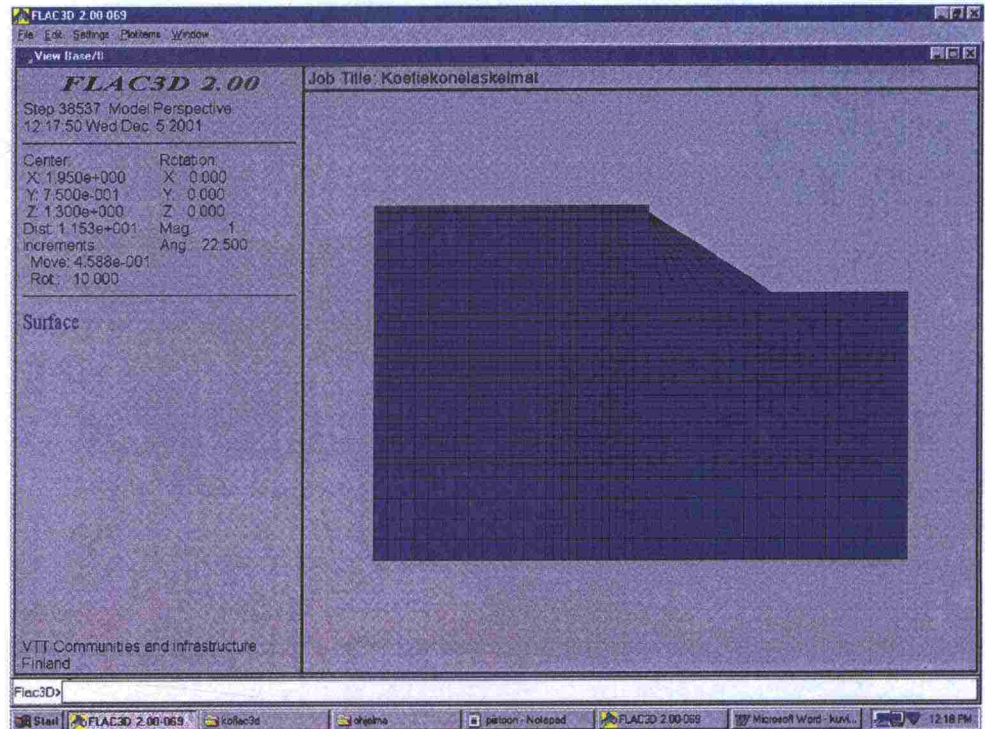
Kuva 1. Koko rakenteen vauriot. Oikealla luiska.



Kuva 2. Jyrkkäluiskaisen rakenteen vauriot. Rakenteen keskiosa.

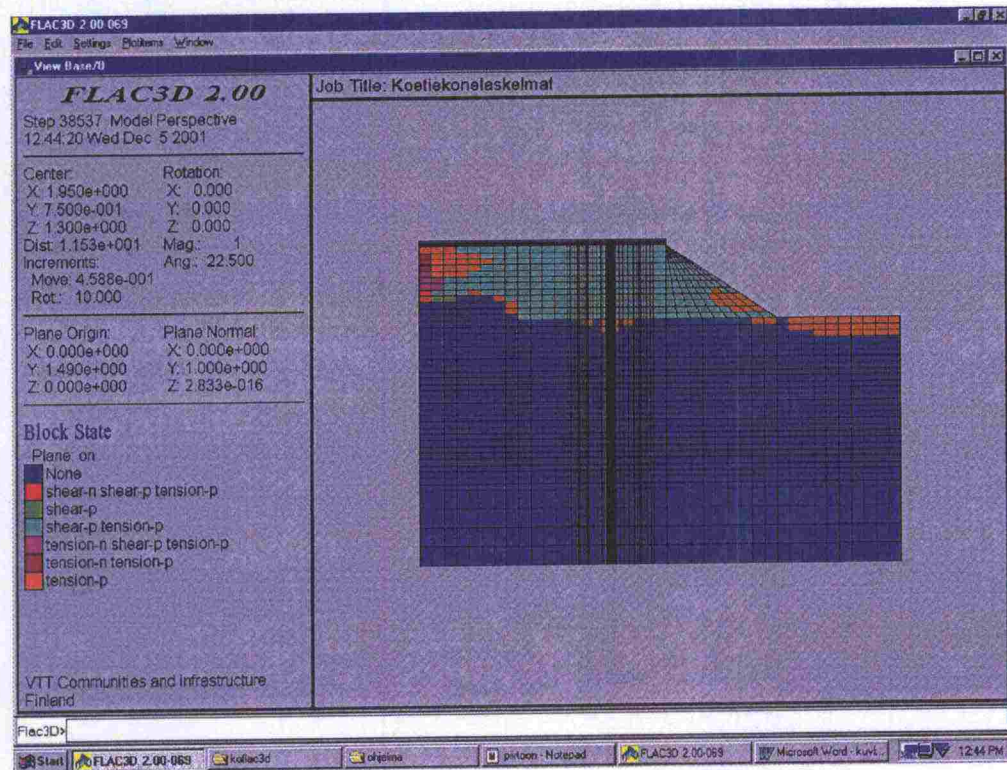
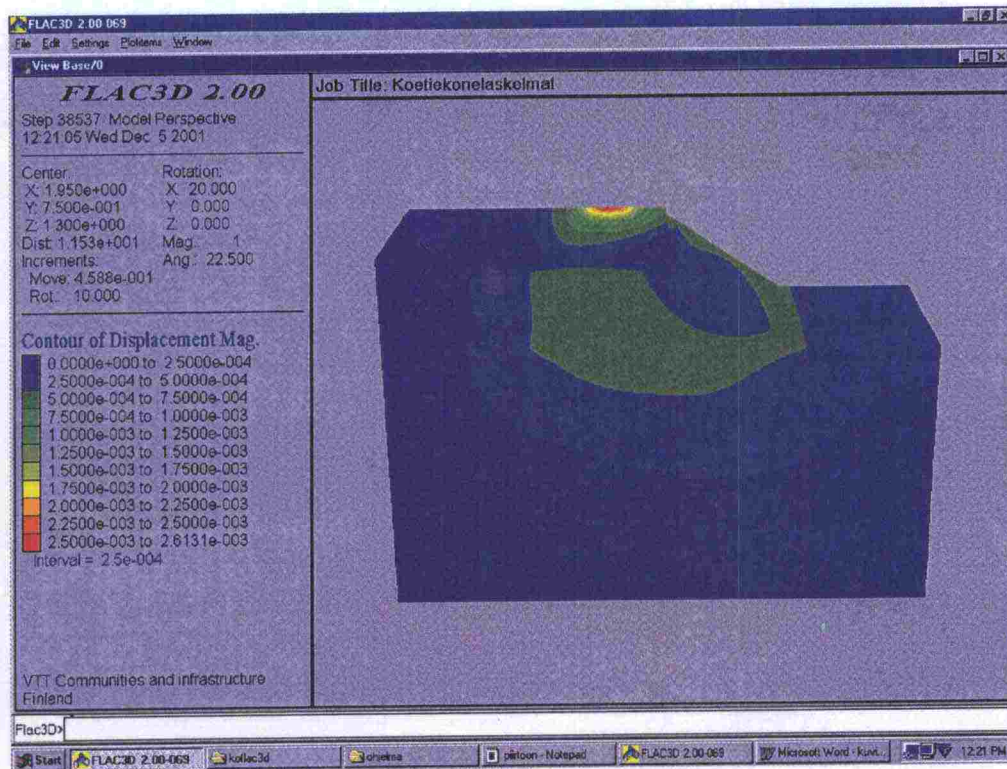


## LASKENTAVERKKO JA MATERIAALIEN TILAVUUSMODUULIT, LUISKAN KALTEVUUS 1:1.5.



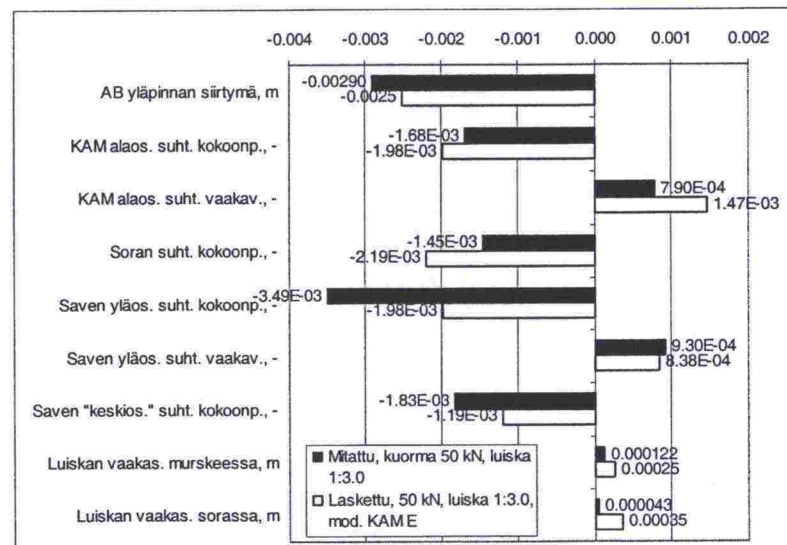
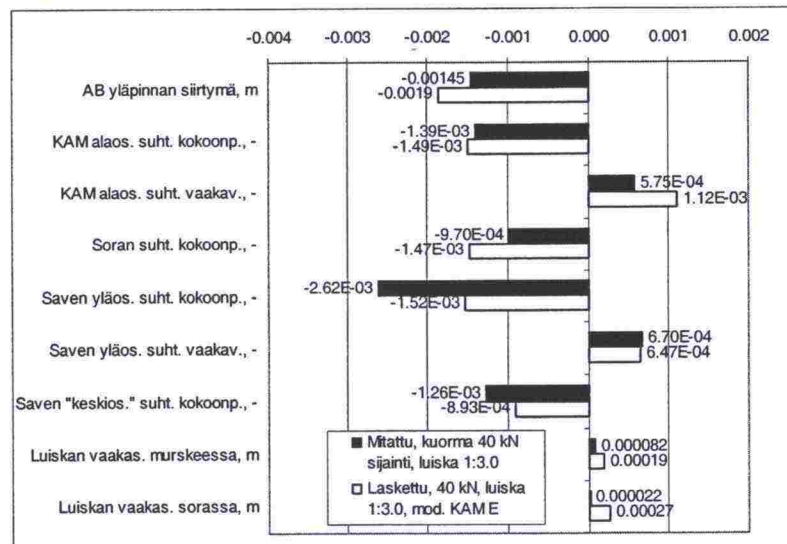
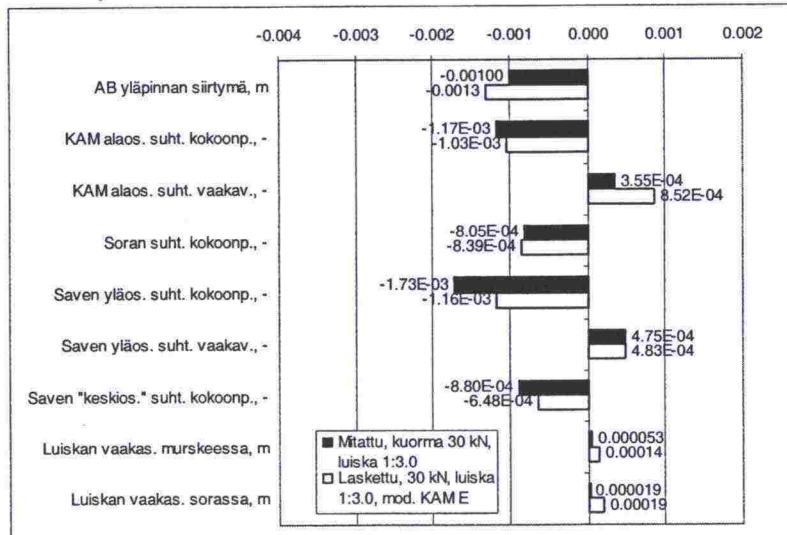


**SIIRTYMIEN TASA-ARVOKÄYRÄT LASKENTAMALLISSA JA  
ELEMENTTIEN TILA KUORMITUSTASOSSA, LUISKAN  
KALTEVUUS 1:1.5, KUORMA 50 KN.**

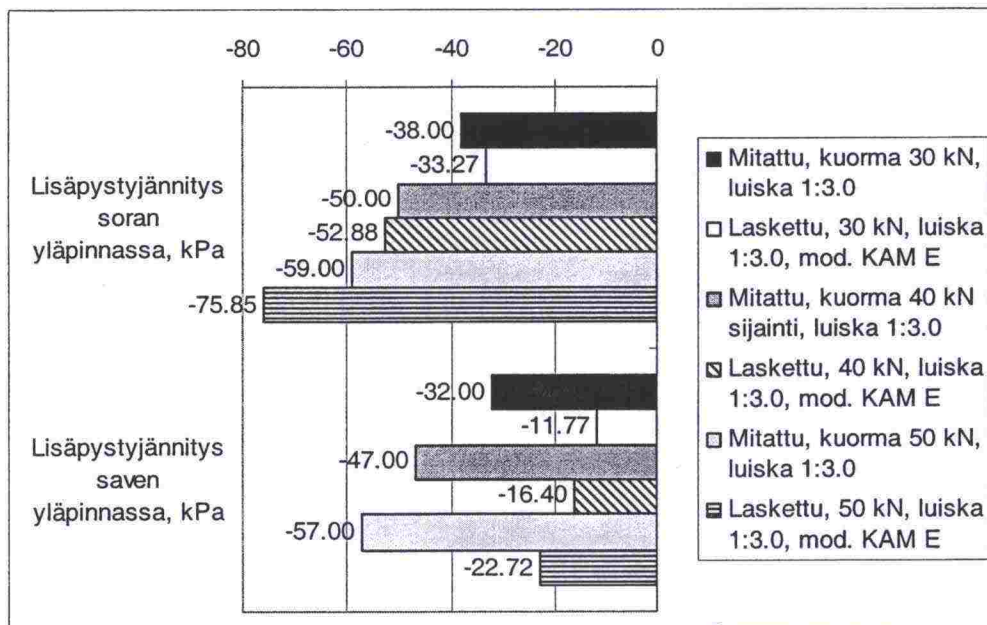


**PÄÄTULOSTEN VERTAILU LUISKAN KALTEVUUDELLA 1:3.0  
(P=30, 40 ja 50 kN).**

Siirtymät ja muodonmuutokset. Kantavalla kerroksella modifioidut muodonmuutosparametrit.



Jännitykset. Kantavalla kerroksella modifioidut muodonmuutosparametrit.





ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-914-5  
TIEH 3200765