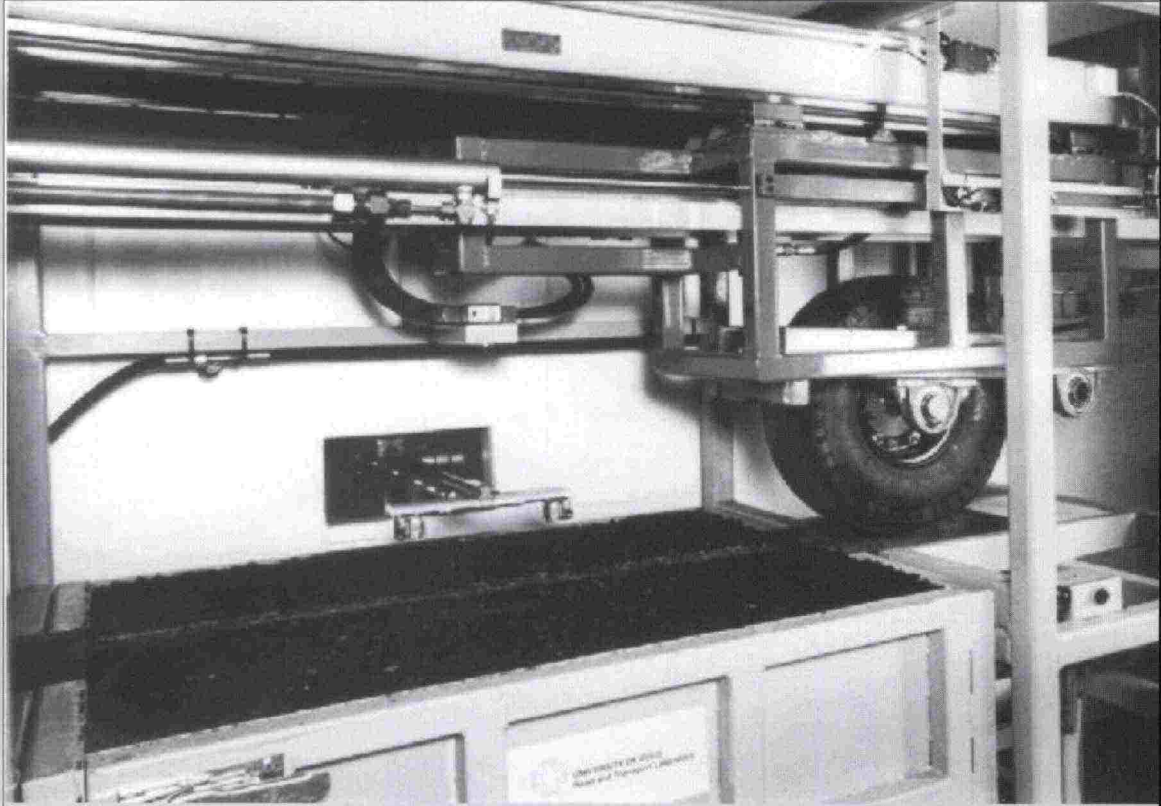




Tielaitos

Jouko Belt, Veli-Pekka Lämsä, Esko Ehrola

Sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset



Tielaitoksen
selvityksiä
60/2000

Helsinki 2000

TIEHALLINTO

Tielaitoksen selvityksiä
60/2000

Jouko Belt, Veli-Pekka Lämsä, Esko Ehrola

Sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset

Tielaitos
TIEHALLINTO

Helsinki 2000

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-710-X
TIEL 3200646

Edita Oy
Helsinki 2000

Julkaisua saatavana:
Tiehallinto, julkaisumyynti
Faksi 0204 22 2652
s-posti julkaisumyynti@tiehallinto.fi
www.tielaitos.fi/kirjasto/tilaus.htm



Tielaitos
TIEHALLINTO
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 150

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää tierakenteiden tutkimuslaitteella (TKT -laitteella) tehtyjen simulointikokeiden perusteella kantavan kerroksen materiaalin, kuormituksen, rakenteen ja olosuhteiden vaikutuksia kevytpäällysteisten tierakenteiden pysyviin muodonmuutoksiin. TKT -laite on laboratoriomittakaavainen koeratalaitteisto, jolla voidaan kuormittaa tutkittavaa tierakennettä todellista liikennekuormitusta vastaavalla pyöräkuormalla. Tehdyissä kokeissa tarkasteltiin 16 erilaista koerakennettä.

Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat merkittäviä ja kasvavat säännöllisesti kasvunopeuden hidastuessa kuormitusten lisääntyessä. Kesäolosuhteita simuloivissa testeissä pysyvien muodonmuutosten kehittyminen oli ennako-odotusten mukaista mm. siten, että mitä suurempi on kuormitus, sitä nopeampaa on pysyvien muodonmuutosten kehittyminen.

Kevätolosuhteita simuloivissa testeissä tutkittavien rakenteiden kokonaispaksuudet olivat 200 mm, millä pyrittiin kuvaamaan tilannetta, missä päällysrakenteen yläosa on sulanut keväällä. Pysyvät muodonmuutokset kasvavat huomattavasti hienoainespitoisuuden ja kosteuden lisääntyessä. Hienoainespitoisuuden (# 0.063 mm) lisääntyminen 4.5 %:sta 6.4 %:iin kasvattaa pysyvät muodonmuutokset kaksinkertaisiksi. Hienoainespitoisuuden lisääntyessä 2 %-yksikköä kosteus lisääntyi testeissä 4.5 %:sta 6.0 %:iin ja samalla kyllästysaste nousi noin 50 %:sta 70 - 75 %:iin.

Kosteuden ollessa yli 3 % pysyvät muodonmuutokset olivat mineralogiselta koostumukseltaan huonolla sitomattoman kantavan kerroksen kalliomurskeella huomattavasti suurempia kuin paremmalla kalliomurskeella. Huonolla kalliomurskeella osa pysyvistä muodonmuutoksista aiheutui rakeisuuskäyrän "roikkuvuudesta" ja rakeiden suuresta liuskeisuudesta.

TKT -testien perusteella kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset kehittyvät säännönmukaisesti ja ovat mallinnettavissa kimmoisten muodonmuutosten ja kosteusolosuhteita kuvaavan kyllästysasteen avulla. Tulokset luovat hyvän pohjan kehitettäessä mitoitusmenettelyä, missä otetaan huomioon myös kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset. Parantamishankkeilla suhteelliset kimmoiset muodonmuutokset voidaan määrittää takaisinlaskettujen tai arvioitujen moduulien avulla. Kosteusolosuhteita kuvaava kyllästysaste voidaan puolestaan laskea helposti Proctor -kokeella määritetyn kuivairtoihyden, kiintoihiyden ja lähinnä hienoainespitoisuuden perusteella arvioidun kosteuspitoisuuden avulla. Kehitettäessä mitoitusmenettelyä suurimmat ongelmat liittyvät todennäköisesti siihen, miten otetaan huomioon kapeiden teiden puutteellinen reunatuki ja alusrakenteen laatu.

Keywords: thinly paved roads, road structure, base course, rutting, permanent deformations

ABSTRACT

The aim of this study is to clarify on the base of simulation tests performed with a pavement test facility (PTF) the effects of the base course material, loading, structure and external conditions on permanent deformations in the structure of thinly paved roads. The facility is a laboratory-scale test track by means of which a road structure can be subjected to a wheel load corresponding to actual traffic loading. The present experiments covered a range of 16 test structures.

The relative permanent deformations in the base course are substantial and increase in a regular manner, although the rate of increase attenuates with growing number of loads. The trend in these deformations conforms to expectations under simulated summer conditions, i.e. the greater the load the more quickly these permanent deformations develop.

Spring conditions were simulated with test structures of thickness 200 mm, in an attempt to reproduce conditions under which the upper part of the road structure has thawed. In such a case permanent deformations increase considerably with fine content and moisture content, doubling in incidence with an increase in fines (0.063 mm fraction) from 4.5 % to 6.4 %. Similarly, this increase of 2 percentage points in the fines content rose moisture content from 4.5 % to 6.0 % and degree of saturation from about 50 % to 70-75 %.

At moisture content of over 3 % the permanent deformations in an unbound base course of crushed rock of poor mineralogical composition were very much greater than when a better quality of crushed rock aggregate was used. Some of the permanent deformations in the poorer aggregate were attributable to the "hanging" nature of the grain-size distribution curve and the high flakiness of the grains.

The PTF results indicate that permanent deformations in the base course develop in a regular manner and can be modelled in terms of elastic deformations and the degree of saturation, representing moisture conditions. The results create a good basis for developing a dimensioning procedure that takes account of these deformations. In the context of road improvement schemes, relative elastic deformations can be defined by means of back-calculated or estimated moduli, while the degree of saturation can be calculated in a simple manner from the dry density as determined in a Proctor test, the specific gravity and the estimated moisture content. The main problems encountered when developing a dimensioning procedure are likely to concern how allowance can be made for the deficient edge support found in the case of narrow roads and for the quality of the subgrade.

ALKUSANAT

Tielaitoksen johtoryhmän päätöksellä on käynnistetty *Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittäminen* -projekti keuhällä 1999. Projekti toteutetaan osavaiheittain yhteistyössä Oulun yliopiston ja VTT:n kanssa tielaitoksen ohjauksessa. Tutkimuksen osavaiheen I eli perusteosan yhteydessä kävi ilmi, että nykyinen tietämys pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttavista tekijöistä ei ole riittävää koko projektin päämäärien kannalta. Tämän takia päätettiin selvittää pysyviä muodonmuutoksia käyttäen kolmea eri mittakaavaista tutkimuslaitetta, HVS, TKT ja ICT -laitetta.

Tässä tutkimuksen osassa tarkastellaan tierakenteen tutkimuslaitteella (TKT -laite) laboratorioissa tehtäviä simulointikokeita, joilla pyritään selvittämään kantavan kerroksen materiaalin, kuormituksen, tierakenteen ja olosuhteiden vaikutuksia kevytpäällysteisten tierakenteiden pysyviin muodonmuutoksiin.

Tielaitoksen puolesta projektin ohjausryhmässä ovat olleet puheenjohtajana Aarno Valkeisenmäki (tuotanto/konsultointi) sekä jäsenenä Panu Tolla (tuotanto/konsultointi), Ismo Iso-Heiniemi (Hti), Pertti Virtala (Hti), Tuomo Kallionpää (Htl), Kari Lehtonen (Htl), ja Tuomas Toivonen (Hos). VTT Yhdyskuntatekniikan puolesta ohjausryhmässä ovat olleet Laura Apilo (sihteeri, projektikoordinaattori), Jouko Törnqvist, Harri Spoof ja Sami Petäjä. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion edustajina ohjausryhmässä ovat olleet Esko Ehrola (projektikoordinaattori) ja Jouko Belt (TKT -testien vastuhenkilö).

Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorioissa tutkimuksen tekemiseen ja raportin laatimiseen ovat osallistuneet TkL Jouko Belt, DI Veli Pekka Lämsä ja prof. Esko Ehrola.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	TIERAKENTEEN TUTKIMUSLAITE	11
3	TKT -TESTIT	14
3.1	Testityypit ja -rakenteet	14
3.2	Koemateriaalit ja rakeisuudet	17
3.3	Proctor -kokeet	19
3.4	Koeolosuhteet, laatikoiden rakentaminen ja koestaminen	20
4	TUTKIMUSTULOKSET	23
4.1	Pysyvät muodonmuutokset	23
4.1.1	Absoluuttiset pysyvät muodonmuutokset	23
4.1.2	Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset	26
4.2	Kimmoiset muodonmuutokset	29
4.3	Kantavan kerroksen materiaalien hienoneminen	30
4.4	Kantavan kerroksen kosteudet testin jälkeen	30
4.5	Pysyvien muodonmuutosten mallintaminen	31
4.5.1	Yleistä	31
4.5.2	Pysyvät muodonmuutokset kesäolosuhteissa	35
4.5.3	Pysyvät muodonmuutokset kevätolosuhteissa	38
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	42
6	KIRJALLISUUSLUETTELO	44

LIITTEET

1 JOHDANTO

Ohutpäällysteisten teiden kuormituskäyttämisen selvittämiseksi on vuodesta 1999 alkaen ollut käynnissä *Kevytpäällysteisten teiden vaurioitumismallien ja mitoitusmenetelmien kehittäminen* -projekti. Projektin osapuolina ovat Tielaitos, Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratorio, ja VTT Yhdyskuntatekniikka. Projektin tavoitteina ovat kevytpäällysteisten teiden kuormituskestävyyden selvittäminen ja kestoikämallien laatiminen Tielaitoksen tienpidon ohjaus- ja ylläpitojärjestelmiin (HIPS ja PMS) sekä Tielaitoksen mitoitusmenettelyn kehittämisen tukeminen.

Kevytpäällyste -projektin osavaiheista on aikaisemmin valmistunut ns. perusteosa, missä määriteltiin tärkeimmät kevytpäällysteteiden toiminnallisen ja rakenteellisen kunnon kehittymiseen vaikuttavat tekijät tien vaurioitumisprosessissa. Kuormituskestävyyden osalta päätulokset olivat seuraavat:

- tien poikkisuuntainen epätasaisuus (ajourien välinen harjanteen korkeus) ja sen kehittyminen kuvaavat tierakenteen kuormituskestävyyttä
- harjanteen korkeus johtuu pääasiassa rakennekerrosten ja alusrakenteen pysyvistä muodonmuutoksista
- sisäluisikan läheisyys ja jyrkkyys vaikuttavat merkittävästi pysyviin muodonmuutoksiin
- materiaalien perusominaisuuksien lisäksi pysyvät muodonmuutokset riippuvat kosteusolosuhteista

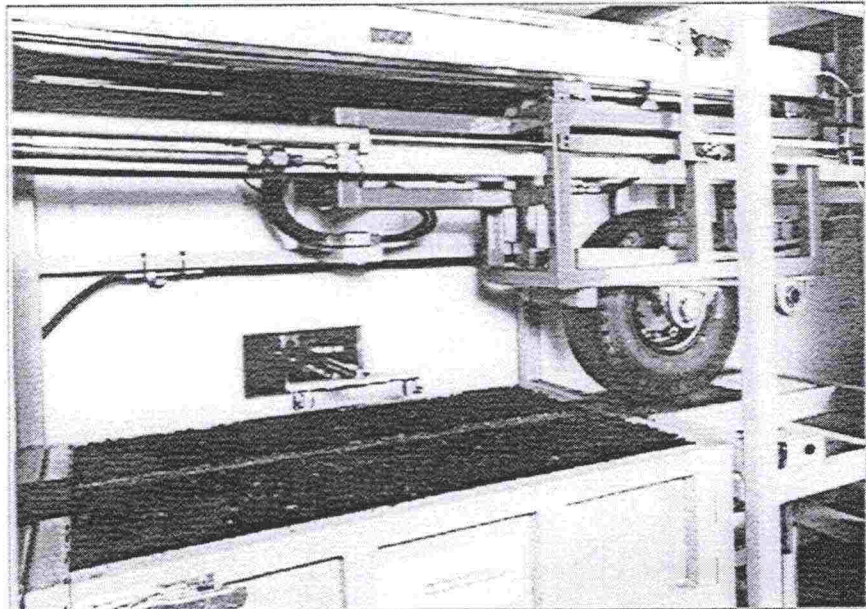
Perusteosan yhteydessä kävi ilmi, että nykyinen tietämys pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttavista tekijöistä ei ole riittävää koko projektin päämäärien kannalta. Tämän takia päätettiin selvittää pysyviä muodonmuutoksia käyttäen kolmea eri mittakaavaista tutkimuslaitetta, HVS, TKT ja ICT -laitetta. Koetiekone (HVS) on täysimittakaavainen ja tierakenteen tutkimuslaitte (TKT) laboratoriomittakaavainen koeratalaitteisto, joilla voidaan simuloida todellista liikennekuormitusta. ICT (Intensive Compaction Test) -laite on puolestaan tyypillinen laboratoriolaitte, millä tehtävät kokeet ovat kustannuksiltaan vähäisiä verrattuna em. simulointikokeisiin, minkä takia on perusteltua selvittää ICT -laitteen käyttökelpoisuus arvioitaessa materiaalien ominaisuuksien ja kosteuden merkitystä pysyviin muodonmuutoksiin.

Simulointikokeiden tavoitteena on kokeellisesti selvittää kevytpäällysteisten tierakenteiden olosuhteiden ja ilmiöiden vaikutuksia tierakenteen käyttäytymiseen sekä tuottaa mitoitusmenettelyn verifiointiin soveltuvaa havaintoaineistoa tunnetuissa ja hallituissa olosuhteissa. Laboratoriokokeiden tavoitteena on puolestaan laajentaa simulointikokeiden tuottama informaatio koskemaan erilaisia materiaaleja ja olosuhteita.

Tässä raportissa tarkastellaan TKT -laitteella tehtäviä simulointikokeita, joiden päätavoitteena on selvittää kantavan kerroksen materiaalin, kuormituksen, tierakenteen ja olosuhteiden vaikutuksia kevytpäällysteisten tierakenteiden pysyviin muodonmuutoksiin. Tulosten pohjalta tullaan esittämään, miten pysyvät muodonmuutokset kehittyvät kuormitusten lisääntyessä ja mitkä tekijät ovat oleellisia pysyvien muodonmuutosten kannalta. Lisäksi tulokset pyritään mallintamaan siten, että ne palvelisivat mahdollisimman suoraan kevytpäällysteisten teiden mitoitusmenettelyn kehittämistä. Tuloksia tullaan hyödyntämään myös HVS -kokeiden suunnittelussa ja tulosten tulkinnassa.

2 TIERAKENTEEN TUTKIMUSLAITE

Tierakenteen tutkimuslaite (TKT -laite) on laboratoriomittakaavainen koeratalaitteisto, jolla voidaan kuormittaa tutkittavaa tierakennettä todellista liikennekuormitusta vastaavalla pyöräkuormalla (kuva 1). Tavanomaisten laboratorioskokeiden ongelmana on tunnetusti se, että niiden avulla on vaikeaa simuloida liikenteen tierakenteeseen aiheuttamaa monimutkaista jännitystilaa ja varsinkin leikkausjännityksiä. TKT -laitteistossa liikkuva pyörä aiheuttaa koerakenteeseen todellista tilannetta vastaavan jännitystilaa, missä mm. leikkausjännitykset vaihtavat suuntaansa ja pääjännitykset kiertyvät tarkastelupisteessä kuormituksen vaikutuksesta. TKT -laitteella voidaan tutkia tarkoin kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa tierakenteen ja siinä olevien materiaalien mekaanisia ominaisuuksia ja käyttäytymistä liikennekuormituksen alaisena.



Kuva 1. Tierakenteen tutkimuslaite (TKT -laite). Oulun yliopisto, tie- ja liikennetekniikan laboratorio.

TKT -laite koostuu mekaanisesta laitteistosta, joka sisältää koerakennettä kuormittavan pyörän sekä pyörää kuormittavan ja liikuttavan hydraulikan, erillisestä mittausjärjestelmästä, joka sisältää koerakenteen instrumentointilaitteiston ja tietokoneohjatun tiedonkeräisyksikön sekä koestuslaatikosta, joka sisältää tutkittavan tierakenteen.

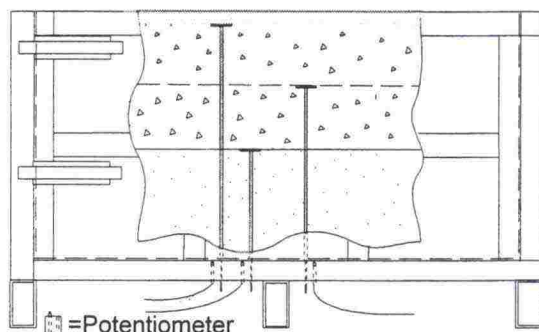
Koestuslaatikko on siirrettävä, mikä mahdollistaa testirakenteen huolellisen rakentamisen ja instrumentoinnin, koska tutkittava rakenne oheislaitteineen voidaan valmistaa muusta laitteistosta riippumattomana yksikkönä. Tällä hetkellä tutkimustarkoituksiin on tehty kaksi erityyppistä koestuslaatikkoa. Toisen koestuslaatikon sisämitat ovat 1200 x 900 x 600 mm (pituus x leveys x korkeus), jolloin tutkittavan rakenteen kokonaispaksuudeksi tulee 0.6 met-

riä. Toinen koestuslaatikko on toteutettu samoja sisämittoja käyttäen, mutta laatikon pohjan tasoa voidaan säädellä.

Tällä hetkellä mittausjärjestelmään voidaan sisällyttää kulloisenkin tutkimustarpeen mukaisesti seuraavat anturit:

- siirtymäanturit, pystysuoran muodonmuutoksen määrittäminen (3 kpl)
- paineanturit (3 kpl)
- pinnan poikkiprofiilin mittaukseen käytettävät laser-anturit (2 kpl)
- pyörän aseman paikka-anturi
- päällysteen lämpötila-anturit

Pyörän kulku-uran keskellä sijaitsevien siirtymäanturien avulla voidaan selvittää tutkittavan rakenteen kimmoisia ja pysyviä muodonmuutoksia pystysuorassa suunnassa halutulla korkeudella rakenteen sisällä (kuva 2). Paineanturien avulla voidaan selvittää pyöräkuorman aiheuttamia pystysuoria jännityksiä. Koerakenteet sisältävät yleensä vähintään yhden paineanturin, joka toimii mittausjärjestelmässä datan tallennuksen liipaisevana anturina kuormitusten määrän perusteella.



Kuva 2. Kimmoisten ja pysyvien muodonmuutosten määrittämisen periaate siirtymäantureilla.

Instrumentoinnin mittausjärjestelmää ohjataan DasyLab -ohjelman avulla. Mittaustulosten tallennus tapahtuu viiden ylityskerran paketteina etukäteen määritettyjen ylityskertojen jälkeen. Testin aikana signaalit saadaan haluttaessa näkyviin kuvaruudulle. Järjestelmän toinen tietokone ohjaa pyörän liikettä ja rakenteen pinnan poikkiprofiilin määrittäviä laser -mittalaitteita. Mittausjärjestelmään voidaan kohtuullisin toimenpitein vielä lisätä muita antureita kuten esimerkiksi venymäliuskoja.

TKT -kokeiden yhteydessä voidaan käyttää myös ns. näytepussia, minkä avulla selvitetään sitomattoman kantavan kerroksen materiaalin hienonemista testin aikana.

TKT -laitteessa pyörän kuormitus voidaan valita väliltä 7...25 kN. Laitteistossa käytetään sileää trukin rengasta, jonka koko on 6.00-R9. Rengaspaine

on säädettävissä halutun suuruiseksi ja esimerkiksi 10 kN pyöräkuorman aiheuttama pintapaine 600 kPa rengaspainetta käytettäessä on noin 700 kPa. Pyörän nopeus testilaatikon keskellä on 1.4 m/sek eli noin 5 km/h. Kuormituksena voidaan käyttää yhteen tai molempiin suuntiin kuormittavaa pyöräkuormitusta. Kokeiden aikana TKT -laite tutkittavine tierakenteineen on melnsuojakaapissa, missä lämpötila on säädettävissä + 5 ja + 60 °C välillä. Erillinen lämpötilan säätöyksikkö tarkkailee ja säätää lämpötilaa automaattisesti testin aikana.

Testiajo voidaan keskeyttää haluttaessa milloin tahansa ja tämän jälkeen käynnistää uudelleen (jatkaa testiä). Laitteisto on lisäksi varustettu hätäkytkimillä, jotka ongelmatilanteissa välittömästi pysäyttävät pyörän liikkeen.

3 TKT -TESTIT

3.1 Testityypit ja -rakenteet

TKT -laitteella tehtävissä kokeissa tarkastellaan 14 erilaista testikombinaatiota, missä jotakin kuormitus-, rakenne- tai olosuhdetekijää muutetaan (taulukko 1). Koesarjalla tutkitaan pysyvien muodonmuutosten syntymistä sitomattomassa kantavassa kerroksessa tyypillisillä kantavan kerroksen materiaaleilla, kun muuttujana on kuormitus, rakenne tai olosuhteet. Pysyvien muodonmuutosten lisäksi kussakin testissä määritetään kimmoisia muodonmuutoksia. Viidessä testissä määritetään myös kantavan kerroksen materiaalin hienoneminen testin aikana. TKT -testien pääasiallisena tavoitteena on tuottaa tietoa siitä, millä painoarvolla (kantavan kerroksen) materiaali-, rakenne- ja olosuhdetekijät tulee ottaa huomioon kevytpäällysteisten teiden mitoitusmenettelyssä.

Taulukko 1. TKT -laitteella tehtävien testien tyypit ja testiolosuhteet.

Testityyppi	Testi-numero	Selitettävät asiat (perustestistä poikkeavat testiolosuhteet)	Rakenne	Kerrospaksuudet	
				Kantava k. [mm]	Suodatink. [mm]
Perustesti	1	Kuormitus molempiin suuntiin	A	170	400
Kuormitus	2	Kuormitus molempiin suuntiin	A	170	400
	3	Kuormitus 7.5 kN (pieni)	A	170	400
	4	Kuormitus 12.5 kN (iso)	A	170	400
Rakenne	5	Rakenne (heikko alusrakenne)	B	170	400***
	6	Rakenne (paksu kantava kerros)	C	240	330
Olosuhteet	7*	Kosteus (rakennep. 200 mm)	D	170	-
	8*	Kosteus (rakennep. 300 mm)	E	170	100
	9*	Kosteus (300 mm, paksu kantava)	F	240	30
Materiaalit **	10	Hienoainespitoisuus ja kosteus	D	170	-
	11	Hienoainespitoisuus ja kosteus	D	170	-
	12	Hienoainespitoisuus ja kosteus	D	170	-
	13	Hienoainespitoisuus ja kosteus	D	170	-
	14	Hienoainespitoisuus ja kosteus	D	170	-

* koestuslaatikon kovan pohjan tasolla simuloidaan sitä, kuinka paljon rakenne on sulanut kevyällä

** rakennepaksuus 200 mm kuten testissä n:o 7

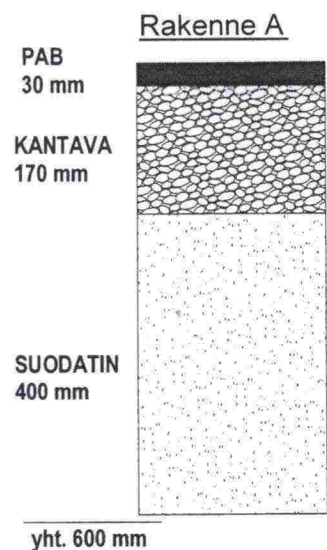
*** sisältää lämpöeristeen

TKT -kokeiden analysoinnissa ns. perustesti toimii referenssitietona vertailtaessa muiden kokeiden tuloksia. Perustestissä pyöräkuorman suuruus on 10 kN (staattinen) ja kuormittavan renkaan ilmanpaine 612 kPa, jolloin renkaan alla koerakenteen pinnassa pintapaineena on 699 kPa. Perustestissä käytetään koestuslaatikkona tavanomaista 600 mm korkuista laatikkoa. Kuormitus tapahtuu yhteen suuntaan kuormitusten määrän ollessa yhteensä 14 000. Testin aikaisena päällysteen lämpötilana käytetään +20°C.

Kaikissa rakenteissa päällysteenä käytetään 30 mm paksuista PAB -kerrosta, jonka alapuolella on sitomaton kantava kerros ja useimmiten myös suodatinkerros. Päällysteen tarkoituksena testeissä on lähinnä toimia sitomattoman kantavan kerroksen suojakerroksena. Kantavan kerroksen paksuutena on joko 170 mm tai 240 mm. Kantavan kerroksen paksuuden valinnassa on pyritty ottamaan huomioon mittakaavatekijä, mihin vaikuttavat mm. kuormituksen suuruus, pyörän kosketuspinta-ala ja kantavan kerroksen materiaalin maksimi raekoko. Suodatinkerroksen paksuus vaihtelee 0 - 400 mm välillä. Lisäksi yhdessä rakenteessa käytetään 70 mm paksuista solumuovieristekerrosta. Tarkemmin määriteltynä testit ja testirakenteet sekä perustelut niiden käyttämiselle ovat seuraavat:

Testi nro 1 on kantavan kerroksen paksuuden, kuormituksen suuruuden (10 kN), materiaalien ominaisuuksien ja olosuhteiden suhteen ns. perustesti, jolla kuvataan kesäolosuhteissa tapahtuvaa pysyvien muodonmuutosten kehittymistä kevytpäällysteisen tien päällysrakenteessa alusrakenteen ollessa hyvä.

Perustestissä samoin kuin testeissä nro 2 - 4 rakenne sisältää 170 mm kantavan kerroksen ja 400 mm suodatinkerroksen materiaalia (rakenne A).

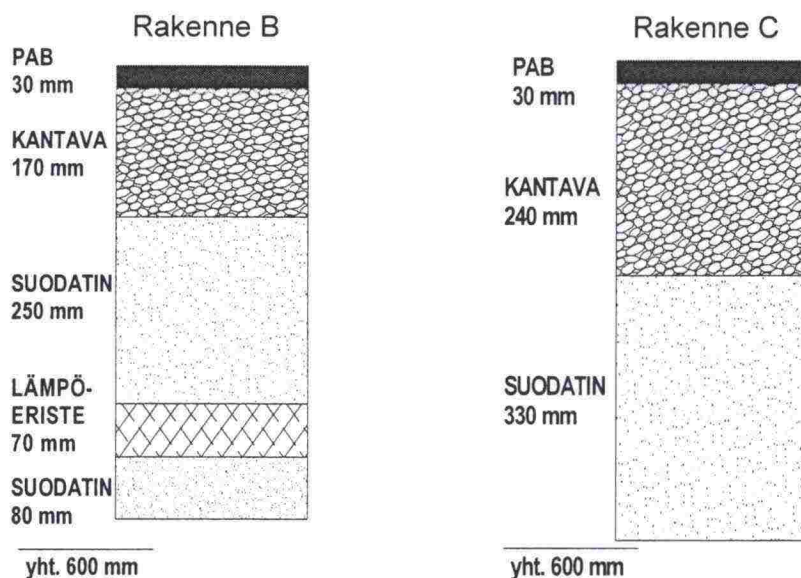


Testissä nro 2 kuormitus tapahtuu perustestistä poiketen molempiin suuntiin muutoin testin ollessa perustestin mukainen (rakenne A). Muun muassa Nottinghamin yliopistossa tehtyjen tutkimusten yhteydessä on todettu, että käytettäessä kuormitusta molempiin suuntiin pysyvät muodonmuutokset kehittyvät nopeammin kuin käytettäessä kuormitus ainoastaan yhteen suuntaan kuten tiellä tapahtuu [1]. Testin nro 2 tuloksia voidaan hyödyntää mm. arvioitaessa HVS -laitteen tuloksia.

Testissä nro 3 käytetään pientä (7.5 kN) ja testissä nro 4 isoa (12.5 kN) kuormitusta muutoin testien ollessa perustestin mukaisia (rakenne A). Testien nro 3 ja 4 avulla selvitetään yhdessä perustestin kanssa kuormituksen suuruuden merkitystä pysyviin muodonmuutoksiin.

Testin nro 5 avulla selvitetään heikon alusrakenteen vaikutusta sitomattomien kerrosten käyttäytymiseen ja sitä kautta päällysrakenteen pysyviin muodonmuutoksiin. Muutoin testi on perustestin mukainen paitsi, että suodatinkerrokseen, 450 mm syvyyteen rakenteen pinnasta, on sijoitettu 70 mm paksuinen solumuovieriste (rakenne B). Lämpöeristeellä pyritään simuloimaan heikkoa alusrakennetta.

Testin nro 6 avulla selvitetään yhdessä perustestin kanssa kantavan kerroksen paksuuden merkitystä pysyviin muodonmuutoksiin. Testirakenne sisältää 240 mm kantavan kerroksen ja 330 mm suodatinkerroksen materiaalia (rakenne C).



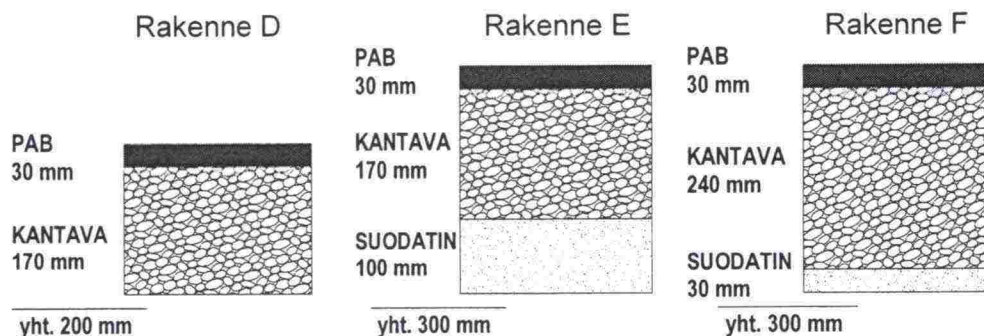
Testissä nro 7 tarkastellaan pysyvien muodonmuutosten syntymistä keväällä siinä vaiheessa, kun ainoastaan kantava kerros on sulanut ja sen kosteus on suuri. Tällöin kantavan kerroksen alapuolinen rakenne on vielä jäässä, jolloin se on jäykkä. Kantava kerros saattaa sulaa ja jäätymä keväällä useita kertoja ennen varsinaisen sulamisen alkamista. Tällä hetkellä ei tunneta osittain sulaneen tierakenteen merkitystä kantavan kerroksen pysyviin muodonmuutoksiin.

Testissä nro 7 samoin kuin testeissä nro 10 - 14 rakenne sisältää kulutuskerroksen lisäksi ainoastaan 170 mm kantavan kerroksen materiaalia, mikä alla on jäykkä teräslevy (rakenne D). Testi kuvaa tilannetta, jossa tierakenne on sulanut ylhäältä päin 200 mm, sulaneen rakenteen kosteus on suuri ja sulaneen rakenteen alla on jäykkä, jäässä oleva kerros. Kosteuden kasvattamiseksi rakenteen alaosaan imeytetään lisää vettä (50 %:n lisäys) ennen koestamista.

Testissä nro 8 tarkastellaan pysyvien muodonmuutosten syntymistä keväällä siinä vaiheessa, kun kantava kerros ja suodatinkerroksen yläosa on sulanut. Testissä nro 8 rakenne sisältää 170 mm kantavan ja 100 mm suodatinkerroksen materiaalia (rakenne E).

Myös testissä nro 9 tarkastellaan pysyvien muodonmuutosten syntymistä keväällä siinä vaiheessa, kun kantava kerros ja suodatinkerroksen yläosa on sulanut. Ainoa ero testiin nro 8 verrattuna on se, että rakenne sisältää 240 mm kantavan ja 30 mm suodatinkerroksen materiaalia (rakenne F). Testi

nro 9 avulla selvitetään kantavan kerroksen paksuuden merkitystä pysyviin muodonmuutoksiin kevätolosuhteissa.



Testeissä nro 10 ja 11 tarkastellaan kantavan kerroksen materiaalin hienoa-ineksen määrän merkitystä pysyvien muodonmuutosten syntymiseen keväällä siinä vaiheessa, kun ainoastaan kantava kerros on sulanut ja sen kosteus on suuri. Testirakenteena käytetään samoin kuin testissä nro 7 rakennetta D. Testien nro 7, 10 ja 11 avulla pyritään tarkentamaan/varmentamaan kantavan kerroksen rakeisuuden laatuvaatimuksia.

Testeissä nro 12 - 14 käytetään aikaisemmista testeistä poiketen eri kantavan kerroksen materiaalia muutoin testien ollessa samanlaisia kuin testit nro 7, 10 ja 11. Testien tarkoituksena on selvittää "heikon" kantavan kerroksen materiaalin merkitystä pysyvien muodonmuutosten syntymiseen kevätolosuhteissa.

Alkuperäistä suunnitelmaa täydentämään tehdään kaksi ylimääräistä testiä (nro 15 ja 16). Testirakenteena näissä testeissä on rakenne D eli sama kuin kevätolosuhteita kuvaavissa testeissä nro 7, 10 - 14, mutta kantavan kerroksen kosteutena on 3 % eli sama kuin kesäolosuhteita kuvaavissa testeissä nro 1 - 6. Testissä nro 15 käytetään samaa kantavan kerroksen materiaalia kuin testeissä nro 1 - 11 ja testissä nro 16 vastaavasti samaa materiaalia kuin testeissä nro 12 - 14. Molemmissa testeissä materiaalien rakeisuudet ovat ns. perusrakeisuuksia (kohta 3.2).

3.2 Koemateriaalit ja rakeisuudet

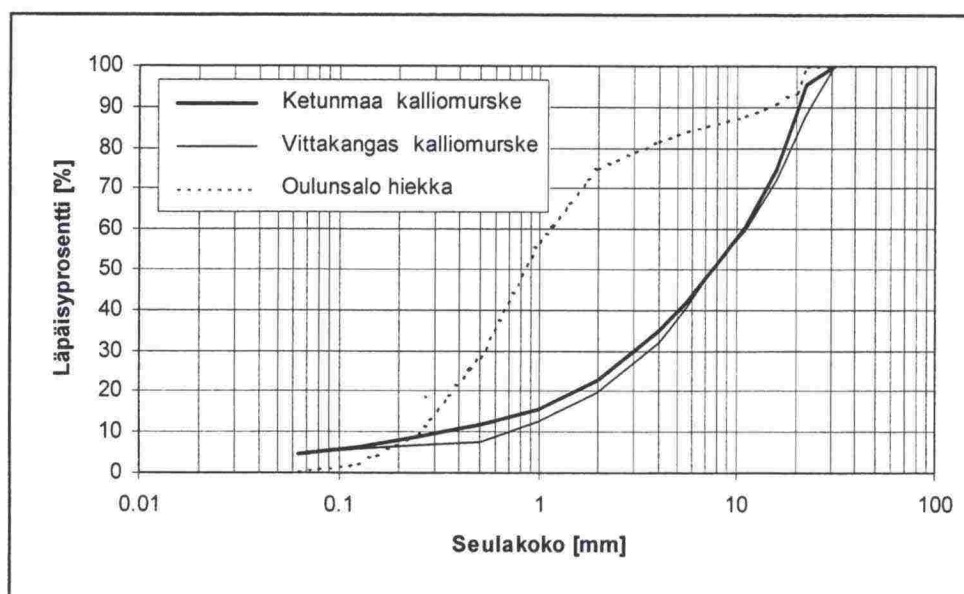
Kaikissa TKT -testeissä kulutuskerroksena on 30 mm paksu PAB. Päälyste on pehmeää, paikkauksiin tarkoitettua öljysoraa. Päälysteen tehtävänä TKT -testeissä on lähinnä toimia sitomattoman kantavan kerroksen suojakerroksena.

Kantavan kerroksen perusmateriaalina on Ketunmaan kalliomurske ja vertailumateriaalina Vittakankaan kalliomurske. Geologien tekemien arvioiden (liite 1) ja laboratoriokokeiden (taulukko 2) perusteella Ketunmaan kalliomurske on tyydyttävää ja Vittakankaan kalliomurske huonoa sitomattoman kantavan kerroksen materiaalia.

Taulukko 2. Kantavan kerroksen materiaalien ominaisuudet.

Laboratoriokoe		Ketunmaa KaM	Vittakangas KaM
Ominaispinta-ala	[m ² /g]	3.225	1.212
Veden adsorptio < #0.063	[%]	2.1	0.9
Los Angeles -luku #10 - #14	[]	24.4	21.5
Kuulamylyarvo	[]	16.2	18.3
Muotoarvo (c/a) / (b/a)	[]	2.51 / 1.62	2.88 / 1.87
Kiintotiheys	[kg/m ³]	2620	2.756

Ketunmaan kalliomurske on rakeisuudeltaan hyvää. TKT -testeissä maksimi raekoko on 32 mm, mistä syystä ei voida käyttää samaa rakeisuutta kuin käytännön hankkeilla. Ketunmaan kalliomurskeen perusrakeisuudeksi valittiin kuvan 3 mukainen rakeisuus, mikä vastaa kohtuullisen tarkasti Fullerin käyrän potenssin 0.5 mukaista rakeisuutta. Sen sijaan Vittakangas kalliomurske on rakeisuudeltaan "roikkuvaa", mikä otettiin huomioon Vittakangas kalliomurskeen perusrakeisuutta valittaessa. Suodatinkerroksen materiaalina on Oulunsalon hiekka. Rakeisuudeltaan hiekka on karkeahkoa.



Kuva 3. Kantavan kerroksen materiaalien perusrakeisuudet ja suodatinhiekan rakeisuus.

Kantavan kerroksen materiaalien perusrakeisuuksien lisäksi testattiin kolme muuta rakeisuutta Proctor -kokeilla, joiden tulosten pohjalta valitaan molemmilla kalliomurskeilla kaksi muuta rakeisuutta TKT -testeihin. Rakeisuusvarioinnit tehtiin hienoainepitoisuutta lisäämällä (#0.063 +1, +2, +4 % - yksikköä) siten, että yli #4 mm läpäisyprosentit ovat samat kuin kalliomurskeiden perusrakeisuuksilla (taulukko 3).

Taulukko 3. Kantavan kerroksen materiaalien rakeisuuksien läpäisyprosentit seuloilla # 0.063, 0.5 ja 2 mm TKT -testeissä.

Kantavan kerroksen Materiaali	Rakeisuus	Läpäisyprosentti			Testi- numero
		# 0.063 [%]	# 0.5 [%]	# 2 [%]	
Ketunmaa kalliomurske	a	4.5	11.8	22.8	1 - 9 ja 15
Ketunmaa kalliomurske	b	5.4	14.2	24.2	10
Ketunmaa kalliomurske	c	6.4	17.1	26.0	11
Ketunmaa kalliomurske	d	8.3	22.4	28.9	
Vittakankaan kalliomurske	e	4.5	7.7	19.8	12 ja 16
Vittakankaan kalliomurske	f	5.4	9.4	21.0	13
Vittakankaan kalliomurske	g	6.4	11.1	22.0	14
Vittakankaan kalliomurske	h	8.4	14.7	24.4	

Testeissä nro 1 - 11 ja 15 käytetään kantavaan kerrokseen Ketunmaan kalliomursketta. Testeissä nro 1 - 9 ja 15 rakeisuus on perusrakeisuuden (rakeisuus a) mukainen. Testissä nro 10 hienoainespitoisuus (# 0.063) on 1 %-yksikön (rakeisuus b) ja testissä nro 11 2 % -yksikköä (rakeisuus c) korkeampi kuin perusrakeisuudella. Testeissä nro 12 - 14 ja 16 käytetään puolestaan kantavaan kerrokseen Vittakankaan kalliomursketta. Testeissä nro 12 ja 16 rakeisuus on perusrakeisuuden (rakeisuus e) mukainen. Testissä nro 13 hienoainespitoisuus (# 0.063) on 1 %-yksikön (rakeisuus f) ja testissä nro 14 2 % -yksikköä (rakeisuus g) korkeampi kuin perusrakeisuudella.

Testissä nro 5 käytetään rakenteessa 70 mm paksuista suulakepuristettua polystyreenisolumuovilevyä (tuotenimi Finnfoam F-4). Lämpöeristeen lyhytaikainen puristuslujuus on 0.40 N/mm² ja pitkäaikainen puristuslujuus 0.17 N/mm². Lujuusominaisuuksien perusteella valittu lämpöeriste soveltuu tierakenteisiin.

3.3 Proctor -kokeet

Sitomattomien materiaalien kuivairtitiheydet erilaisilla rakeisuuksilla määritettiin parannetulla Proctor -menetelmällä käyttäen etukäteen arvioituja kosteuspitoisuuksia (taulukko 4). Kosteuden oletettiin kasvavan hienoainespitoisuuden lisääntyessä. Käytetyillä kosteuksilla kuvataan sekä tiivistämisen aikaisia että kesäolosuhteissa vallitsevia kosteuksia. Kantavan kerroksen materiaaleilla tiheydet kasvavat kosteuden ja hienoainespitoisuuden lisääntyessä.

Proctor -kokeen jälkeen näytteet asetettiin vesihauteeseen kahden vuorokauden ajaksi siten, että muotin alaosa tuli yhden cm syvyyteen. Veden imeytymistä näytteisiin seurattiin punnitsemalla. Aluksi näytteet imivät vettä, mutta muutaman tunnin jälkeen saavutettiin tasapainotila, minkä jälkeen ei enää tapahtunut muutoksia kosteudessa (taulukko 5).

Taulukko 4. Sitomattomien materiaalien tiheydet erilaisilla rakeisuuksilla.

Materiaali	Rakeisuus	Läpäisyprosentti			Proctor -koe	
		# 0.063 [%]	# 0.5 [%]	# 2 [%]	Kosteus [%]	Kuivairtoih. [kg/m ³]
Ketunmaa KaM	a	4.5	11.8	22.8	3.0	2170
Ketunmaa KaM	b	5.4	14.2	24.2	3.5	2201
Ketunmaa KaM	c	6.4	17.1	26.0	4.0	2230
Ketunmaa KaM	d	8.3	22.4	28.9	5.0	2310
Vittakangas KaM	e	4.5	7.7	19.8	3.0	2280
Vittakangas KaM	f	5.4	9.4	21.0	3.5	2290
Vittakangas KaM	g	6.4	11.1	22.0	4.0	2300
Vittakangas KaM	h	8.4	14.7	24.4	5.0	2403
Oulunsalo Hk		0.6	28.2	74.7	7.0	1930

Taulukko 5. Proctor -näytteiden kosteuden lisääntyminen imeytyskokeessa.

Materiaali	Rakeisuus	Läpäisyprosentti			Kosteus	
		# 0.063 [%]	# 0.5 [%]	# 2 [%]	*Ennen [%]	**Jälkeen [%]
Ketunmaa KaM	a	4.5	11.8	22.8	3.0	6.2
Ketunmaa KaM	b	5.4	14.2	24.2	3.5	4.7
Ketunmaa KaM	c	6.4	17.1	26.0	4.0	5.3
Ketunmaa KaM	d	8.3	22.4	28.9	5.0	5.5
Vittakangas KaM	e	4.5	7.7	19.8	3.0	6.1
Vittakangas KaM	f	5.4	9.4	21.0	3.5	5.7
Vittakangas KaM	g	6.4	11.1	22.0	4.0	5.7
Vittakangas KaM	h	8.4	14.7	24.4	5.0	5.8

* Proctor -kokeessa käytetty kosteus ** keskimääräinen kosteus

Imeytyskokeen jälkeen Proctor -näytteistä määritettiin kosteudet kolmelta eri tasolta kosteuden vaihtelun selvittämiseksi. Näytteiden ylä- ja keskiosan kosteudet ovat imeytyksessä lisääntyneet ainoastaan hieman. Sen sijaan näytteiden alaosan kosteudet ovat lisääntyneet huomattavasti vastaten lähes täyttä kyllästymistä. Tulosten perusteella karkeiden kantavan kerroksen materiaalien veden imeytyminen (alhaalta päin) on rajallista.

3.4 Koeolosuhteet, laatikoiden rakentaminen ja koestaminen

Tiivistämisen aikaisena kosteutena käytetään kaikissa testeissä Proctor -kokeissa käytettyjä kosteuksia (taulukko 6). Testeissä nro 7 - 14 imeytetään 50 % lisää vettä Proctor -kokeissa käytettyihin kosteuksiin verrattuna rakenteen alaosaan ennen koestamista. Kantavan kerroksen tavoitettiivysasteena käytetään 97 % ja suodatinkerroksen 96 % laskettuna parannetulla Proctor -kokeella määritetyistä kuivairtoihyksistä.

Taulukko 6. TKT -testeissä käytettävät materiaalit ja koestusolosuhteet.

Materiaali/rakeisuus	Kosteus			Kuivairto- tiheys kg/m ³	Huokoi- suus [%]	Kyllästys- aste (koest.) [%]	Testi- numero
	tiivistä- minen [%]	lisä- vesi [%]	koesta- minen [%]				
Ketunmaa rakeisuus a	3.0	0.0	3.0	2105	19.7	32.0	1 - 6
Ketunmaa rakeisuus a	3.0	1.5	*4.5	2105	19.7	*48.2	7 - 9
Ketunmaa rakeisuus b	3.5	1.75	*5.25	2135	18.5	*60.6	10
Ketunmaa rakeisuus c	4.0	2.0	*6.0	2166	17.3	*75.1	11
Vittakangas rakeis. e	3.0	1.5	*4.5	2211	19.8	*50.0	12
Vittakangas rakeis. f	3.5	1.75	*5.25	2221	19.4	*60.1	13
Vittakangas rakeis. g	4.0	2.0	*6.0	2231	19.0	*70.5	14
Ketunmaa rakeisuus a	3.0	0.0	3.0	2105	19.7	32.0	15
Vittakangas rakeis. e	3.0	0.0	3.0	2211	19.8	33.5	16
Oulunsalo Hk	7.0	0.0	7.0	1850	30.6	42.5	1 - 6
Oulunsalo Hk	7.0	3.5	*10.5	1850	30.6	*61.4	8 ja 9

* keskimääräinen arvo koestamisen alussa

Testeissä nro 7 - 14, missä lisätään vettä ennen koestamista, kantavan kerroksen keskimääräiset kyllästysasteet ennen koestamista vaihtelevat 48 ja 75 % välillä. Käytännössä näissä testeissä kantavan kerroksen alaosa on lähes kyllästyneessä tilassa ja yläosan kosteus lähellä Proctor -kokeiden kosteutta. Ketunmaan kalliomurskeen rakeisuutta d ja Vittakankaan kalliomurskeen rakeisuutta h ei valittu TKT -testeihin sen takia, että niiden kyllästysaste nousisi veden lisäyksen jälkeen yli 100 prosentin, mikä ei ole mahdollista.

Suodatinkerros rakennetaan ja tiivistetään korkeintaan 200 mm paksuisina osakerroksina. Kuivairtotiheyden edellyttämä materiaalmäärä määritetään punnitsemalla ottaen huomioon materiaalin kosteus. Ennen tiivistämistä lisätään tarpeellinen määrä vettä tavoitekosteuden saavuttamiseksi. Tämän jälkeen osakerros tiivistetään haluttuun tasoon, jotta saavutettaisiin tavoiteltu tiiviysaste.

Sitomaton kantava kerros rakennetaan ja tiivistetään osakerroksina, joiden paksuus on korkeintaan 95 mm. Lajittuman välttämiseksi kantavan kerroksen materiaali muodostetaan seulotuista fraktioista korkeintaan 50 kg anoksina. Kuivairtotiheyden edellyttämä materiaalmäärä määritetään punnitsemalla ja lisätään tarpeellinen määrä vettä sekä tiivistetään osakerros haluttuun tasoon.

Viiteen rakenteeseen (testit nro 1, 9, 14 - 16) asennetaan kantavan kerroksen yläosaan ajouran kohdalle pesuseulotuista fraktioita muodostettu näytepussi, jotta saataisiin selville rakentamisen ja koestamisen aikainen kantavan kerroksen materiaalin hienoneminen.

Rakentamisen yhteydessä asennetaan painerasia rakenteen alaosaan kuorimitusten määrän laskentaa varten sekä kolme kappaletta siirtymien määrittystankoa. Siirtymät määritetään kantavan kerroksen yläpinnasta, 75 mm kantavan kerroksen pinnan alapuolelta ja kantavan kerroksen alapinnasta. Testeissä nro 6 ja 9, missä kantavan kerroksen paksuus on 240 mm, alimmat siirtymät määritetään 170 mm syvyydeltä kantavan kerroksen yläpinnasta. Tämä tehdään sen takia, että tulokset olisivat suoraan vertailukelpoisia testien kanssa, missä kantavan kerroksen paksuus on 170 mm. Testeissä nro 7 ja 10 - 16, missä rakenne sisältää päällysteen lisäksi ainoastaan 170 mm paksun kantavan kerroksen, siirtymät määritetään ainoastaan kahdelta ylimmältä tasolta.

Koestamisen aikana siirtymäsignaalit tallennetaan 5 ylityksen ryhmissä ennen ja jälkeen etukäteen määritettyjen ylityskertojen (kuorma päällä). Tässä tutkimuksessa tallennuskohdat ovat 10, 100, 200, 500, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000 ja 14000 ylityskertaa. Tallennetut signaalit analysoidaan ja niistä määritetään pysyvät ja kimmoiset muodonmuutokset. Jatkokäsittelyssä käytetään edellä mainittujen 5 ylityksen ryhmien keskiarvoja.

Koestamisen jälkeen otetaan kevätolosuhteita kuvaavissa testeissä kosteusnäytteet kantavasta kerroksesta kolmelta eri tasolta.

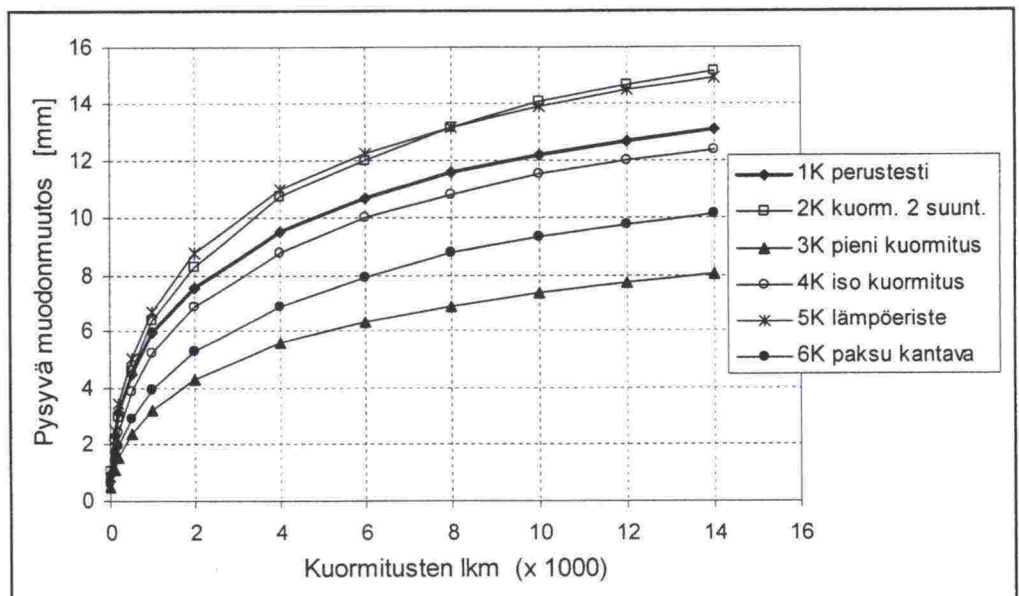
4 TUTKIMUSTULOKSET

4.1 Pysyvät muodonmuutokset

4.1.1 Absoluuttiset pysyvät muodonmuutokset

Testeissä nro 1 - 6 tutkittavien rakenteiden kokonaispaksuudet olivat 600 mm. Sitomattoman kantavan kerroksen kosteutena käytettiin 3.0 % ja suodatinhiekan kosteutena 7.0 %. Testiolosuhteet vastaavat lähinnä kesäolosuhteita.

TKT -testeissä kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset kasvavat säännöllisesti kasvunopeuden hidastuessa kuormitusten lisääntyessä (kuva 4 ja liite 2). Kuormitettaessa rakennetta molempiin suuntiin (2K, K = Ketunmaan kalliomurske) kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset ovat vajaat 20 % suurempia kuin kuormitettaessa rakennetta yhteen suuntaan (1K, perustesti). Kuormituksen vähetessä 25 % (3K) pysyvät muodonmuutokset pienenevät 40 % perustestiin verrattuna. Kuormituksen ollessa 25 % suurempi (4K) kuin perustestin kuormitus kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset ovat hieman pienempiä kuin perustestissä. Tämä johtunee siitä, että perustestin pysyvät muodonmuutokset ovat suhteellisen suuria, jotta perustestin arvoja voitaisiin pitää suoraan vertailun pohjana. Mahdollisena syynä tähän on kantavan kerroksen suunniteltuun nähden liian pienenä toteutunut tiiviysaste. Käytännössä perustestin pysyvien muodonmuutosten olisi odottanut sijoittuvan karkeasti testien 4K ja 6K puoliväliin.



Kuva 4. Kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät pystysuuntaiset siirtymät testeissä nro 1 - 6.

Lämpöeriste (5K) lisää selvästi sitomattoman rakenteen pysyviä muodonmuutoksia. Tämä johtunee siitä, että jäykkyydeltään alhainen kerros alentaa päällä olevien kerrosten jäykkyyttä kuormitustilanteessa. Sen sijaan paksu kantava kerros (6K, 70 mm suurempi kuin muilla rakenteilla) vähentää selvästi pysyviä muodonmuutoksia.

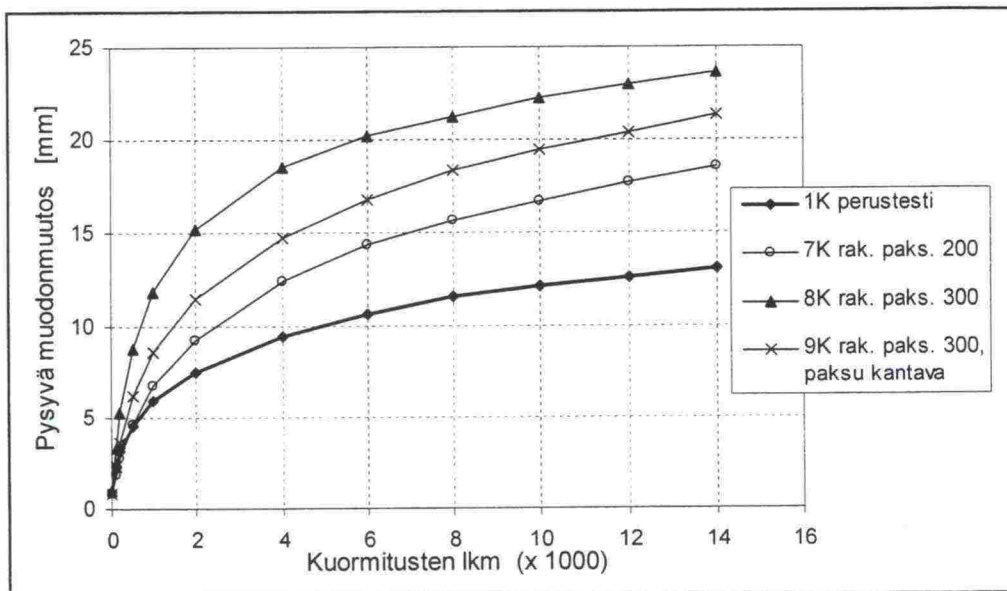
Alin siirtymäanturi on sijoitettu 170 mm syvyydelle kantavan kerroksen pinnasta. Käytetty syvyys on muilla rakenteilla paitsi 6K kantavan kerroksen ja suodatinkerroksen rajapinta. Hiekkakerroksen pinnan pysyvät muodonmuutokset ovat luokkaa 10 % kantavan kerroksen pinnan pysyvistä muodonmuutoksista (liite 3 kuva1). Eri rakenteilla hiekkakerroksen pinnan pysyvien muodonmuutosten suhteet ovat samankaltaisia kuin tarkasteltaessa kantavan kerroksen yläpinnan pysyviä muodonmuutoksia. Lämpöeristetyllä rakenteella (5K) ja suurella kuormituksella (4K) hiekkakerroksen deformatuminen on suhteellisesti hieman suurempaa kuin tarkasteltaessa kantavan kerroksen yläpinnan pysyviä muodonmuutoksia. Sen sijaan kuormitettaessa kahteen suuntaan (2K), pienellä kuormituksella (3K) ja paksulla kantavalla kerroksella (6K) hiekkakerroksen deformatuminen on suhteellisesti hieman pienempää kuin tarkasteltaessa kantavan kerroksen yläpinnan pysyviä muodonmuutoksia eri rakenteilla.

Keskimmäinen siirtymäanturi on sijoitettu 75 mm kantavan kerroksen pinnan alapuolelle. Tällä tasolla pysyvät muodonmuutokset käyttäytyvät samankaltaisesti kuin kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset (liite 2).

Testeissä nro 7 - 9, tutkittavien rakenteiden kokonaispaksuudet olivat joko 200 mm (7K) tai 300 mm (8K ja 9K) ja sitomattomien kerrosten kosteus 50 % korkeampi kuin testeissä nro 1 - 6. Testiolosuhteet testeissä nro 7 - 9 vastaavat lähinnä kevätolosuhteita (rakenteen yläosa sulanut ja suuri kosteuspitoisuus).

Myös näissä testeissä kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset kasvavat säännöllisesti kuormitusten lisääntyessä (kuva 5). Kosteuden lisääntyminen sitomattomissa kerroksissa (7K - 9K) kasvattaa pysyviä muodonmuutoksia merkittävästi perustettiin verrattuna. Testeissä 8K ja 9K kantavan kerroksen alla on ohut hiekkakerros. Tällöin pysyvät muodonmuutokset ovat selvästi suurempia kuin testissä 7K, missä kantavan kerroksen alla on teräslevy. Kantavan kerroksen ollessa 240 mm paksu (9K) pysyvät muodonmuutokset ovat jonkin verran vähäisempiä kuin testissä 8K, missä kantavan kerroksen paksuus on 170 mm.

Alimman siirtymäanturin tasolla (200 mm rakenteen pinnasta) pysyvät muodonmuutokset ovat suuria testeihin nro 1 - 6 verrattuna (liite 3 kuva 2). Tämä johtuu siitä, että käytännössä lähes kyllästyneessä tilassa oleva hiekka deformatuu herkästi.

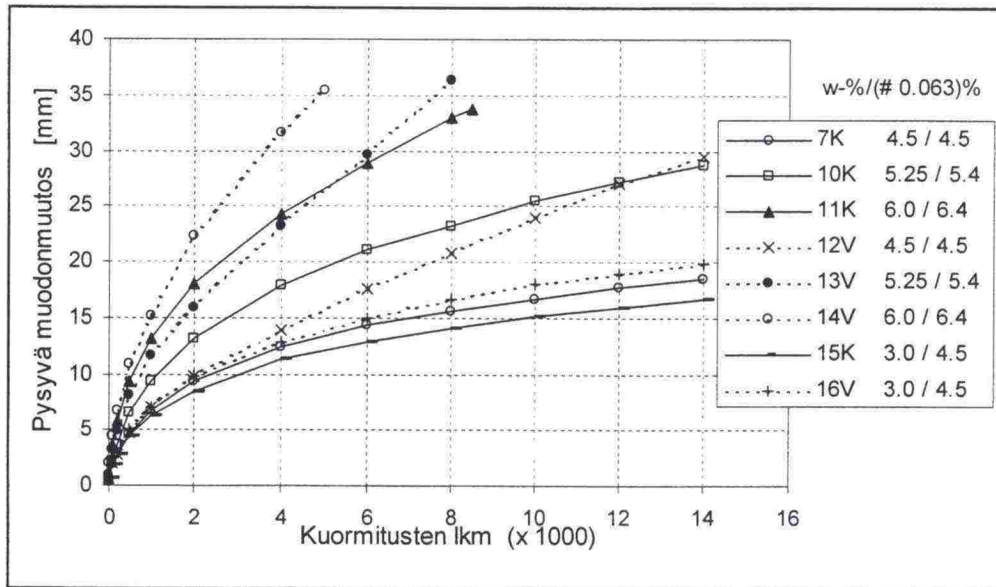


Kuva 5. Kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät pystysuuntaiset siirtymät testeissä nro 1 ja 7 - 9.

Testeissä nro 7 ja 10 - 16 tutkittavien rakenteiden kokonaispaksuudet olivat 200 mm. Testeissä nro 7, 10, 11 ja 15 kantavan kerroksen materiaalina oli Ketunmaan kalliomurske (K) ja testeissä nro 12 - 14 ja 16 Vittakankaan kalliomurske (V). Testeissä 7K, 12K, 15K ja 16V hienoainespitoisuus (# 0.063) oli 4.5 %, testeissä 10K ja 13V 5.4 % ja testeissä 11K ja 14V 6.4 %. Vastavasti kosteudet olivat 4.5, 5.25 ja 6.0 % lukuunottamatta testejä 15K ja 16V, missä kosteudet olivat 3.0 %. Testeillä pyritään simuloimaan kevätolosuhteita muuttujien ollessa kantavan kerroksen materiaali, hienoainespitoisuus ja kosteus.

Myös testeissä nro 7 ja 10 - 16 kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset kasvavat säännöllisesti (kuva 6). Hienoainespitoisuuden ja samalla kosteuden lisääntyessä pysyvät muodonmuutokset kasvavat huomattavasti. Hienoainespitoisuuden (# 0.063 mm) lisääntyminen 4.5 %:sta 6.4 %:iin kasvattaa pysyvät muodonmuutokset kaksinkertaiseksi (testit nro 7 ja 11 ⇔ testit nro 12 ja 14). Em. prosenttiluvut vastaavat seulan # 0.074 mm läpäisyprosentteja 5 ja 7. Hienoainespitoisuuden (# 0.063) ollessa 5.4 % (testit nro 10 ja 13) pysyvät muodonmuutokset sijoittuvat edellä mainittujen testien nro 7 ja 10 sekä testien nro 12 ja 14 puoliväliin.

Tuloksia arvioitaessa on toki otettava huomioon se, että hienoainespitoisuuden lisääntyessä 2 %-yksikköä kosteus lisääntyy 4.5 %:sta 6.0 %:iin ja kylästysaste nousee noin 50 %:sta 70 - 75 %:iin. Käytännössä 6.0 % kosteus ei ole mitenkään poikkeuksellinen tieolosuhteissa keväisin, jos kantavan kerroksen materiaali sisältää kohtuullisen paljon hienoainesta.



Kuva 6. Kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät pystysuuntaiset siirtymät testeissä nro 7 ja 10 - 16.

Testeissä 15K ja 16V (hienoainespitoisuus # 0.063 mm 4.5 % ja kosteus 3 %) pysyvät muodonmuutokset ovat lähellä toisiaan ja samalla lähellä testin 7K (# 0.063 4.5 % ja kosteus 4.5 %) tuloksia. Toisin sanoen Ketunmaan kalliomurskeella kosteuden lisääntyminen 3.0 %:sta 4.5 %:iin ei ole juurikaan lisännyt pysyviä muodonmuutoksia, kun taas Vittakankaan kalliomurskeella vastaava kosteuden lisääntyminen (testit 16V ja 12V) kasvattaa pysyviä muodonmuutoksia merkittävästi.

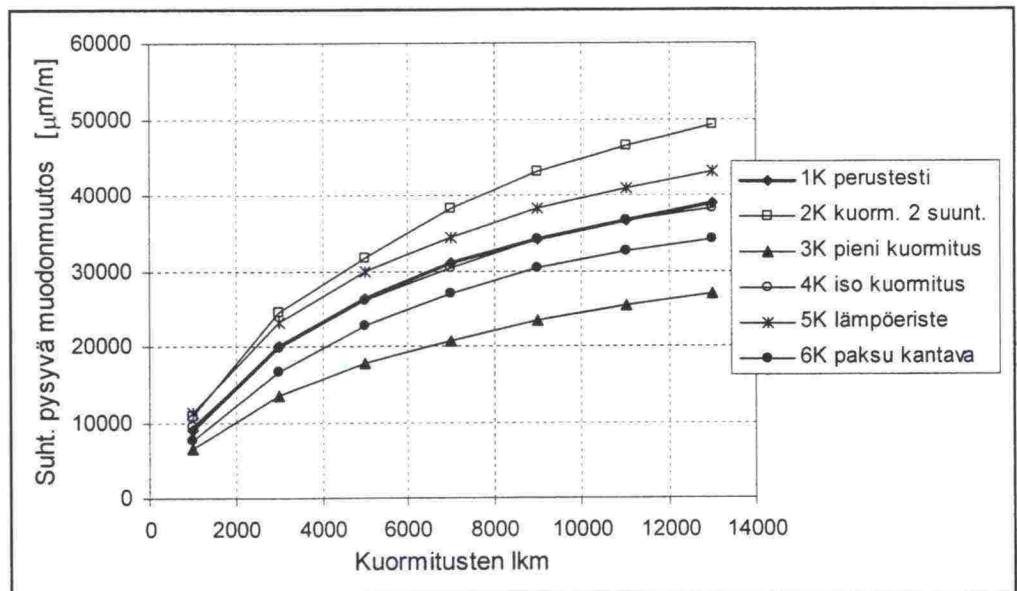
Vittakankaan kalliomurskeella pysyvät muodonmuutokset ovat huomattavasti suurempia kuin Ketunmaan kalliomurskeella kosteuden ollessa yli 3 %. Geologien arvioiden mukaan Vittakankaan kalliomurske on huono (heikko) sitomattoman kantavan kerroksen materiaali. Vittakankaan kalliomurskeella lisäongelmia aiheuttaa rakeisuuskäyrän "roikkuvuus" ja rakeiden suuri liuskeisuus. TKT -testit tukevat käytetyillä materiaaleilla geologien tekemiä arvioita materiaalien käytettävyydestä.

4.1.2 Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset

Absoluuttisia pysyviä muodonmuutoksia tarkasteltaessa tulokset riippuvat koetetusta rakenteesta kuten kerrospaksuuksista. Pyrittäessä yleistämään tuloksia on helpompi käyttää suhteellisia arvoja.

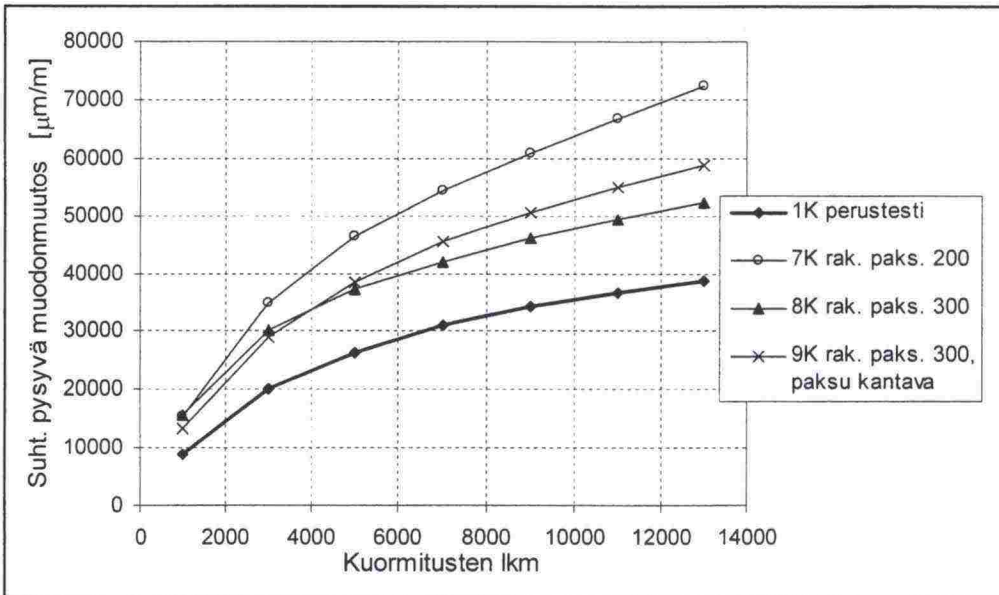
Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat ko. kerroksen ylä- ja alapinnan pysyvien pystysuuntaisten siirtymien erotus jaettuna kerrospaksuudella. Lähtötilanteeksi on valittu 1000 kuormitusta johtuen koejärjestelyiden asettamista reunaehdoista, ohuesta pehmeästä sidotusta kerroksesta sekä siitä, ettei liikenne tiivistä rakennetta rakentamisen aikana. Ensimmäiset tuhat kuormitusta ovat siis eräänlaista esikuormitusta.

Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset kasvavat säännöllisiä kuormitusten lisääntyessä (kuva 7 ja liite 4). Kuormitettaessa rakennetta molempiin suuntiin (2K) suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat vajaat 30 % suurempia kuin perustestissä. Kantavan kerroksen yläpinnan pysyviä muodonmuutoksia tarkasteltaessa ero oli vajaat 20 % (kuva 4). Tästä voidaan päätellä, että kuormitus molempiin suuntiin rasittaa nimenomaan kantavaa kerrosta. Muiden tekijöiden, kuten kuormituksen suuruus, lämmöneriste ja kantavan kerroksen paksuus, suhteen erot kantavan kerroksen suhteellisissa pysyvissä muodonmuutoksissa ovat jonkin verran pienempiä kuin tarkasteltaessa kantavan kerroksen yläpinnan pysyviä siirtymiä. Tämä johtuu siitä, että edellä mainitut tekijät vaikuttavat enemmän kantavan kerroksen alapuoliseen rakenteeseen kuin itse kantavaan kerrokseen.



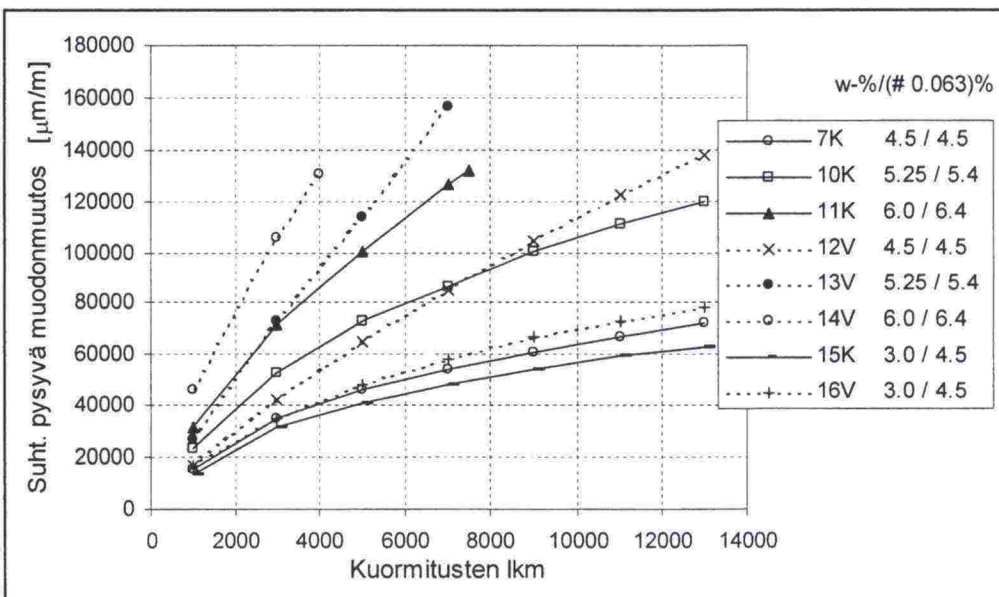
Kuva 7. Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset testeissä nro 1 - 6.

Testeissä nro 7 - 9 kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat selvästi suurempia kuin perustestissä (kuva 8). Erot testien nro 7 - 9 välillä johtunevat lähinnä kantavan kerroksen kosteuseroista. Testeissä lisävesi syötettiin ennen koestamista rakenteen alaosaan. Rakenteesta johtuen testissä 7K lisävesi tuli kokonaisuudessaan kantavaan kerrokseen. Testissä 9K käytännössä suurempi osa lisävedestä kostutti kantavaa kerrosta kuin testissä 8K, missä hiekkakerroksen paksuus (100 mm) on suurempi kuin testissä 9K (30 mm).



Kuva 8. Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset testeissä nro 1 ja 7 - 9.

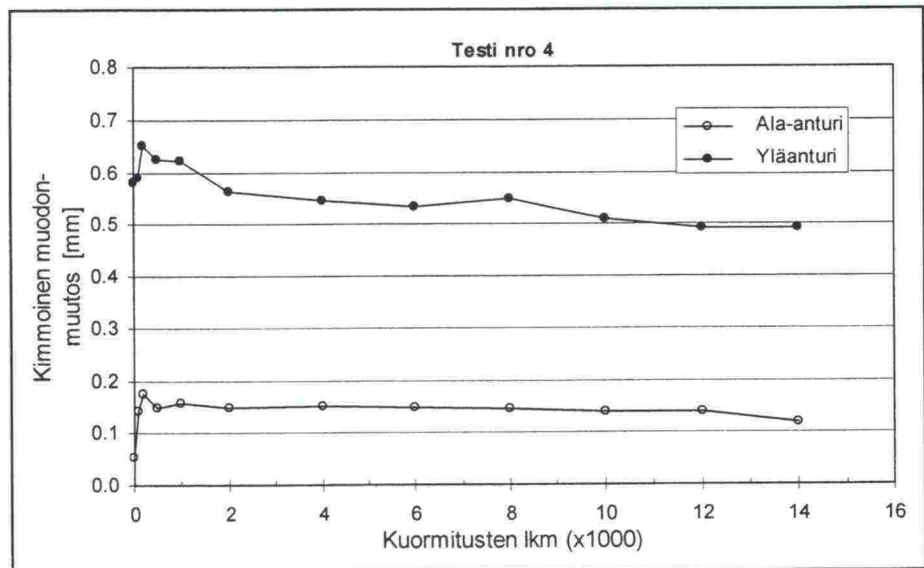
Testeissä nro 7 ja 10 - 16 kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset (kuva 9) käyttäytyvät samalla tapaa kuin kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät siirtymät (kuva 6). Tämä on varsin luonnollista, koska kyseessä olevissa testeissä sitomaton rakenne koostuu yksinomaan kantavasta kerroksesta.



Kuva 9. Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset testeissä nro 7 ja 10 - 16.

4.2 Kimmoiset muodonmuutokset

Kimmoiset kokoonpuristumat ovat ensimmäisen tuhannen ylityksen aikana epäsäännöllisiä (kuva 10 ja liite 5). Tämän jälkeen kokoonpuristumat ovat kohtuullisen tasaisia, joskin ne yleensä pienenevät jonkin verran kuormitusten lukumäärän lisääntyessä. Pieneneminen johtuu rakenteen tiivistymisen lisäksi plastisen deformatumisen aiheuttamasta kerrosten ohenemisesta. Suhteellisesti ottaen kimmoisten kokoonpuristumien tarkkuus on huonompi kuin pysyvien muodonmuutosten tarkkuus. Tämä johtuu siitä, että kumulatiiviset pysyvät kokoonpuristumat ovat moninkertaisia kimmoisiin kokoonpuristumiin verrattuna. Tällöin mittaustarkkuudesta johtuva "virhe" vaikuttaa suhteellisesti enemmän kimmoisiin kuin pysyviin muodonmuutoksiin.



Kuva 10. Absoluuttiset kimmoiset siirtymät testissä nro 4.

Testeissä nro 1 - 6 kimmoiset kokoonpuristumat ovat varsin loogisia lukuunottamatta perustestiä, missä kokoonpuristuma on suhteellisen suuri. Yläanturin perusteella koko sitomattoman rakenteen pienin kokoonpuristuma on testissä 3K, missä kuormitus on muita testejä pienempi. Perustestiä lukuunottamatta suurimmat kokoonpuristumat ovat testeissä 2K ja 5K. Testissä 2K kuormitus on molempiin suuntiin ja testissä 5K rakenne sisältää lämpöeristeen. Ala-anturin perusteella suurin hiekkakerroksen kimmoinen kokoonpuristuma on lämpöeristetyllä rakenteella testissä 5K.

Testeissä nro 7 - 14 kimmoiset kokoonpuristumat ovat selvästi suurempia kuin testeissä nro 1 - 6, mikä johtuu pääasiassa suuresta kosteudesta. Suuri kosteus on aiheuttanut myös sen, että testien 7 - 14 kimmoiset kokoonpuristumat eivät ole ilmeisesti yhtä tarkkoja kuin kesäolosuhteita kuvaavissa testeissä (tulosten "huojunta"). Myös testeissä 15K ja 16V, missä kantavan kerroksen kosteus on ainoastaan 3.0 %, kimmoiset kokoonpuristumat ovat suurempia kuin testeissä nro 1 - 6. Tämä johtunee siitä, että kova pohja on lähellä rakenteen pintaa (200 mm).

4.3 Kantavan kerroksen materiaalien hienoneminen

Kantavan kerroksen materiaalien hienonemista tiivistämisen ja koestamisen aikana selvitettiin kantavaan kerroksen yläosaan ajouran kohdalle asennettuna näytepussin avulla. Ketunmaan kalliomurskeella testeissä nro1 ja 9 hienoainespitoisuus lisääntyi rakentamisen ja koestamisen aikana on 0.5 % -yksikköä ja testissä 15K yli 1 % -yksikön (taulukko 7). Ero selittynee sillä, että testissä 15K kova pohja on lähellä rakenteen pintaa. Tällöin rasitukset ovat ilmeisesti myös kantavan kerroksen yläosassa suuria.

Taulukko 7. *Kantavan kerroksen materiaalien hienoaineksen lisääntymisen testeissä nro 1, 9, 14 - 16.*

Testi-numero	Materiaali/rakeisuus	Kuormitukset [lkm]	Läpäisyprosentti # 0.063		
			ennen [%]	jälkeen [%]	ero [%-yks.]
1	Ketunmaa rakeisuus a	14 000	4.51	4.92	0.41
9	Ketunmaa rakeisuus a	14 000	4.51	5.06	0.55
15	Ketunmaa rakeisuus a	14 000	4.51	5.86	1.35
14	Vittakangas rakeis. g	5 000	6.40	7.48	1.08
16	Vittakangas rakeis. e	14 000	4.50	6.79	2.29

Vittakankaan kalliomurskeella hienoaineksen lisääntyminen on lähes kaksinkertaista Ketunmaan kalliomurskeeseen verrattuna (testit 15K ja 16V). Tulosta tukee myös testi 14V, missä hienoaineksen lisääntyminen on 5 000 kuormituksella lähes yhtä suurta kuin testissä 15K 14 000 kuormituksella.

4.4 Kantavan kerroksen kosteudet testin jälkeen

TKT -testeissä nro 7 - 14, missä imeytettiin lisäettä rakenteen alaosaan ennen koestamista, sekä testeissä nro 15 ja 16 määritettiin kantavan kerroksen kosteudet kolmelta eri korkeustasolta (taulukko 8). Keskimääräiset kosteudet ja sitä kautta kyllästysasteet vastaavat kohtuullisesti kokeisiin suunniteltuja arvoja (vrt. taulukko 6).

Testeissä nro 8 ja 9 keskimääräiset kosteudet ja kyllästysasteet ovat pienempiä kuin suunnitellut arvot, mikä johtuu siitä, että näissä rakenteissa on alimpana hiekkakerros, mikä on pidättänyt merkittävän osan lisävedestä. Testeissä 13 ja 14 keskimääräiset kosteudet ja kyllästysasteet ovat suurempia kuin suunnitellut arvot, mikä puolestaan johtuu lähellä kyllästysastetta olevien karkeiden materiaalien kosteuspitoisuuksien määrittämisongelmista (näytteenoton vaikeus).

Taulukko 8. Kantavan kerroksen kosteudet koestamisen jälkeen testeissä nro 7 - 16.

Testi-numero	Materiaali/rakeisuus	Kosteus				*Kyllästysaste			
		Ylä [%]	Keski [%]	Ala [%]	Ka	Ylä [%]	Keski [%]	Ala [%]	Ka
7	Ketunmaa rakeisuus a	2.9	4.1	7.2	4.7	31	44	77	51
8	Ketunmaa rakeisuus a	2.2	3.1	6.2	3.8	24	33	66	41
9	Ketunmaa rakeisuus a	2.5	2.9	5.6	3.7	27	31	60	39
10	Ketunmaa rakeisuus b	3.3	4.8	6.9	5.0	38	55	80	58
11	Ketunmaa rakeisuus c	3.2	6.8	8.6	6.2	40	85	108	78
12	Vittakangas rakeis. e	4.1	2.9	5.8	4.3	46	32	65	48
13	Vittakangas rakeis. f	3.5	4.7	10.7	6.3	40	54	122	72
14	Vittakangas rakeis. g	4.6	6.2	10.1	7.0	54	73	118	82
15	Ketunmaa rakeisuus a	2.8	3.3	3.6	3.2	30	35	38	35
16	Vittakangas rakeis. e	2.8	2.9	3.1	2.9	31	32	35	33

* laskennallinen

Eri korkeustasoilta määritetyt kosteudet poikkeavat selvästi toisistaan luukuunnottamatta testejä nro 15 ja 16. Kantavan kerroksen yläosan kosteus on selvästi alle suunnitellun kosteuden ja vastaavasti alaosan kosteus yli suunnitellun kosteuden. Kerroksen keskiosasta määritetyt kosteudet ovat hieman alle suunnitellun kosteuden. Tulosten perusteella kosteudet eivät ole jakaantuneet tasaisesti rakenteilla, mihin lisättiin vettä ennen koestamista. Todennäköisesti tilanne on samankaltainen myös normaaleilla tierakenteilla kevään johtuen painovoimasta.

Testeissä 15K ja 16 V eri korkeustasoilta määritetyt kosteudet eivät juurikaan poikkea toisistaan. Tämä johtuu ennen kaikkea alhaisesta kosteudesta (3 %). Testien nro 15 ja 16 perusteella voidaan olettaa, että myös muissa testeissä, missä pyrittiin 3 % kosteuteen, kosteus on jakaantunut suhteellisen tasaisesti kantavassa kerroksessa.

4.5 Pysyvien muodonmuutosten mallintaminen

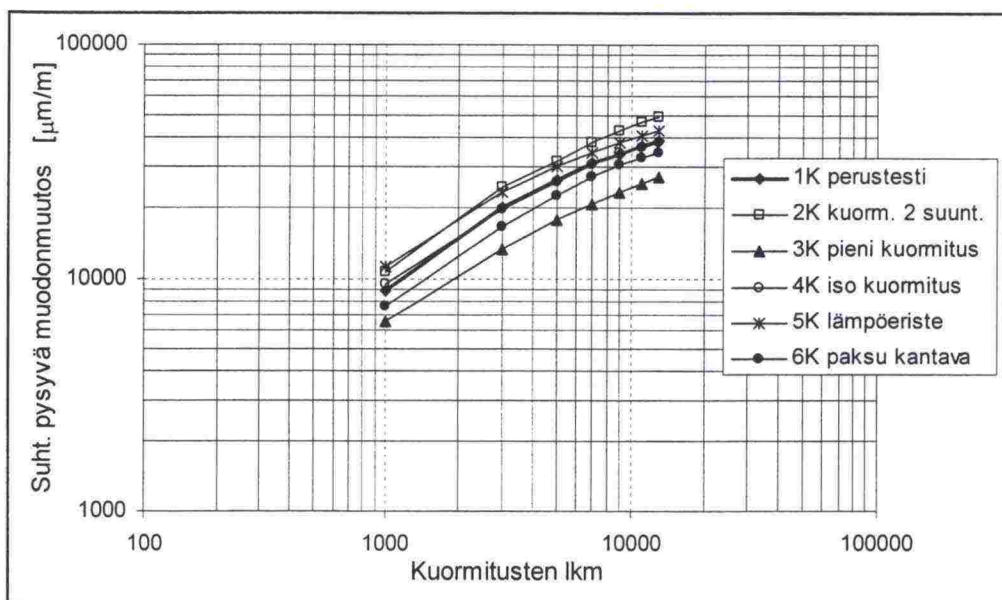
4.5.1 Yleistä

TKT -testeissä mitattujen kantavan kerroksen pysyvien muodonmuutosten mallintamisella pyritään omalta osaltaan siihen, että pysyvät muodonmuutokset tai paremminkin niistä johtuva urautuminen/harjanteen muodostuminen saataisiin osaksi kevytpäällysteisten teiden mitoitusten menettelyä. Mallinnuksessa käytettävät tekijät tulisi pystyä luotettavasti määrittämään TKT -testien yhteydessä. Tekijät tulisi olla kohtuullisen helposti määritettävissä myös käytännön mitoitustilanteissa.

TKT -testeissä mitataan rakenteen eri tasoilla pysyviä ja kimmoisia siirtymiä, joiden avulla voidaan määrittää kerrosten sekä absoluuttiset että suhteelliset

pysyvät muodonmuutokset ja kimmoiset kokoonpuristumat. Kimmoisten siirtymien avulla pystytään takaisinlaskentamenettelyllä määrittämään kerrosten moduulit, joiden avulla puolestaan voidaan määrittää monikerrosohjelmilla erilaisia tierakenteen rasituksia. Lisäksi ovat käytettävissä materiaalien rakeisuudet, kosteudet ja kiintotiheydet sekä kerrosten irtotiheydet (tiiviyssasteet). Kolmen viimeksi mainitun tekijän avulla voidaan laskea tilavuussuhteet kuten huokoisuudet ja kyllästysasteet.

Esittämällä kantavan kerroksen suhteellisten pysyvien muodonmuutosten kehittyminen kuormitusten lisääntyessä logaritmisilla (log-log) asteikoilla pysyvien muodonmuutosten ja kuormitusten lukumäärän väliset riippuvuudet ovat lähes suoraviivaisia (kuva 11 sekä liite 6 kuvat 1 ja 2). Lisäksi eri testeissä suorat ovat lähes yhdensuuntaisia.



Kuva 11. Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset logaritmiasteikoilla testeissä nro 1 - 6.

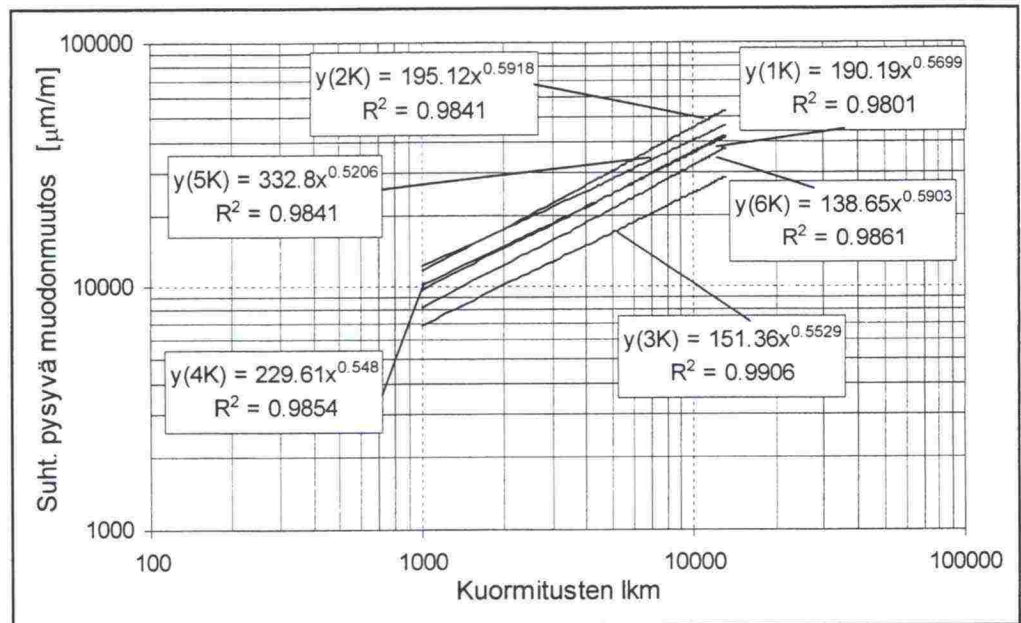
Regressioanalyysin perusteella suhteellisten pysyvien muodonmuutosten kehittyminen noudattaa kaavan 1 mukaista riippuvuutta (kuva 12 sekä liite 6 kuvat 3 ja 4):

$$\varepsilon_p = a \cdot N^b \quad (1)$$

missä

- ε_p = kumulatiivinen suhteellinen pysyvä muodonmuutos $\mu\text{m}/\text{m}$
 N = kuormitusten lukumäärä (-1 000)
 a, b = regressioparametreja

Kaava 1 on sama, mitä Sweere [2] on käyttänyt kuvatessaan kitkamaalajien pysyvien muodonmuutosten kehittymistä.



Kuva 12. Kantavan kerroksen suhteellisia pysyviä muodonmuutoksia kuvaavat regressioyhtälöt testeissä nro 1 - 6.

Veverka [3] puolestaan esittää, että kitkamaalajeilla kimmoisten ja pysyvien muodonmuutosten välillä on kaavan 2 mukainen yhteys.

$$\varepsilon_p = a' \cdot \varepsilon_e \cdot N^b \quad (2)$$

missä

- ε_p = kumulatiivinen suhteellinen pysyvä muodonmuutos $\mu\text{m}/\text{m}$
- ε_e = suhteellinen kimmoisen muodonmuutos $\mu\text{m}/\text{m}$
- N = kuormitusten lukumäärä (-1 000)
- a', b = regressioparametreja

Kaavoilla 1 ja 2 saadaan sama tulos, jos kaavan 1 parametri a on yhtä kuin kaavan 2 parametri a' kerrottuna suhteellisella kimmoisella muodonmuutoksella ε_e .

Myös TKT -testien kantavan kerroksen pysyviä muodonmuutoksia mallinnetaan kaavan 2 mukaisilla kimmoisen muodonmuutoksen sisältävillä yhtälöillä. Tällöin mallinnuksessa käytetään suhteellisena kimmoisena muodonmuutoksena sekä kantavan kerroksen pystysuoraa kimmoista kokoonpuristumaa että laskennallisesti määritettyä leikkausmuodonmuutosta (hydrostaattisen ja deviatorisen jännityksen aikaansaamaa pystysuuntaista kimmoista muodonmuutosta). TKT -testit on yleensä keskeytetty ennen suunniteltua 14 000

kuormitusta, jos kantavan kerroksen yläpinnan pysyvä muodonmuutos kasvaa selvästi yli 30 mm. Tällöin mallinnuksessa käytetään 2000 kuormituksen kohdalla määritettyjä kimmoisten muodonmuutosten arvoja. Muutoin mallinnuksessa käytetään 6000 kuormituksen kohdalla määritettyjä arvoja. Edellä mainittujen kuormituskohtien oletetaan edustavan kimmoisten ominaisuuksien osalta koko testiä.

Testeissä nro 1 - 6 suhteelliset kimmoiset kokoonpuristumat ovat varsin loogisia lukuunottamatta perustestiä, missä kokoonpuristuma on suuri (taulukko 9). Mallinnuksen kannalta tällä ei ole kovinkaan suurta merkitystä, koska myös pysyvät muodonmuutokset ovat perustestissä suhteellisen suuria. Testeissä nro 7, 10 - 14 suhteelliset kimmoiset kokoonpuristumat ovat selvästi suurempia kuin testeissä nro 1 - 6, mikä johtunee pääasiassa suuresta kosteudesta. Myös testeissä nro 15 ja 16 suhteelliset kimmoiset kokoonpuristumat ovat suuria, mikä johtuu siitä, että kova pohja on lähellä rakenteen pintaa (200 mm). Testeissä nro 8 ja 9 suhteelliset kimmoiset kokoonpuristumat ovat hieman suurempia kuin testeissä nro 1 - 6, mutta selvästi pienempiä kuin testeissä nro 7, 10 - 14. Testien nro 8 ja 9 suhteellisen pienet kimmoiset kokoonpuristumat selittyvät kovan pohjan etäisyydellä rakenteen pinnasta (100 mm suurempi kuin testeissä nro 7, 10 - 14) ja alhaisella kantavan kerroksen kosteudella (vrt. taulukko 8)

Taulukko 9. Suhteelliset kimmoiset kokoonpuristumat ja leikkausmuodonmuutokset testeissä nro 1 - 16.

Testi-numero	Materiaali *	Läpäisy # 0.063 [%]	Kosteus (koest.) [%]	Kyllästysaste (koest.) [%]	Suhteellinen kokoonpuristuma Kuormitusten lkm.		Suhteellinen leikkausmuodonm. Kuormitusten lkm.	
					2000 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	6000 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	2000 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	6000 [$\mu\text{m}/\text{m}$]
1	K	4.5	3.0	32.0		2775		1856
2	K	4.5	3.0	32.0		2715		1876
3	K	4.5	3.0	32.0		1882		1311
4	K	4.5	3.0	32.0		2381		1730
5	K	4.5	3.0	32.0		2116		1607
6	K	4.5	3.0	32.0		2250		1631
7	K	4.5	4.5	48.2	4262	4175	2311	2302
8	K	4.5	4.5	48.2		2830		2083
9	K	4.5	4.5	48.2		2833		2465
10	K	5.4	5.25	60.6	3772	3599	2078	2012
11	K	6.4	6.0	75.1	4408		2425	
12	V	4.5	4.5	50.0	5303	5707	2877	3113
13	V	5.4	5.25	60.1	5406		2944	
14	V	6.4	6.0	70.5	4957		2731	
15	K	4.5	3.0	32.0	4209	4195	2281	2299
16	V	4.5	3.0	33.5	5281	4965	2856	2720

* K = Ketunmaa, V = Vittakangas

Yleisesti otaksutaan, että nimenomaan leikkausmuodonmuutokset aiheuttavat pysyviä muodonmuutoksia. Mallinnukseen suhteelliset kimmoiset leikkausmuodonmuutokset määritettiin laskennallisesti renkaan kosketuspintaa vastaavan ympyränmuotoisen kuormituspinnan reunan kohdalla kantavan kerroksen puolivälissä. Määrittäminen pohjautuu testirakenteiden sitomattomien kerrosten takaisinlaskettuihin moduuleihin. Takaisinlaskennassa käytettiin seuraavia oletuksia:

- testit nro 1 - 6, 8 ja 9 kolmikerrosrakenteita
- testit nro 7, 10 - 16 kaksikerrosrakenteita
- päällysteellä vakio moduuli 500 MPa (hidas kuormitus, pehmeä öljysora)
- sitomattomien kerrosten materiaalit ovat kitkamaalajeja, joilla moduulin jännitystilariippuvuus noudattaa ns. $K-\phi$ mallia
- moduulien määrityskohta on kerrosten keskikohdassa
- takaisinlaskennassa sovitetaan TKT -testeissä määritettyjä sitomattomien kerrosten yläpinnan kimmoisia siirtymiä

Moduulien takaisinlaskentaan samoin kuin suhteellisten leikkausmuodonmuutosten määrittämiseen on käytetty Kenlayer -ohjelmaa [4].

Kimmoisten suhteellisten leikkausmuodonmuutosten ja kokoonpuristumien välillä on selvä riippuvuus, mikä on sinänsä luonnollista, koska samaa lähtöaineistoa käytettiin molempien tekijöiden määrittämiseen (taulukko 9).

4.5.2 Pysyvät muodonmuutokset kesäolosuhteissa

Kesäolosuhteiden mallinnuksessa tarkastellaan pääasiassa testejä nro 1 - 6, missä rakenteen kokonaispaksuus on 600 mm ja sitomattomien kerrosten kosteudet edustavat kesäolosuhteita (kantava kerros 3 % ja suodatinkerros 7 %). Vertailun vuoksi tässä yhteydessä tarkastellaan jossain määrin myös muita testejä, joita ei keskeytetty ennen 14 000 kuormitusta (testit nro 7, 10, 12, 15 ja 16).

Mallinnuksessa regressioanalyysin avulla määritetyt kaavan 1 mukaiset "perus"yhtälöt ilmaistaan kaavan 2 mukaisilla yhtälöillä, missä a' on sama kaikissa tarkastelussa mukana olevissa testeissä. Parametrin a' arvoksi valitaan testien nro 1, 3, 4 ja 6 keskiarvo (a''). Kokoonpuristumaa tarkasteltaessa keskiarvo on 0.0768 (taulukko 9) ja leikkausmuodonmuutosta tarkasteltaessa 0.1089 (liite 7 taulukko 1). Edellä mainitut testit edustanevat parhaiten tyyppillistä kevytpäällysteistä tierakennetta kesäolosuhteissa. Myöskään testeissä nro 1, 3, 4 ja 6 parametrin a' arvot eivät poikkea huomattavasti toisistaan.

Tämän jälkeen määritetään kaavassa 2 olevaa potenssia (b) vastaava potenssi (b') siten, että "korjatulla" yhtälöllä ja kaavalla 2 samoin kuin perusyh-

tälöillä saadaan sama suhteellinen pysyvä muodonmuutos testin lopussa ($N = 14\,000 - 1\,000 = 13\,000$ kuormitusta) kaavalla 3 (b' ratkaistaan yhtälöstä $a' \varepsilon_e N^b = a'' \varepsilon_e N^{b'}$)

$$b' = \frac{\log\left(\frac{a'}{a''} \cdot N^b\right)}{\log N} \quad (3)$$

missä

a' = a / ε_e (kokoonpuristuma) tai a / τ_e (leikkausmuodonmuutos)

a'' = vakio (kokoonp: 0.0768, leikkausmuodonm: 0.1089)

Taulukossa 10 ja liitteessä 7 ovat mukana tulokset kaikista testeistä, joita ei keskeytetty ennen 14 000 kuormitusta. Tulosten perusteella määritetty potenssi b' ei juurikaan vaihtelee testeissä nro 1, 3, 4 ja 6. Testeissä 2K (kuormitus molempiin suuntiin), 5K (lämpöeriste) sekä testeissä 15K ($w\%=3.0$) ja 16V ($w\%=3.0$) potenssi b' on pääsääntöisesti hieman korkeampi kuin testeissä nro 1, 3, 4 ja 6. Testeissä nro 7 - 10 ja 12, missä lisättiin vettä koerakenteeseen ennen koestamista, potenssi b' vaihtelee testistä riippuen jonkin verran.

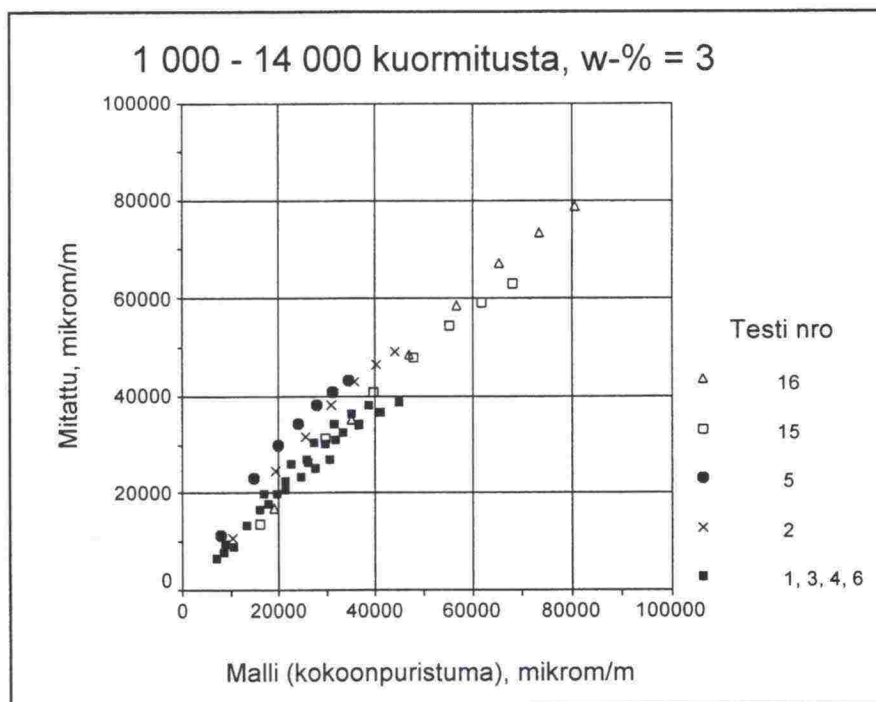
Taulukko 10. Kantavan kerroksen suhteellisia pysyviä muodonmuutoksia kuvaavien yhtälöiden korjatut parametrit testeissä nro 1 - 10, 12, 15 ja 16.

Testi nro	Perusyhtälö ($\varepsilon_p = a N^b$)	Kokoonpuristuma ε_e [$\mu\text{m}/\text{m}$]	a' (= a / ε_e)	b' ($a''=0.0768$) *
1K	190.19 N ^{0.5699}	2775	0.0685	0.5580
2K	195.12 N ^{0.5918}	2715	0.0719	0.5849
3K	151.36 N ^{0.5529}	1882	0.0804	0.5578
4K	229.61 N ^{0.5480}	2381	0.0964	0.5721
5K	332.8 N ^{0.5206}	2116	0.1572	0.5963
6K	138.65 N ^{0.5903}	2250	0.0616	0.5671
7K	278.24 N ^{0.5928}	4175	0.0666	0.5779
8K	671.81 N ^{0.4650}	2830	0.2373	0.5842
9K	270.23 N ^{0.5747}	2833	0.0954	0.5976
10K	293.68 N ^{0.6405}	3599	0.0816	0.6470
12V	55.83 N ^{0.8267}	5707	0.0098	0.6092
15K	248.22 N ^{0.5919}	4195	0.0592	0.5644
16V	257.87 N ^{0.609}	4965	0.0519	0.5678
Keskiarvo	(testit 1, 3, 4, 6)	2322	0.0768	0.5653

*($\varepsilon_p = 0.0768 \varepsilon_e N^{b'}$)

Testien nro 1, 3, 4 ja 6 keskiarvotulokset (kokoonpuristuma: $a''=0.0768$, $b'=0.5653$ ja leikkausmuodonmuutos: $a''=0.1089$, $b'=0.5653$) ja TKT-testin

perusteella määritetyt suhteelliset kimmoiset kokoonpuristumat/leikkausmuodonmuutokset sisältävillä malleilla lasketut kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat lähes samat kuin mitatuista arvoista suoraan määritetyt vastaavat muodonmuutokset 2 000 kuormituksen välein testeissä nro 1, 3, 4 ja 6 (kuva 13 ja liite 7). Toisin sanoen mallien tarkkuus mitattujen arvojen suhteen on erittäin hyvä.



Kuva 13. Mitatut ja mallilla ($\epsilon_p = 0.0768 \epsilon_e N^{0.5653}$) määritetyt kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset testeissä nro 1 - 6, 15 ja 16.

Kuvassa 13 ja liitteessä 7 on esitetty samoja malleja käyttäen myös testien 2, 5, 15 ja 16 tulokset. Testeissä 2K (kuormitus molempiin suuntiin) ja 5K (lämpöeriste) käytetyillä malleilla saadaan jonkin verran liian pieniä arvoja mitattuihin verrattuna. Testien 15K ja 16V osalta kokoonpuristumamallilla määritetyt ja mitatut arvot ovat lähellä toisiaan. Näin siitä huolimatta, että rakenne on testeissä 15K ja 16V erilainen kuin muissa kuvan 13 testeissä. Lisäksi on otettava huomioon, että testissä 16V kantavan kerroksen materiaali poikkeaa muista testeistä. Sen sijaan leikkausmuodonmuutosmallilla määritetyt ja mitatut kantavan kerroksen kumulatiiviset suhteelliset pysyvät muodonmuutokset poikkeavat jonkin verran toisistaan testien 15K ja 16V osalta (liite 7).

Kaiken kaikkiaan näyttäisi siltä, että kesäolosuhteissa voitaisiin käyttää yhtä hyvin joko kimmoiseen kokoonpuristumaan tai leikkausmuodonmuutokseen perustuvaa mallia arvioitaessa pysyvien muodonmuutosten kehittymistä TKT-testeissä.

4.5.3 Pysyvät muodonmuutokset kevätolosuhteissa

Kevätolosuhteiden mallinnuksessa tarkastellaan TKT -testejä nro 7 ja 10 - 16, missä kovan pohjan etäisyys rakenteen pinnasta on 200 mm. Testeissä nro 7 ja 10 - 14 testirakenteisiin imeytettiin lisäettä ennen koestamista. Testiolosuhteilla pyritään kuvaamaan osittain sulanutta tierakennettä, missä sitomattoman kantavan kerroksen kosteus saattaa olla korkea.

Samalla tapaa kuin kesäolosuhteiden mallinnuksessa regressioanalyysin avulla määritetyt kaavan 1 mukaiset "perus"yhtälöt muutetaan kaavan 2 mukaisiksi yhtälöiksi. Parametrin a' arvoksi valitaan Ketunmaan kalliomursketta sisältävissä testeissä testin 15K arvo (kokoonpuristuma: 0.0590, leikkausmuodonmuutos: 0.1088) ja vastaavasti Vittakankaan kalliomursketta sisältävissä testeissä testin 16V arvo (0.0488, 0.0903) (taulukko 11 ja liite 8). Eri materiaaleja sisältäviä testejä tarkastellaan erikseen siitä syystä, että niiden käyttäytyminen poikkeaa toisistaan. Testit 15K ja 16V valittiin mallinnuksen lähtökohdiksi sen takia, että näissä testeissä kantavan kerroksen kosteus on sama kuin kesäolosuhteita kuvaavissa testeissä.

Taulukko 11. Korjatut kantavan kerroksen suhteellisia pysyviä muodonmuutoksia kuvaavien yhtälöiden parametrit testeissä nro 7 ja 10 - 16.

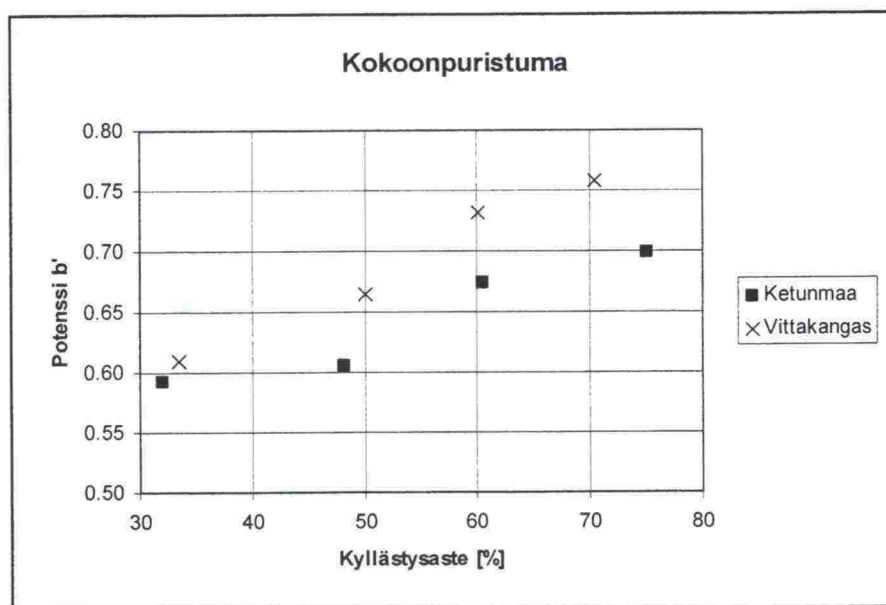
Testi nro	Perusyhtälö ($\epsilon_p = a N^b$)	Kokoonpuristuma ϵ_e [$\mu\text{m}/\text{m}$]	a' ($= a / \epsilon_e$)	b' (K: $a''=0.0590$) (V: $a''=0.0488$) *	Kosteus [%]
7K	278.24 N ^{0.5928}	4262	0.0653	0.6047	4.5
10K	293.68 N ^{0.6405}	3772	0.0779	0.6731	5.25
11K	227.63 N ^{0.7145}	4408	0.0516	0.6989	6.0
12V	55.83 N ^{0.8267}	5303	0.0105	0.6647	4.5
13V	54.40 N ^{0.8988}	5406	0.0101	0.7321	5.25
14V	258.91 N ^{0.7506}	4957	0.0522	0.7577	6.0
15K	248.22 N ^{0.5919}	4209	0.0590	0.5919	3.0
16V	257.87 N ^{0.609}	5281	0.0488	0.6090	3.0

*($\epsilon_p = a'' \epsilon_e N^{b'}$)

Tämän jälkeen määritetään kaavassa 2 olevaa potenssia (b) vastaava potenssi (b') siten, että "korjatulla" ja perusyhtälöllä saadaan sama suhteellinen pysyvä muodonmuutos 7 000 (-1 000) kuormituksen jälkeen kaavalla 3.

Ketunmaan kalliomursketta sisältävissä testeissä nro 7, 10, 11 ja 15 määritetty potenssi b' on kohtuullisen lähellä perusyhtälön potenssia b . Sen sijaan Vittakankaan kalliomursketta sisältävissä testeissä nro 12 - 14 ja 16 potenssi b' poikkeaa testien nro 12 ja 13 osalta potenssista b . Potenssi b' vaihtelee merkittävästi eri testeissä. Kummallakin materiaalilla potenssi b' kasvaa merkittävästi kosteuden lisääntyessä. Samalla kun kosteus lisääntyy, kasvaa myös kyllästysaste. Käytännössä kevätolosuhteita kuvaavissa malleissa ei voida käyttää vakio potenssia.

Kyllästysasteen ja potenssin b' välillä on selvää riippuvuutta (kuva 14 ja liite 8 kuva 1). Vittakankaan kalliomurskeella potenssi b' kasvaa lähes lineaarisesti kyllästysasteen lisääntyessä. Sen sijaan Ketunmaan kalliomurskeella potenssi b' lisääntyy merkittävästi vasta yli 50 % kyllästysasteilla. Samoilla kyllästysasteilla Vittakankaan kalliomurskeella potenssi b' on aina suurempi kuin Ketunmaan kalliomurskeella. Vittakankaan kalliomurske on mineralogiselta koostumukseltaan heikompaa kuin Ketunmaan kalliomurske. Lisäksi Vittakankaan kalliomurske on rakeisuudeltaan "roikkuvaa".



Kuva 14. Kyllästysasteen vaikutus potenssiin b' ($\epsilon_p = a'' \epsilon_e N^{b'}$) testeissä nro 7 ja 10 - 16.

Lineaarisella regressioanalyysillä saadaan seuraavat riippuvuudet potenssin b' ja kyllästysasteen (S_r) välillä, kun pysyvien muodonmuutosten mallissa on mukana suhteellinen kimmainen kokoonpuristuma:

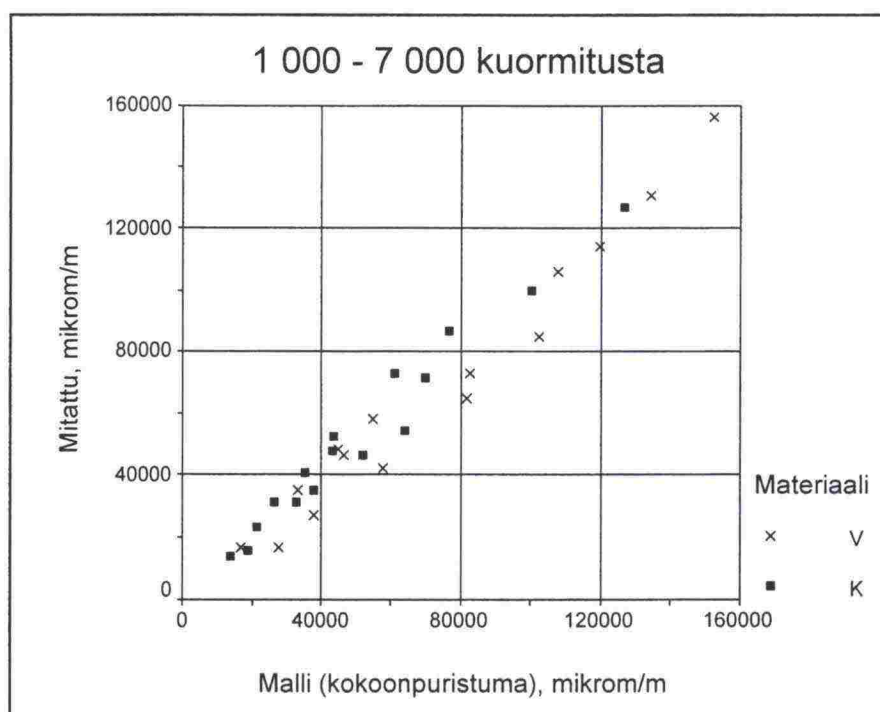
$$b' = 0.496 + 0.002707 \cdot S_r \quad (\text{Ketunmaa}) \quad (4)$$

$$b' = 0.465 + 0.004212 \cdot S_r \quad (\text{Vittakangas}) \quad (5)$$

Vastaavat kaavat, kun pysyvien muodonmuutosten mallissa on mukana suhteellinen kimmainen leikkausmuodonmuutos, on esitetty liitteessä 8.

Suhteellisen kimmoisen kokoonpuristuman sisältävillä malleilla, missä parametrin a'' arvo on materiaalista riippuen testien 15K tai 16V mukainen (0.0590 / 0.0488) ja potenssi b' noudattaa kaavoja 4 ja 5, lasketut kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat lähes samat kuin mitatuista arvoista suoraan määritetyt vastaavat muodonmuutokset kevätolosuhteita kuvaavissa testeissä (kuva 15). Tilanne on vastaavanlainen myös silloin, kun mallit sisältävät suhteellisen kimmoisen leikkausmuodonmuutok-

sen (liite 8 kuva 2). Kuvassa 15 ja liitteessä 8 on rajoitettu kuormitusten lukumääriin 1 000 - 7 000, koska osa testeistä jouduttiin keskeyttämään ennen aikaisesti. Vaikka kehitettyjä malleja käytettäisiin aina 14 000 kuormitukseen asti, mallit kuvaisivat hyvin suhteellisten pysyvien muodonmuutosten kehittymistä TKT -testeissä.

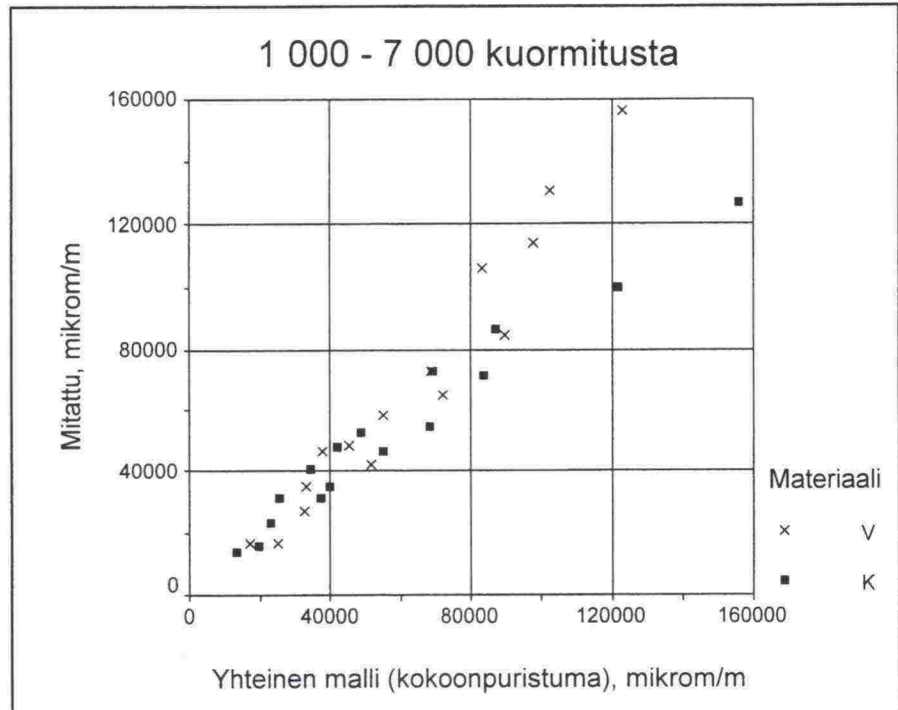


Kuva 15. Mitatut ja mallilla ($\epsilon_p = a'' \epsilon_e N^{b'}$) määritetyt kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset kevätolosuhteita simuloivissa testeissä nro 7 ja 10 - 16.

Edellisten mallien lisäksi kokeiltiin suhteellisen kimmoisen kokoonpuristuman sisältävää mallia, missä parametrin a'' arvo on testien 15K tai 16V keskiarvon (0.0539) mukainen ja potenssi b' noudattaa kaavaa 6, missä ei ole otettu huomioon kantavan kerroksen materiaalin laatua.

$$b' = 0.484 + 0.003311 \cdot S_r \quad (\text{Ketunmaa ja Vittakangas}) \quad (6)$$

Mallilla lasketut kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat lähes samat kuin mitatuista arvoista suoraan määritetyt vastaavat muodonmuutokset kumulatiivisten suhteellisten pysyvien muodonmuutosten ollessa korkeintaan 80 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ (kuva 16). Tällöin kantavan kerroksen kylästysaste on korkeintaan 50 %. Kantavan kerroksen kylästysasteen ollessa yli 50 % mallilla lasketut ja mitatut arvot poikkeavat toisistaan. Kylästysaste on luokkaa 50 % silloin, kun kantavan kerroksen materiaalin hienoainespi-toisuus (# 0.063) on noin 5.5 % ja kosteus runsaat 5 %.



Kuva 16. Mitatut ja mallilla ($\epsilon_p = 0.0539 \epsilon_e N^{b_1}$) määritetyt kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset kevätolosuhteita simuloivissa testeissä nro 7 ja 10 - 16.

Tulokset ovat hyvin samankaltaisia myös silloin, kun malli pohjautuu suhteelliseen kimmoiseen leikkausmuodonmuutokseen (liite 8 kuva 3)

Kaiken kaikkiaan näyttäisi siltä, että kevätolosuhteissa joudutaan mahdollisesti käyttämään materiaalikohtaisia joko kimmoiseen kokoonpuristumaan tai leikkausmuodonmuutokseen perustuvia malleja, jotka sisältävät myös kosteusolosuhteita kuvaavan kyllästysasteen, arvioitaessa pysyvien muodonmuutosten kehittymistä TKT -testeissä.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tierakenteen tutkimuslaite on laboratoriomittakaavainen koeratalaitteisto, jolla voidaan kuormittaa tutkittavaa tierakennettä todellista liikennekuormitusta vastaavalla pyöräkuormalla. TKT -laitteella tehtävissä kokeissa tarkasteltiin 16 erilaista testikombinaatiota. Koesarjalla tutkittiin pysyvien muodonmuutosten syntymistä ohuen joustavan päällysteen alla olevassa sitomattomassa kantavassa kerroksessa tyypillisillä kantavan kerroksen materiaaleilla, kun muuttujina oli kuormitus, rakenne tai olosuhteet. Pysyvien muodonmuutosten lisäksi kussakin testissä määritettiin myös kimmoisia muodonmuutoksia. TKT -testien pääasiallisena tavoitteena oli tuottaa tietoa siitä, millä painoarvolla kantavan kerroksen materiaali-, rakenne- ja olosuhdetekijät tulee ottaa huomioon kevytpäällysteisten teiden mitoitusmenettelyssä.

Kaikissa TKT -testeissä kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset samoin kuin kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat merkittäviä ja kasvavat säännöllisesti kasvunopeuden hidastuessa kuormitusten lisääntyessä. Kesäolosuhteita simuloivissa testeissä kuormituksen suuruus vaikuttaa pysyviin muodonmuutoksiin ennako-odotusten mukaisesti siten, että mitä suurempi on kuormitus, sitä nopeampaa on pysyvien muodonmuutosten kehittyminen. Heikko alusrakenne, mitä simuloitiin lämpöeristeellä, lisää jonkin verran päällä olevien sitomattomien kerrosten pysyviä muodonmuutoksia. Sen sijaan paksu kantava kerros pienentää kantavan kerroksen yläosan pysyviä muodonmuutoksia.

Kevätolosuhteita simuloivissa testeissä tutkittavien rakenteiden kokonaispaksuudet olivat 200 mm, millä pyrittiin kuvaamaan tilannetta, missä päällysrakenteen yläosa on sulanut keväällä. Hienoainespitoisuuden ja samalla kosteuden lisääntyessä pysyvät muodonmuutokset kasvavat huomattavasti. Hienoainespitoisuuden (# 0.063 mm) lisääntyminen 4.5 %:sta 6.4 %:iin kasvattaa pysyvät muodonmuutokset kaksinkertaiseksi. Tuloksiin vaikuttaa myös se, että hienoainespitoisuuden lisääntyessä 2 %-yksikköä kosteus lisääntyy 4.5 %:sta 6.0 %:iin ja kyllästysaste nousee noin 50 %:sta 70 - 75 %:iin.

Vittakankaan kalliomurskeella pysyvät muodonmuutokset ovat huomattavasti suurempia kuin Ketunmaan kalliomurskeella kosteuden ollessa yli 3 %. Geologisen arvion mukaan Vittakankaan kalliomurske on mineralogiselta koostumukseltaan huono sitomattoman kantavan kerroksen materiaali. Vittakankaan kalliomurskeella osa pysyvistä muodonmuutoksista aiheutuu rakeisuuskäyrän "roikkuvuudesta" ja rakeiden suuresta liuskeisuudesta.

Kimmoiset kokoonpuristumat ovat TKT -testeissä ensimmäisen tuhannen ylityksen aikana epäsäännöllisiä. Tämän jälkeen kokoonpuristumat ovat kohtuullisen tasaisia, joskin ne yleensä pienenevät jonkin verran kuormitusten lisääntyessä. Kesäolosuhteita simuloivissa testeissä kimmoiset kokoonpuristumat ovat suhteellisen loogisia mm. pienin kokoonpuristuma on testissä, missä kuormitus oli muita testejä pienempi. Kevätolosuhteissa kimmoiset

kokoonpuristumat ovat selvästi suurempia kuin kesäolosuhteissa, mikä johtuu pääasiassa suuresta kosteudesta.

Kantavan kerroksen pysyvien muodonmuutosten mallinnuksessa käytettävät tekijät ovat sellaisia, että ne pystytään luotettavasti määrittämään TKT -testien yhteydessä. Tekijät voidaan kohtuullisen helposti määrittää myös käytännön tilanteissa.

Logaritmisilla asteikoilla pysyvien muodonmuutosten kehittyminen kuormitusten lisääntyessä on lähes suoraviivaista ja noudattaa kaavaa 7. Suhteellisenä kimmoisena muodonmuutoksena voidaan käyttää joko kantavan kerroksen pystysuoraa kokoonpuristumaa tai laskennallista leikkausmuodonmuutosta.

$$\varepsilon_p = a' \cdot \varepsilon_e \cdot N^b \quad (7)$$

missä

ε_p	=	kumulatiivinen suhteellinen pysyvä muodonmuutos $\mu\text{m}/\text{m}$
ε_e	=	suhteellinen kimmainen muodonmuutos $\mu\text{m}/\text{m}$
N	=	kuormitusten lukumäärä (-1 000)
a', b	=	parametreja

Valitsemalla tyypillisten kesäolosuhteita kuvaavien testien perusteella parametrien a' ja b arvot sekä käyttämällä määritettyjä suhteellisia kimmoisia muodonmuutoksia kaavalla 7 lasketut ja mitatut suhteelliset pysyvät muodonmuutokset ovat hyvin lähellä toisiaan kaikissa kesäolosuhteita kuvaavissa testeissä ts. mallin tarkkuus mitattujen arvojen suhteen on hyvä.

Kevätolosuhteita kuvaavien testien perusteella parametrien a' ja b arvot riippuvat käytetystä materiaalista. Parametrin b arvo riippuu voimakkaasti myös kosteusolosuhteista, mikä voidaan ilmaista kyllästysasteen avulla.

TKT -testien perusteella kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset kehittyvät säännönmukaisesti ja ovat mallinnettavissa kimmoisten muodonmuutosten ja kosteusolosuhteita kuvaavan kyllästysasteen avulla. Tulokset luovat hyvän pohjan kehitettäessä mitoitusmenettelyä, missä otetaan huomioon myös kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset. Parantamishankkeilla suhteelliset kimmoiset muodonmuutokset voidaan määrittää takaisinlaskettujen tai arvioitujen moduulien avulla. Kosteusolosuhteita kuvaava kyllästysaste voidaan puolestaan laskea helposti Proctor -kokeella määritetyn kuivairtoisuuden, kiintotiheyden ja lähinnä hienoainepitoisuuden perusteella arvioidun kosteuspitoisuuden avulla. Kehitettäessä mitoitusmenettelyä suurimmat ongelmat liittyvät siihen, miten otetaan huomioon kapeiden teidän puutteellinen reunatuki ja alusrakenteen laatu.

6 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Chan, W. K. F., Brown, S. F. 1991. Granular Bases for Heavily Loaded Pavements. University of Nottingham, Department of Civil Engineering. PR911019.
2. Sweere, G. T. H. 1990. Unbound Granular Bases for Roads. Ph.D. Thesis. University of Delft.
3. Veverka, V. 1979. Raming van der spoordiepte bij wegen met een bitumineuze verharding. De Wegentechniek, Vol XXIV, No.3.
4. Huang, Y. H. 1993. Pavement Analysis and Design. Prentice-Hall, Inc.

LIITTEET

- Liite 1. Geologien arviot käytetyistä kantavan kerroksen materiaaleista.
- Liite 2. Absoluuttiset pysyvät muodonmuutokset.
- Liite 3. Pysyvät muodonmuutokset alimman anturin tasolla.
- Liite 4. Suhteelliset pysyvät muodonmuutokset.
- Liite 5. Kimmoiset kokoonpuristumat.
- Liite 6. Suhteelliset pysyvät muodonmuutokset logaritmiasteikoilla.
- Liite 7. Pysyvät muodonmuutokset kesäolosuhteissa (leikkausmuodonmuutos).
- Liite 8. Pysyvät muodonmuutokset kevätolosuhteissa (leikkausmuodonmuutos).

Ketunmaa, Liminka (Geologi Tapio Mikkola Oulun tiepiiri)

Näytteiden perusteella tehty selvitys Ketunmaankallion kairasydännäytteiden petrografiasta.

Ohuthieet on teetetty seuraavista näytteistä:

R1 s. 3.50	Epidoottigraniitti
R1 s. 9.80	Kloriitti-biotiitti-graniitti
R2 s.2.30	Apliittinen, vähän kloriittia ja biotiittia sis. graniitti
R3 s. 9.00	Apliittinen graniitti, jossa maasälpää kohtalaisesti saussuriittiutunutta
R4 s. 6.00	Biotiittigraniitti, jossa maasälpä kohtalasesti muuttunutta
R4 s. 8.30	Biotiitti-epidootti-graniitti; jossa maasälpä kohtalaisesti muuttunutta.
R4 s.13.60	Epidoottigraniitti, jossa maasälpä verrattain tervettä

Tutkittujen näytteiden mukaan alue muodostuu verrattain homogeenisesta biotiittigraniitista. Päämineraaleina esiintyvät albiittinen plagioklaasi, kalimaasälpä, ja kvartsi. Biotiitin määrä nousee korkeintaan 10%, ja se esiintyy vaihtelevasti kloriittiutuneena. Epidoottia esiintyy joskus biotiitin tilalla. Rautahydroksideja, ilmeisesti götiittiä tai hematiittia kivessä on korkeintaan 10%.

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

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

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

Mineralogisista piirteistä kiven rakennusteknisiin ominaisuuksiin vaikuttaa lähinnä raekoko sekä plagioklaasin ja kalimaasalvän muuttuminen. Tutkituissa näytteissä muuttuneisuusaste vaihtelee muutamasta prosentista korkeintaan 10 %:iin, joten kokonaisuutena kivet vaikuttavat varsin terveiltä - siis verrattain hyvälaatuiselta graniitilta.

Vittakangas, Haukipudas (FL Hannu Vehkaperä Geopudas OY)**Grauvakka**

mineraalikoostumus: kvartsi 40 %
biotiiitti 25 %
plagioklaasi 15 %
muskoviitti 15 %

lisäksi kloriitti, opaakki, serisiitti < 5 %

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

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

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

Muskoviitti: biotiitin tavoin

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

Rapautuneisuus: kiviaines hyvin vähän muuttunutta

Kivilajityyppi: alkujaan mereen kerrostunutta kvartsi- ja kiillepitoista sedimenttiä, joka vuorijonopoimutuksessa kiteytynyt osittain uudelleen.

LIITE 2/1

Absoluuttiset pysyvät muodonmuutokset [mm]

Kantavan kerroksen yläpinta

N (x1000)	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K
0.01	0.910	1.005	0.480	0.689	0.840	0.609	0.801	1.053
0.1	2.341	2.179	1.077	1.679	2.485	1.373	1.890	3.340
0.2	3.170	2.972	1.518	2.413	3.444	1.927	2.778	5.251
0.5	4.529	4.597	2.367	3.868	5.074	2.933	4.635	8.757
1	5.960	6.386	3.199	5.204	6.719	3.944	6.750	11.812
2	7.528	8.255	4.343	6.903	8.766	5.277	9.278	15.207
4	9.487	10.714	5.573	8.783	10.963	6.860	12.437	18.545
6	10.643	11.959	6.335	9.953	12.258	7.936	14.322	20.163
8	11.542	13.168	6.878	10.777	13.127	8.736	15.603	21.244
10	12.138	14.049	7.366	11.499	13.880	9.324	16.698	22.177
12	12.630	14.656	7.739	11.969	14.449	9.748	17.644	22.923
14	13.052	15.172	8.058	12.334	14.929	10.081	18.538	23.570

Kantavan kerroksen keskiosa (75 mm kantavan pinnasta)

N (x1000)	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K
0.01	0.406	0.458	0.361	0.292	0.398	0.352	0.279	0.518
0.1	0.821	0.935	0.528	0.675	0.991	0.544	0.725	1.927
0.2	1.042	1.250	0.613	0.939	1.336	0.648	1.109	3.205
0.5	1.429	1.876	0.747	1.459	1.946	0.831	1.898	3.794
1	1.921	2.720	0.871	1.947	2.598	1.051	2.713	5.722
2	2.469	3.594	1.109	2.532	3.435	1.402	3.721	7.825
4	3.226	4.891	1.384	3.259	4.378	1.840	4.711	10.096
6	3.736	5.463	1.554	3.716	4.960	2.214	4.713	11.242
8	4.152	5.845	1.696	4.040	5.354	2.478	6.298	12.015
10	4.447	5.845	1.861	4.299	5.730	2.699	6.771	12.665
12	4.682	5.845	1.996	4.484	6.038	2.861	6.735	13.211
14	4.891	5.845	2.105	4.646	6.292	3.006	6.735	13.678

Kantavan kerroksen alapinta

N (x1000)	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K
0.01	0.014	0.292	0.204	0.039	0.286	0.199	-	0.263
0.1	0.408	0.427	0.275	0.424	0.508	0.270	-	0.607
0.2	0.462	0.485	0.312	0.514	0.592	0.308	-	0.843
0.5	0.542	0.568	0.358	0.657	0.709	0.341	-	1.464
1	0.661	0.709	0.381	0.763	0.856	0.378	-	2.190
2	0.758	0.817	0.437	0.900	1.049	0.442	-	3.090
4	0.905	0.996	0.507	1.073	1.299	0.531	-	4.081
6	1.026	1.083	0.561	1.203	1.491	0.603	-	4.553
8	1.121	1.205	0.590	1.311	1.613	0.666	-	4.881
10	1.222	1.300	0.647	1.399	1.752	0.712	-	5.154
12	1.301	1.344	0.694	1.482	1.872	0.765	-	5.391
14	1.366	1.406	0.729	1.567	1.978	0.822	-	5.580

Absoluuttiset pysyvät muodonmuutokset [mm]

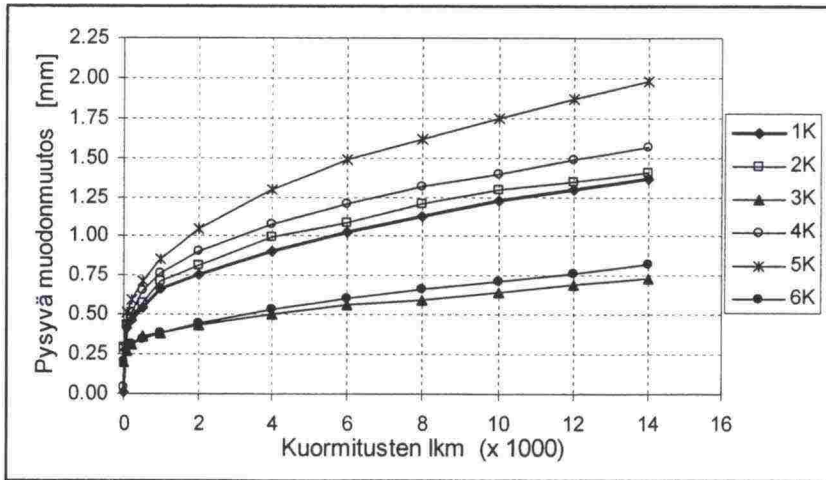
Kantavan kerroksen yläpinta								
N (x1000)	9K	10K	11K	12V	13V	14V	15K	16V
0.01	0.865	0.489	0.554	-	0.907	1.998	0.654	0.659
0.1	2.349	2.205	3.716	1.976	3.145	4.497	1.766	1.921
0.2	3.634	3.728	5.754	2.731	4.952	6.675	2.674	2.945
0.5	6.206	6.622	9.381	4.745	8.072	10.857	4.409	5.018
1	8.640	9.355	13.105	6.987	11.626	15.170	6.223	7.084
2	11.479	13.067	18.012	9.709	15.908	22.325	8.458	9.796
4	14.728	17.804	24.307	13.826	23.164	31.551	11.344	12.756
6	16.791	21.051	28.812	17.552	29.662	35.388	12.898	14.919
8	18.310	23.247	32.990	20.812	36.372	-	14.077	16.573
10	19.445	25.515	33.813	23.980	-	-	15.116	17.978
12	20.390	27.170	-	26.963	-	-	15.937	18.970
14	21.264	28.644	-	29.417	-	-	16.568	19.871

Kantavan kerroksen keskiosa (75 mm kantavan pinnasta)								
N (x1000)	9K	10K	11K	12V	13V	14V	15K	16V
0.01	0.008	0.191	0.137	-	0.464	0.884	0.293	0.392
0.1	2.580	1.227	0.839	0.772	1.994	1.937	0.768	0.843
0.2	0.186	2.097	1.362	1.042	3.149	2.783	1.110	1.129
0.5	2.992	3.538	2.381	1.880	4.870	4.419	1.745	1.799
1	4.582	4.976	3.477	2.862	6.599	6.149	2.442	2.269
2	6.348	6.846	4.875	4.107	9.079	9.347	3.300	2.205
4	8.320	8.923	7.160	6.383	12.898	13.712	4.440	3.659
6	9.619	10.382	9.532	8.495	15.910	15.610	5.070	4.638
8	10.580	11.155	10.837	10.769	18.359	-	5.623	5.808
10	11.491	12.041	11.071	13.243	-	-	6.070	6.798
12	12.155	12.534	-	15.130	-	-	6.464	7.622
14	12.717	13.027	-	16.533	-	-	6.734	8.231

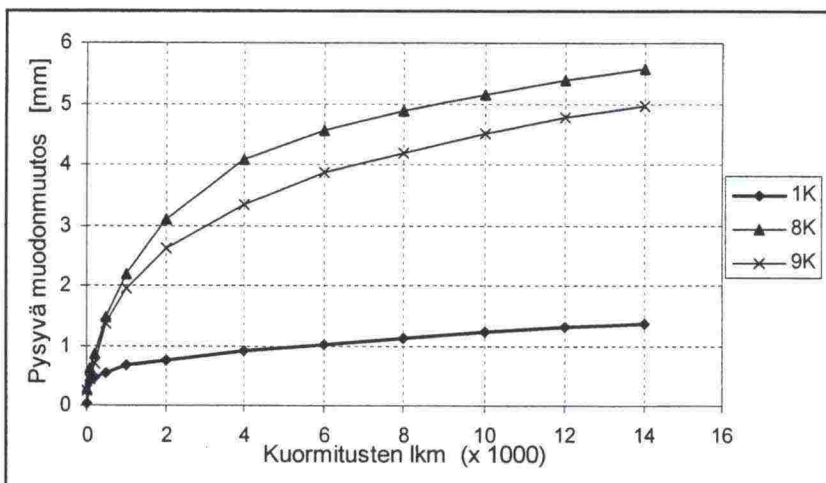
Kantavan kerroksen alapinta								
N (x1000)	9K	10K	11K	12V	13V	14V	15K	16V
0.01	0.238	-	-	-	-	-	-	-
0.1	0.439	-	-	-	-	-	-	-
0.2	0.696	-	-	-	-	-	-	-
0.5	1.367	-	-	-	-	-	-	-
1	1.959	-	-	-	-	-	-	-
2	2.611	-	-	-	-	-	-	-
4	3.344	-	-	-	-	-	-	-
6	3.856	-	-	-	-	-	-	-
8	4.189	-	-	-	-	-	-	-
10	4.497	-	-	-	-	-	-	-
12	4.762	-	-	-	-	-	-	-
14	4.968	-	-	-	-	-	-	-

LIITE 3

Pysyvät muodonmuutokset alimman anturin tasolla [mm]



Kuva 1. Hiekkakerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset testeissä nro 1 - 6.



Kuva 2. Hiekkakerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset testeissä nro 1, 8 ja 9.

Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset [$\mu\text{m}/\text{m}$]

Nollakohtana 1000 kuormitusta

Koko kantava kerros

N	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K
1000	8936	10718	6511	9433	11294	7625	15484	15554
3000	19930	24592	13445	19747	23157	16598	34836	30193
5000	26214	31637	17683	26022	29877	22632	46384	37338
7000	31097	38251	20756	30347	34432	27062	54226	42032
9000	34104	43034	23338	34176	38169	30315	60937	46149
11000	36610	46463	25282	36517	40906	32547	66733	49326
13000	38775	49229	26984	38205	43186	34206	72205	52180

Kantavan kerroksen yläosa

N	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K
1000	14378	13952	12474	15517	17071	13612	21413	18742
3000	31313	30235	25608	31598	34753	29491	51988	34240
5000	40410	39673	33764	41530	44812	39226	78527	41086
7000	47223	51262	39275	48506	51528	46663	74236	45555
9000	51472	63609	43723	54949	56847	51746	83008	49666
11000	55083	72136	46984	58935	60533	55397	96850	52564
13000	58081	79363	49881	61754	63721	57997	109427	55180

Kantavan kerroksen alaosa

N	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K
1000	4817	8238	1926	4781	6903	3048	-	13152
3000	11313	20263	4092	10683	14345	6743	-	27144
5000	15468	25473	5317	14163	18527	9947	-	34515
7000	18890	28269	6515	16460	21438	12078	-	39378
9000	20957	27251	7663	18291	23974	13933	-	43499
11000	22626	26769	8594	19373	25990	15081	-	46886
13000	24160	26113	9377	20196	27579	16019	-	49920

LIITE 4/2

Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset [$\mu\text{m}/\text{m}$]

Nollakohtana 1000 kuormitusta

Koko kantava kerros

N	9K	10K	11K	12V	13V	14V	15K	16V
1000	13391	23108	31272	16697	27037	46210	13645	16644
3000	28801	52591	71394	41952	72852	105802	31265	34812
5000	38292	72808	100108	64808	113878	130580**	40755	48092
7000	45560	86478	126737	84806	156246	-	47954	58246
9000	50622	100591	131985*	104240	-	-	54299	66867
11000	54779	110898	-	122539	-	-	59311	72956
13000	58876	120069	-	137596	-	-	63165	78487

* 7500 kuormitusta

** 4000 kuormitusta

Kantavan kerroksen yläosa

N	9K	10K	11K	12V	13V	14V	15K	16V
1000	15125	26094	53677	20843	25756	59966	19328	39545
3000	33133	63749	115005	46811	74871	133660	43841	61000
5000	43891	89071	147637	69587	124686	163029**	56822	77876
7000	51768	109224	191589	83489	185583	-	65619	84783
9000	54929	128783	200606*	93291	-	-	73935	90692
11000	58869	145251	-	108744	-	-	79924	93079
13000	63284	159121	-	123587	-	-	84989	97247

* 7500 kuormitusta

** 4000 kuormitusta

Kantavan kerroksen alaosa

N	9K	10K	11K	12V	13V	14V	15K	16V
1000	12059	-	-	-	-	-	-	-
3000	25474	-	-	-	-	-	-	-
5000	33991	-	-	-	-	-	-	-
7000	40792	-	-	-	-	-	-	-
9000	47314	-	-	-	-	-	-	-
11000	51639	-	-	-	-	-	-	-
13000	55490	-	-	-	-	-	-	-

Kimmoiset kokoonpuristumat [mm]

Yläanturi N (x1000)	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K
0.01	0.683	0.603	0.462	0.580	0.623	0.520	0.638	0.612
0.1	0.731	0.584	0.465	0.591	0.650	0.557	0.740	0.805
0.2	0.735	0.608	0.473	0.653	0.614	0.554	0.738	0.828
0.5	0.749	0.567	0.477	0.625	0.589	0.552	0.727	0.810
1	0.738	0.590	0.450	0.621	0.584	0.543	0.713	0.858
2	0.701	0.574	0.466	0.563	0.571	0.542	0.685	0.808
4	0.659	0.565	0.432	0.545	0.538	0.533	0.666	0.674
6	0.640	0.570	0.437	0.532	0.525	0.529	0.608	0.607
8	0.559	0.575	0.423	0.549	0.489	0.523	0.616	0.555
10	0.568	0.569	0.441	0.511	0.508	0.495	0.632	0.573
12	0.546	0.565	0.435	0.493	0.516	0.487	0.605	0.567
14	0.535	0.569	0.447	0.492	0.514	0.482	0.640	0.547

Ala-anturi N (x1000)	1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K
0.01	0.026	0.169	0.146	0.054	0.221	0.184	-	0.149
0.1	0.140	0.160	0.141	0.141	0.199	0.164	-	0.181
0.2	0.140	0.148	0.120	0.176	0.186	0.156	-	0.184
0.5	0.131	0.145	0.110	0.148	0.214	0.169	-	0.182
1	0.111	0.142	0.116	0.158	0.194	0.168	-	0.195
2	0.138	0.139	0.138	0.148	0.204	0.167	-	0.190
4	0.131	0.140	0.126	0.153	0.199	0.171	-	0.170
6	0.112	0.138	0.128	0.148	0.185	0.148	-	0.160
8	0.116	0.139	0.118	0.145	0.163	0.153	-	0.169
10	0.122	0.139	0.125	0.140	0.173	0.161	-	0.179
12	0.097	0.144	0.127	0.140	0.180	0.161	-	0.156
14	0.125	0.135	0.127	0.120	0.184	0.168	-	0.150

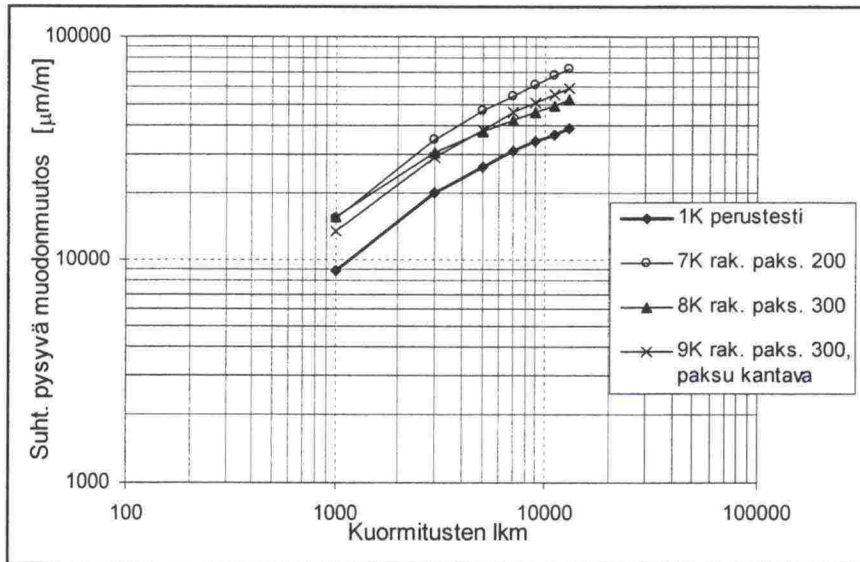
Yläanturi N (x1000)	9K	10K	11K	12V	13V	14V	15K	16V
0.01	0.697	0.626	0.720	-	0.746	0.856	0.593	0.599
0.1	0.949	0.772	1.216	0.805	0.917	0.987	0.677	0.774
0.2	0.958	0.791	1.133	0.835	0.928	0.967	0.707	0.822
0.5	0.938	0.705	0.905	0.873	0.879	0.910	0.717	0.842
1	0.977	0.644	0.763	0.863	0.801	0.895	0.712	0.845
2	0.888	0.592	0.671	0.850	0.833	0.736	0.680	0.846
4	0.843	0.563	0.553	0.954	0.795	0.732	0.631	0.762
6	0.879	0.503	0.552	0.980	0.817	0.641**	0.619	0.770
8	0.862	0.509	0.624	0.885	0.846	-	0.686	0.696
10	0.868	0.500	0.606*	0.856	-	-	0.663	0.646
12	0.861	0.494	-	0.707	-	-	0.657	0.634
14	0.826	0.482	-	0.726	-	-	0.674	0.602

* 8500 kuormitusta

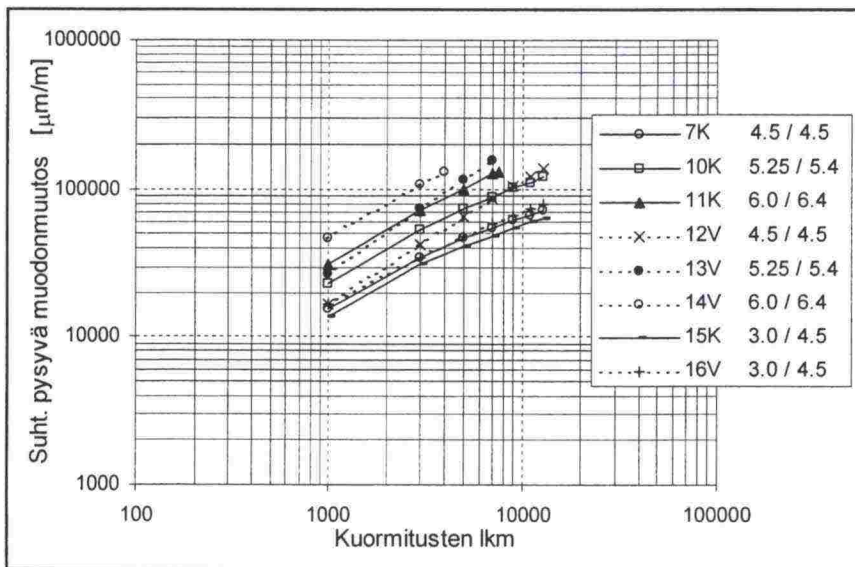
** 5000 kuormitusta

Ala-anturi N (x1000)	9K	10K	11K	12V	13V	14V	15K	16V
0.01	0.310	-	-	-	-	-	-	-
0.1	0.378	-	-	-	-	-	-	-
0.2	0.397	-	-	-	-	-	-	-
0.5	0.396	-	-	-	-	-	-	-
1	0.389	-	-	-	-	-	-	-
2	0.382	-	-	-	-	-	-	-
4	0.389	-	-	-	-	-	-	-
6	0.417	-	-	-	-	-	-	-
8	0.425	-	-	-	-	-	-	-
10	0.441	-	-	-	-	-	-	-
12	0.460	-	-	-	-	-	-	-
14	0.421	-	-	-	-	-	-	-

Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset logaritmiasteikoilla

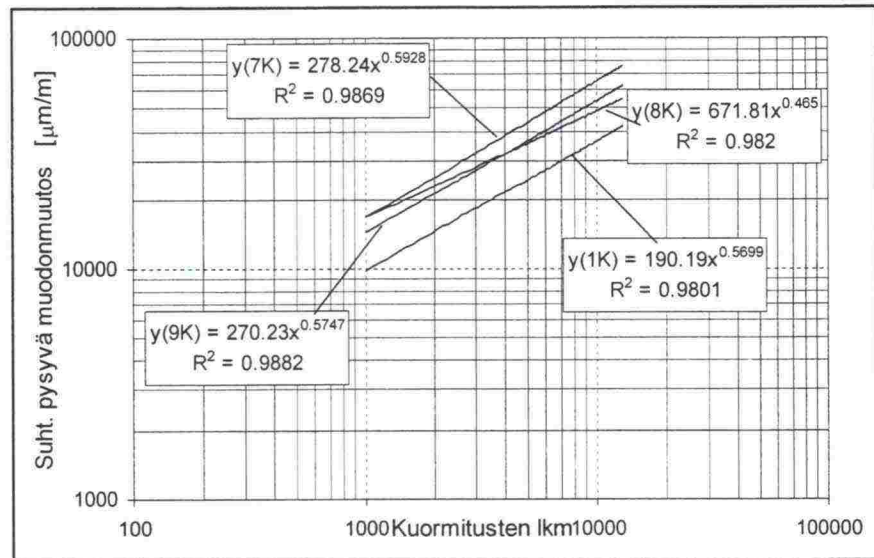


Kuva 1. *Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset logaritmiasteikoilla testeissä nro 1 ja 7 - 9.*

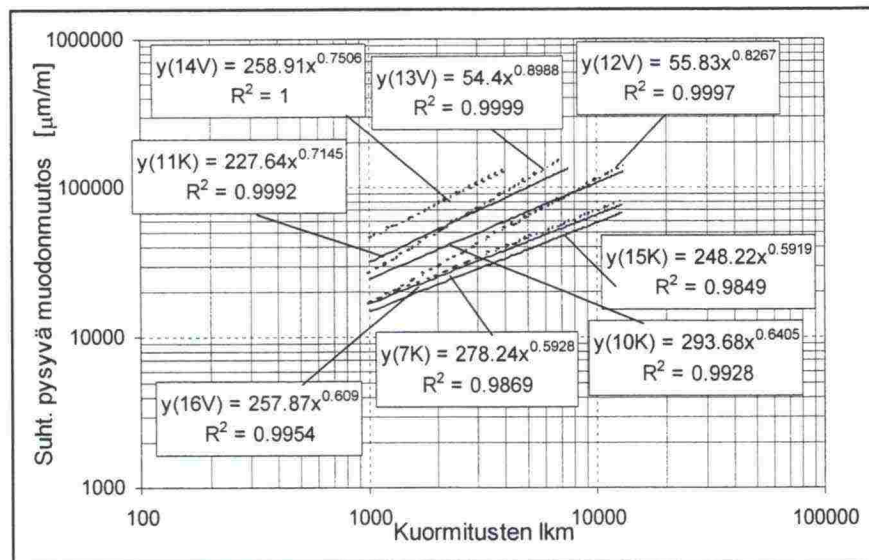


Kuva 2. *Kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset logaritmiasteikoilla testeissä nro 7 ja 10 - 16.*

Kantavan kerroksen suhteellisia pysyviä muodonmuutoksia kuvaavat regressioyhtälöt



Kuva 3. Kantavan kerroksen suhteellisia pysyviä muodonmuutoksia kuvaavat regressioyhtälöt testeissä nro 1 ja 7 - 9.



Kuva 4. Kantavan kerroksen suhteellisia pysyviä muodonmuutoksia kuvaavat regressioyhtälöt testeissä nro 7 ja 10 - 16.

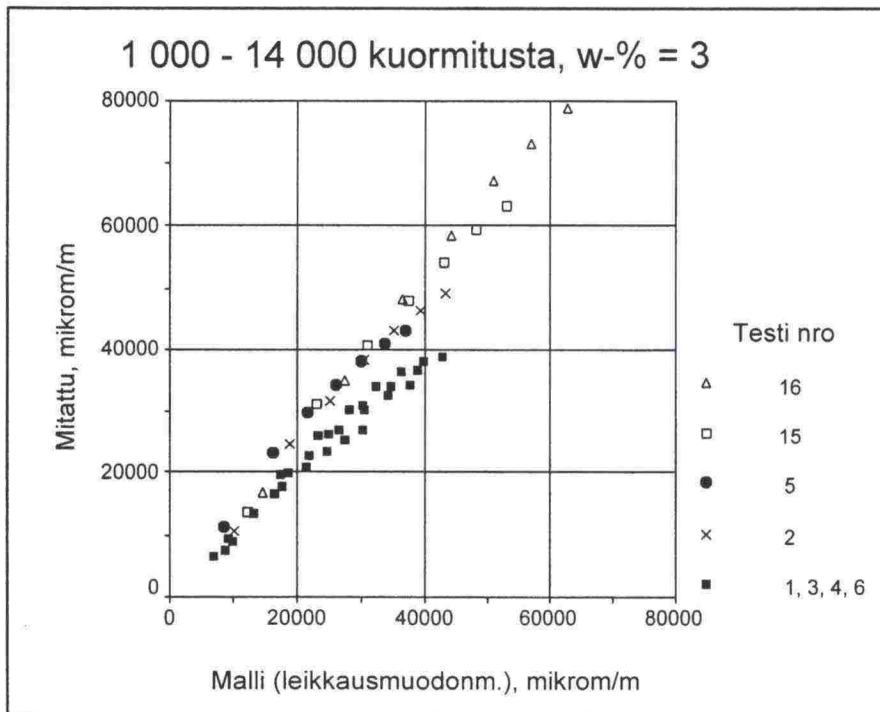
LIITE 7

Pys. muodonm. kesäolosuhteissa (leikkausmuodonmuutos)

Taulukko 1. Korjatut suhteellisia pysyviä muodonmuutoksia kuvaavien yhtälöiden parametrit testeissä nro 1 - 10, 12, 15 ja 16.

Testi nro	Perusyhtälö ($\epsilon_p = a N^b$)	Leikkausmuodonmuutos, τ_e [$\mu\text{m}/\text{m}$]	a' ($= a / \tau_e$)	b' ($a''=0.1089$) *
1K	190.19 N ^{0.5899}	1856	0.1025	0.5635
2K	195.12 N ^{0.5918}	1876	0.1040	0.5869
3K	151.36 N ^{0.5529}	1311	0.1155	0.5591
4K	229.61 N ^{0.5480}	1730	0.1327	0.5689
5K	332.8 N ^{0.5206}	1607	0.2071	0.5885
6K	138.65 N ^{0.5903}	1631	0.0850	0.5642
7K	278.24 N ^{0.5928}	2302	0.1209	0.6038
8K	671.81 N ^{0.4650}	2083	0.3225	0.5796
9K	270.23 N ^{0.5747}	2465	0.1096	0.5754
10K	293.68 N ^{0.6405}	2012	0.1460	0.6714
12V	55.83 N ^{0.8267}	3113	0.0179	0.6363
15K	248.22 N ^{0.5919}	2299	0.1080	0.5910
16V	257.87 N ^{0.609}	2720	0.0948	0.5944
Keskiarvo	(testit 1, 3, 4, 6)	1632	0.1089	0.5653

*($\epsilon_p = 0.1089 \tau_e N^{b'}$)



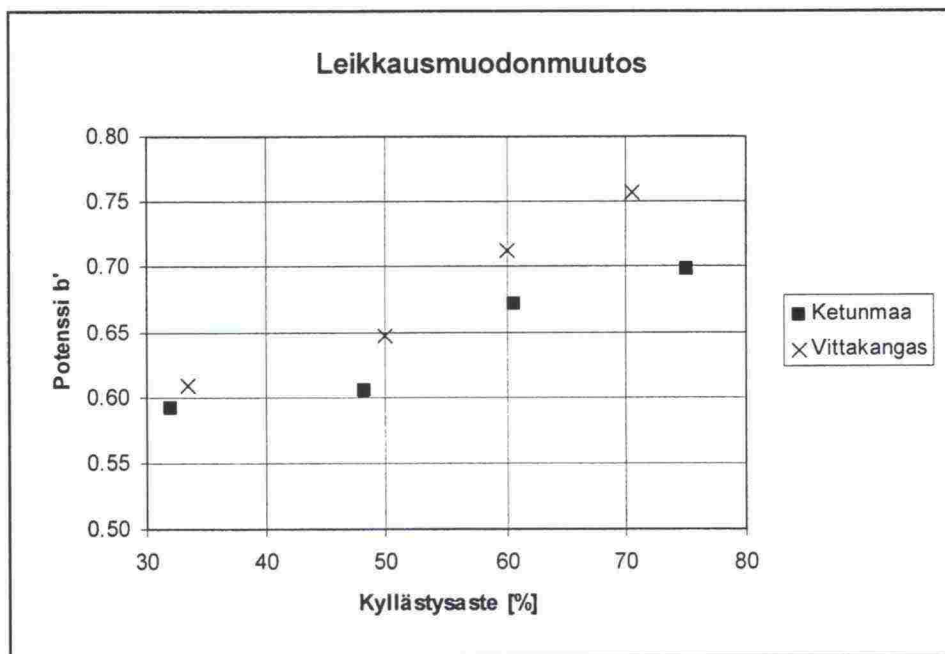
Kuva 1. Mitatut ja mallilla ($\epsilon_p = 0.1089 \tau_e N^{0.5653}$) määritetyt suhteelliset pysyvät muodonmuutokset testeissä nro 1 - 6, 15 ja 16.

Pys. muodonm. kevätolosuhteissa (leikkausmuodonmuutos)

Taulukko 1. Korjatut kantavan kerroksen suhteellisia pysyviä muodonmuutoksia kuvaavien yhtälöiden parametrit testeissä nro 7 ja 10 - 16.

Testi nro	Perusyhtälö ($\epsilon_p = a N^b$)	Leikkausmuodonmuutos, τ_e [$\mu\text{m}/\text{m}$]	a' ($= a / \tau_e$)	b' (K: $a''=0.1088$) (V: $a''=0.0903$) *	Kosteus [%]
7K	278.24 N ^{0.5928}	2311	0.1204	0.6047	4.5
10K	293.68 N ^{0.6405}	2078	0.1413	0.6712	5.25
11K	227.63 N ^{0.7145}	2425	0.0939	0.6972	6.0
12V	55.83 N ^{0.8267}	2877	0.0194	0.6462	4.5
13V	54.40 N ^{0.8988}	2944	0.0185	0.7125	5.25
14V	258.91 N ^{0.7506}	2731	0.0948	0.7563	6.0
15K	248.22 N ^{0.5919}	2281	0.1088	0.5919	3.0
16V	257.87 N ^{0.609}	2856	0.0903	0.6090	3.0

$$*(\epsilon_p = a'' \tau_e N^{b'})$$

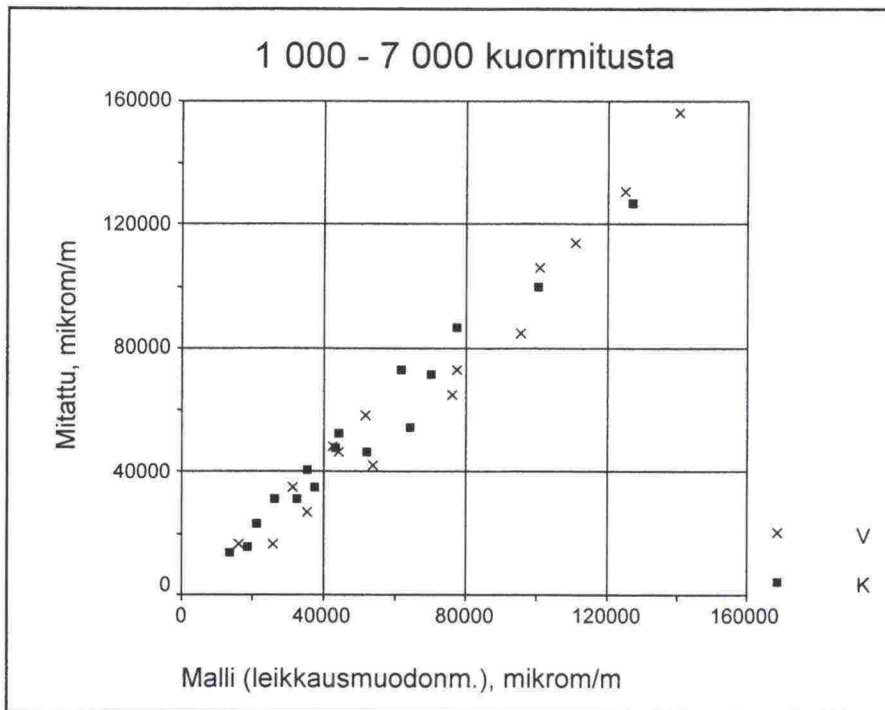


Kuva 1. Kyllästysasteen vaikutus potenssiin b' ($\epsilon_p = a'' \tau_e N^{b'}$) testeissä nro 7 ja 10 - 16.

Potenssin b' ja kyllästysasteen (S_r) väliset riippuvuudet:

$$b' = 0.498 + 0.002658 \cdot S_r \quad (\text{Ketunmaa}) \quad (1)$$

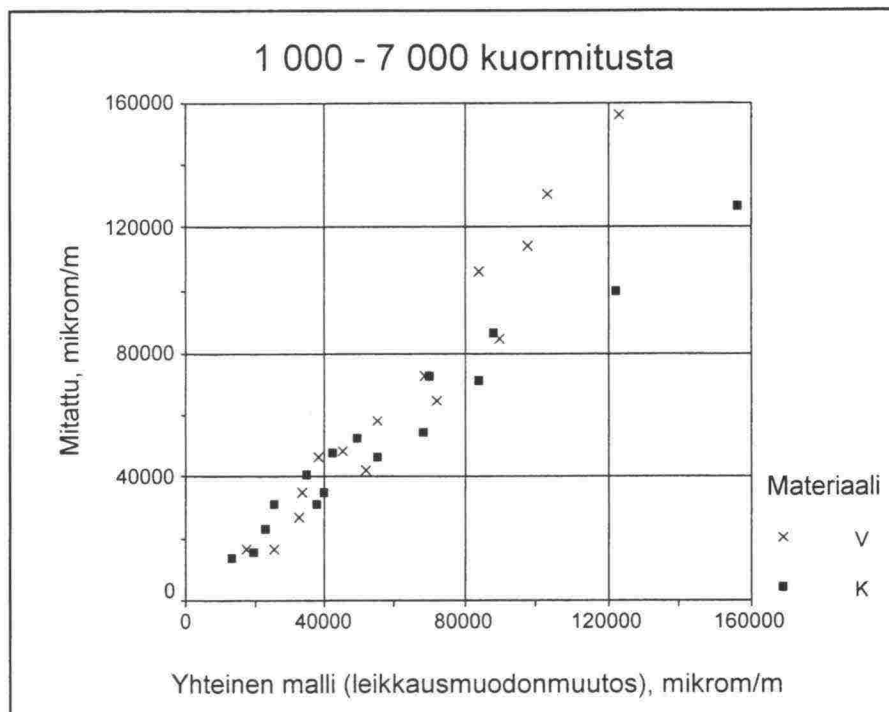
$$b' = 0.462 + 0.004096 \cdot S_r \quad (\text{Vittakangas}) \quad (2)$$



Kuva 2. Mitatut ja mallilla ($\epsilon_p = a'' \tau_e N^{b'}$) määritetyt kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset kevätolosuhteita simuloivissa testeissä nro 7 ja 10 - 16.

Potenssin b' ja kyllästysasteen (S_r) väliset riippuvuudet, kun ei ole otettu huomioon kantavan kerroksen materiaalin laatua:

$$b' = 0.487 + 0.003248 \cdot S_r \quad (\text{Ketunmaa ja Vittakangas}) \quad (3)$$



Kuva 3. Mitatut ja mallilla ($\epsilon_p = 0.0996 \tau_e N^{b_i}$) määritetyt kantavan kerroksen suhteelliset pysyvät muodonmuutokset kevätolosuhteita simuloivissa testeissä nro 7 ja 10 - 16.

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-710-X
TIEL 3200646