
**RATARAKENTEEN INSTRUMENTOINTI JA
MALLINNUS,
250 kN:n ja 300 kN:n AKSELIPAINOT**

- o **Pauli Kolisoja**
- o **Ilkka Järvenpää**
- o **Erkki Mäkelä**
- o **Matti Levomäki**

**RATARAKENTEEN INSTRUMENTOINTI JA
MALLINNUS, 250 kN:n ja 300kN:n AKSELIPAINOT**

- o Pauli Kolisoja**
- o Ilkka Järvenpää**
- o Erkki Mäkelä**
- o Matti Levomäki**

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111
FAX. (09) 5840 5140
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-033-x
ISSN 1455-2604

Kolisoja, Pauli – Järvenpää, Iikka – Mäkelä, Erkki – Levomäki, Matti: Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki 2000. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 5/2000. 137 sivua ja 5 liitettä. ISBN 952-445-033x, ISSN 1455-2604.

Avainsanat: instrumentointi, mallinnus, raide, ratapenger, värinä

TIIVISTELMÄ

Korian ja Kouvolan välisellä rataosuudella kesällä 1999 toteutettu ratarakenteen instrumentointi ja siihen liittyvät mallinnustarkastelut ovat osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN ja 300 kN akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia, joka aloitettiin kesällä 1998. Tutkimus on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratorion (TTKK/GEO), Teknillisen korkeakoulun lujuusopin laboratorion (TTK/LUJ) ja Teknillisen korkeakoulun tielaboratorion (TKK/TIE) yhteistyönä.

Instrumentointikohteessa mainitun rataosuuden pohjoisenpuoleinen raide ja sen alla oleva ratapenger instrumentoitiin yhdestä, suunnilleen kilometrilukeman 187+580 kohdalla sijainneesta, poikkileikkauksesta ratarakenteen osien mekaanista käyttäytymistä rekisteröivillä mittausjärjestelyillä. Lisäksi instrumentointikohteessa mitattiin junaliikenteen aiheuttaman värinän voimakkuutta kolmella eri etäisyydellä radan pohjoisenpuoleisesta raiteesta.

Noin kaksi vuorokautta kestäneen mittausjakson aikana ratarakenteen vasteita mitattiin kaikkiaan 65 normaalia junaliikennettä edustaneen tavara- ja henkilöjunan kulkiessa instrumentointikohteen yli. Näiden lisäksi mittauskohteen ylitti kymmenen kertaa erityisesti näitä mittauksia varten varustettu koejuna, jonka akseleista neljälle oli asetettu mahdollisimman tarkoin 250 kN suuruinen akselipaino.

Raiteesta saadut mittaustulokset koejunaa koskevilta osin antavat varsin selkeän kuvan siitä, kuinka suuria rasituksia hyväkuntoisin pyöräkerroin varustettu vaunu edellä mainitulla 250 kN akselipainoilla synnyttää raiteen rakenneosiin peruskorjatulla radalla. Täydennettynä normaalista liikenteestä saaduilla mittaustuloksilla sekä kirjallisuudesta löytyvillä erilaisilla olosuhteita koskevilla täydentävillä tiedoilla on mahdollista arvioida korotettujen akselipainojen aikaansaamia rasituksia. Kiskoista mitatut taivutusmuodonmuutokset pitävät hyvin yhtä klassillisen, kimmoisalla alustalla olevaa jatkuvaa palkkia koskevan teorian kanssa.

Ratapenkereestä tehtyjen mittausten perusteella voidaan todeta, että ratapenkereen pystysuuntaista jäykkyyttä on mahdollista mallintaa varsin tarkasti suhteellisen yksinkertaisella rakennemallilla, joka koostuu kerroksittain lineaarisesti kimmoista materiaalimallia noudattavista osista. Rakennemallissa käytettävät moduuliarvot on tällöin kuitenkin määritettävä koetavoilla, jotka sekä jännitys- että muodonmuutostason suhteen vastaavat rakenteen todellista kuormitustilannetta.

Kysymykseen siitä, mikä on erilaisia akselipainoja vastaava pengervevyyden turvallinen minimiarvo, ei nyt suoritettujen mittausten ja alustavien mallinnustarkastelujen

perusteella ole mahdollista antaa yksikäsitteistä vastausta. Voimakkaasti yksinkertaistetunkin elementtimallinnuksen perusteella näyttäisi kuitenkin varsin ilmeiseltä, että akselipainon kasvaessa ja pengerleveyden pienentyessä ratapenkereeseen syntyvät muodonmuutokset alkavat jossain vaiheessa hyvin voimakkaasti kasvaa. Saadut mittaustulokset antavat myös selvää viitettä siitä, että akselipainon kasvaessa ratapenkereen tiettyihin osiin saattaa muodostua vetojännityksiä, jotka lukuisia kertoja toistuessaan väistämättä aiheuttavat palautumattomien muodonmuutosten vähittäistä kumuloitumista pengerrakenteeseen.

Tärinämittausten osalta tulokset vahvistavat käsityksen säiliöjunien korkeista tärinäarvoista. Yleisesti voidaan todeta, että tulokset eivät kuitenkaan kerro selkeästi esimerkiksi nopeuden, massan tai junan pituuden vaikutuksesta tärinän synnyssä.

Kolisoja, Pauli – Järvenpää, Iikka – Mäkelä, Erkki – Levomäki, Matti: Instrumentation and Modelling of Track Structure, 250 kN and 300 kN axle loads. Finnish Rail Administration, Technical Unit. Helsinki 2000. Publications of Finnish Rail Administration A 5/2000. 137 pages and 5 appendices. ISBN 952-445-033x, ISSN 1455-2604.

Key words: instrumentation, modelling, track, railway embankment, vibration

SUMMARY

Instrumentation of a track structure on the railway line between Koria and Kouvola in summer 1999 and the related modeling of the track behavior are part of Finnish Rail Administration's (RHK) investigation with the aim of introducing 250 kN and 300 kN axle loads. This study is done in cooperation with the Laboratory of Geotechnical Engineering at the Tampere University of Technology, the Laboratory for Mechanics of Materials and Laboratory of Highway Engineering at the Helsinki University of Technology.

On the instrumentation site the track structure and the underlying embankment of the Northern line of the track between Koria and Kouvola was instrumented at one cross section near to the kilometer reading 187+580 with the aim of monitoring the mechanical behavior of the track components. Furthermore, the intensity of vibrations induced by the passing by trains was recorded at three different distances from the Northern line.

During the monitoring period that was lasting about two days the responses of the track structure were recorded while altogether 65 normal freight and passenger trains were passing by the instrumentation site. In addition to these the instrumentation site was passed by ten times by a special train possessing four axles having an exact axle load of 250 kN.

The time records of these run-throughs of the test train give a good idea of the deformations and stresses produced by wheel-sets in good shape with an axle load of 250 kN on a recently repaired track. Together with the data measured under the normal rail traffic and utilizing also the additional factors reported in literature it is possible to estimate the stresses in the rail structure under higher axle loads. The measured bending deformations of the rail agree with those derived from the traditional beam-on-elastic-foundation theory. Based on the measurements made from the railway embankment it can be concluded that the vertical stiffness of the embankment can be modeled fairly accurately using a relatively simple structural model that consists of infinite linear elastic layers on top of each other. However, the values of elastic modulus that are used in the structural model must be determined using test methods that correspond to the stress and strain level that corresponds to the actual loading conditions.

On the basis of the preliminary analysis of the measurement results performed so far it is not possible to give a unique answer to the question on what are the safe minimum values of embankment width that correspond to the different axle loads. Nevertheless, even the results of the very heavily simplified finite element simulations indicate quite clearly that as the axle load is increasing and the embankment width is decreasing the deformations that are developing into the embankment structure will in any case start to increase rapidly at some point. The obtained measurements results are also suggesting

that as the axle load is increasing tensile strains may develop in certain parts of the embankment. If that happens repeatedly, it is quite obvious that a gradual accumulation of permanent deformations takes place in the embankment structure.

The results of the vibration records strengthen the generally agreed idea that the rise in axle loads increases vibration at least in goods traffic. We can not, however, based on these measurements, state what kind of influence speed, axle load, or the length of the train have on the origin or drift of vibration.

ESIPUHE

Tämä ratarakenteen instrumentointia ja mallinnusta käsittelevä tutkimus on osa Ratahallintokeskuksen 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon liittyvää tutkimusta. Tutkimus on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratorion (TTKK/GEO), Teknillisen korkeakoulun lujuusopin laboratorion (TKK/LUJ) ja Teknillisen korkeakoulun tielaboratorion (TKK/TIE) yhteistyönä.

Käsillä olevassa tutkimusraportissa on esitetty yhteenveto Korian ja Kouvolan välisellä rataosuudella kesällä 1999 tehdyn ratarakenteen instrumentoinnin ja instrumentointikohteessa tehtyjen mittausten käytännön toteutuksesta. Edelleen raportissa esitellään mittaustuloksille tehtyjen alustavien analysointien ja niihin liittyneiden ratarakenteen osien mekaanista toimintaa käsittelevien mallinnustarkastelujen tulokset. Lopuksi tutkimusraportissa esitetään joukko jatkotutkimusehdotuksia, joiden tarkoituksena on tuoda esille keskeisimmät alustavien analysointien perusteella lisäselvityksiä vaativiksi osoittautuneet asiat sekä hahmotella instrumentointikohteesta saatuja tulosten yleisempiä hyödyntämismahdollisuuksia.

Tutkimusraportin päävastuullisena kirjoittajana lukujen 1 – 4 osalta on ollut Pauli Kolisoja TTKK:n geotekniikan laboratorion lukuun ottamatta raiteen instrumentointia käsitteleviä kohtia, jotka on kirjoittanut Iikka Järvenpää TKK:n lujuusopin laboratorion luvun 5 päävastuullisena kirjoittajana on ollut niin ikään Iikka Järvenpää. Luvut 6 ja 7 on pääosin kirjoittanut Erkki Mäkelä TTKK:n geotekniikan laboratorion luvun 8 on kirjoittanut Matti Levomäki TKK:n tietekniikan laboratorion. Työtä ovat ohjanneet ylitarkastajat Pasi Leimi ja Kari Ojanperä Ratahallintokeskuksen Teknisestä yksiköstä.

Helsingissä, heinäkuussa 2000

Ratahallintokeskus

Tekninen yksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SUMMARY	5
ESIPUHE	7
SISÄLLYSLUETTELO	8
1 JOHDANTO.....	11
2 INSTRUMENTOINNIN TOTEUTUS	13
2.1 Instrumentoinnin asennuksen vaiheistus	13
2.2 Asennusvaihe 1.....	13
2.2.1 Asennusten toteutustapa.....	13
2.2.2 Asennetut mittausinstrumentit.....	17
2.2.3 Poikkeamat instrumentointisuunnitelmasta.....	20
2.2.4 Tiiviysmittausten tulokset.....	21
2.3 Asennusvaihe 2.....	23
2.3.1 Asennusten toteutustapa.....	23
2.3.2 Asennetut mittausinstrumentit.....	23
2.3.3 Poikkeamat instrumentointisuunnitelmasta.....	25
2.4 Asennusvaihe 3.....	25
2.4.1 Asennusten toteutustapa.....	25
2.4.2 Asennetut mittausinstrumentit.....	26
2.4.3 Poikkeamat instrumentointisuunnitelmasta.....	27
3 MITTAUSTEN TOTEUTUS.....	28
3.1 Mittausajankohta ja mitattu liikenne	28
3.2 Mittausjärjestelyt.....	29
3.2.1 Raiteesta tehdyt mittaukset.....	29
3.2.2 Ratapenkereestä tehdyt mittaukset.....	31
3.2.3 Tärinä- ja nopeusmittaukset	31
4 MALLINNUKSEN LÄHTÖTIEDOT	33
4.1 Raiteen ominaisuudet.....	33
4.2 Ratapenkereen ominaisuudet	33
4.2.1 Ratapenkereen mitat.....	33
4.2.2 Penger materiaalien rakeisuusjakautumat	33
4.2.3 Penger materiaalien mekaaniset ominaisuudet.....	35
4.3 Pohjamaan ominaisuudet	37
4.3.1 Instrumentointikohteen pohjasuhteet.....	37
4.3.2 Pohjamaan mekaaniset ominaisuudet	38
4.4 Edustavien mittaustulosten valinta	40
4.4.1 Mittaukset 250 kN akselipainolla	40
4.4.2 Mittaukset muilla akselipainoilla.....	41
4.5 Esimerkkejä mittaustuloksista.....	41
4.5.1 Raiteesta tehdyt mittaukset.....	41

4.5.2	Ratapenkereestä tehdyt mittaukset.....	48
5	RAITEEN TOIMINTAAN LIITTYVÄT TARKASTELUT	54
5.1	Kiskoon kohdistuvat rasitukset	54
5.2	Välilevyn rasitukset ja toiminta	58
5.3	Kiskonkiinnitysten rasitukset ja toiminta	59
5.4	Pölkyn rasitukset	60
5.5	Raiteen karakteristinen pituus	61
5.6	Kuormituksen jakautuminen peräkkäisille pölkyille.....	65
6	RATAPENKEREEN MALLINTAMINEN KERROSRAKENNEOHJELMALLA..	66
6.1	Johdanto	66
6.2	Kerrosrakennemallin koordinaatioista	66
6.3	Käytetty teoria	69
6.4	Kuormituksen antaminen laskentamalliin	71
6.5	Laskentakerrosten paksuudet sekä käytetyt moduuliarvot 250 kN akselipainolla.....	76
6.6	Laskettujen ja mitattujen arvojen vertailu 250 kN akselipainolla.....	77
6.7	Laskentatuloksen herkkyyys Poissonin luvulle 250 kN akselipainolla.....	79
6.8	Laskentatuloksen herkkyyys pohjamaan moduuliarvolle 250 kN akselipainolla.....	82
6.9	Laskentatuloksen herkkyyys kerrosmateriaalien moduuliarvoille 250 kN akselipainolla.....	84
6.10	Akselipainon suuruuden vaikutus penkereen toimintaan	85
6.11	Kerrosrakennemallinnuksen ja alustaluvun yhteys	90
6.12	Johtopäätökset	91
7	PENGERLEVEYDEN VAIKUTUKSEEN LIITTYVÄT TARKASTELUT	92
7.1	Johdanto	92
7.2	Mallinnustapa	92
7.3	Penkereen toiminta 250 kN akselipainolla	97
7.4	Jätkänpolun leveyden vaikutus painumiin ja sivusiirtymiin erilaisilla akselipainoilla.....	105
7.5	Pengerleveyden vaikutukseen liittyvät havainnot mittaustuloksissa.....	108
7.6	Johtopäätökset	110
8	TÄRINÄ- JA RAITEENMITTAUSTULOKSIA KORIALTA	111
8.1	Tärinätuloksia Korian mittauksista	111
8.1.1	Yleistä	111
8.1.2	Mittausjärjestelyt	111
8.1.3	Mittaustulokset	112
8.1.4	Tulosten arviointia	122
8.2	Tärinän vertaaminen pölkyn liikkeeseen	122
8.2.1	Yleistä	122
8.2.2	Pölkyn siirtymät ja tärinä	122
8.2.3	Päätelmät	126
8.3	Raiteenmittaustuloksia	127
8.3.1	Mittausohjelma	127
8.3.2	Mittausvälineet	127
8.3.3	Mittaustulokset	127

9	YHTEENVETO.....	130
9.1	Johtopäätökset instrumentoinnista ja mittauksista	130
9.2	Johtopäätökset raiteen toiminnan mallintamisesta	131
9.3	Johtopäätökset ratapenkereen toiminnan mallintamisesta.....	132
9.4	Ehdotukset jatkotoimenpiteiksi.....	133

	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	137
--	---------------------------	-----

LIITTEET

1. Erittely instrumentointikohteen kautta kulkeneesta liikenteestä
2. Syklisten ja staattisten kolmiaksaalikokeiden tulokset
3. Instrumentointikohteen pohjatutkimuksen tulokset
4. Resonant Column ja Bender element -mittausten tulokset
5. Tärinämittausten tulokset

1 JOHDANTO

Ratahallintokeskuksen (RHK) toimeksiannosta vuosina 1998 – 2000 tekeillä olevan sallittujen akselipainojen korottamismahdollisuuksia selvittävän tutkimusprojektin yhteydessä toteutettiin täysimittakaavainen ratarakenteen instrumentointi kesällä 1999. Instrumentointikohde sijaitsi Korian ja Kouvolan välisellä rataosuudella kilometrilukeman 187 + 580 kohdalla. Instrumentointi tehtiin radan pohjoispuoleiseen raiteeseen ja sen alla olevaan ratapenkereeseen. Instrumentoidun ratapoikkileikkauksen kohdalla rata oli suora eikä siinä ollut routalevyjä.

Instrumentointikohteen toteutuksessa tavoitteena oli saada mittauksiin perustuvaa tietoa siitä, mikä on erisuuruisten akselikuormien vaikutus seuraaviin asioihin:

- raiteen eri rakenneosiin kohdistuvat rasitukset
- kuormitusten jakautuminen tukikerroksen alapuolisessa ratapenkereessä sekä
- radan ympäristöön leviävän tärinän voimakkuus.

Pääosa mittauksista tehtiin instrumentointikohteen yli kulkeneen normaaliliikenteen alaisena. Tällä tavoin mittaustuloksia saatiin sekä henkilöliikenteen että tavaraliikenteen junista. Mitatun tavaraliikenteen joukossa oli runsaasti suuret pystysuuntaiset raidevoimat aiheuttavaa venäläistä säiliövaunukalustoa, jota käytetään Venäjältä maahan tuotavien öljytuotteiden kuljettamiseen. Normaaliliikenteen lisäksi mittauksia tehtiin myös mittauskohdetta varten varustetun koejunan kulkiessa instrumentoidun ratapoikkileikkauksen yli vaihtelevilla nopeuksilla. Koejunassa yhden neliakselisen vaunun kaikki akselikuormat oli pyritty asettamaan mahdollisimman tarkoin 250 kN suuruisiksi.

Instrumentointikohteeseen tehtävien mittausjärjestelyiden ja mittausten käytännön toteutuksen suunnittelu aloitettiin RHK:n toimeksiannosta lokakuussa 1998. Suunnitteluun osallistuivat Teknillisen korkeakoulun (TKK) lujuusopin ja tietekniikan laboratoriot sekä Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) geotekniikan laboratorio. Suunnittelun tulokset on dokumentoitu RHK:n julkaisussa A4/1999 ”Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot” (Järvenpää et al. 1999). Nimensä mukaisesti raportissa on mittausjärjestelyjen toteutustavan kuvauksen lisäksi esitetty myös alustavat suuntaviivat saatavien mittaustulosten hyödyntämiselle ratarakenteen ja sen osien mekaanisen toiminnan mallinnuksessa.

Instrumentointi- ja mallinnussuunnitelman mukaisesti vuoden 1999 loppupuolelle ohjelmoituun tutkimusjaksoon sisältyvien mallinnustarkastelujen tavoitteena on ollut verrata instrumentointikohteen edustaman ratarakenteen mitattua käyttäytymistä suhteellisen yksinkertaisten ja suoraviivaisesti sovellettavissa olevien laskenta- ja mallinnusmenettelyjen avulla kuvattuun ratarakenteen ja sen yksittäisten rakenneosien käyttäytymiseen. Suunnitelmassahan tutkimusvaiheeseen sisältyvien alustavien mallinnustarkastelujen tavoitteiksi oli kirjattu, että niiden tulosten perusteella voidaan ”arvioida instrumentointikohteesta saatavien mittaustulosten luotettavuutta, saada yleiskuva instrumentointikohteen ratapenkereen ja sen eri rakenneosien mekaanisesta toiminnasta ja toiminnan mallinnukseen käytettävien menettelyjen soveltamismahdollisuuksista muihin vastaaviin mallinnustehtäviin sekä luoda pohja mahdollisesti

myöhemmin tehtävien instrumentointikohteen yksityiskohtaisempien analysointien suunnittelulle.” (Järvenpää et al. 1999).

Tässä raportissa esitetään yhteenveto instrumentoinnin ja mittausten käytännön toteutuksesta Korian ja Kouvolan välisellä rataosuudella touko-heinäkuussa 1999 sekä edellä kuvattujen tavoitteiden mukaisesti tehtyjen alustavien mallinnustarkastelujen tulokset. Raportin lopussa esitetään myös mittaustulosten tähänastiseen analysointiin pohjautuvat ehdotukset ratarakenteiden ja niiden yksittäisten rakenneosien mekaanisen toiminnan mallinnukseen liittyviksi jatkotoimenpiteiksi. Lisäksi samassa yhteydessä pohditaan myös eräitä muita koetulosten tarkastelun yhteydessä esille nousseita lähinnä ratarakenteiden kuormitusotaksumiin liittyviä kysymyksiä, jota eivät sinällään ole olleet tutkimuskohteina nyt puheena olevassa tutkimusvaiheessa, mutta joihin vastaamiseen instrumentointikohteen tähänastiset mallinnustarkastelut ainakin jossain määrin antavat eväitä.

2 INSTRUMENTOINNIN TOTEUTUS

2.1 Instrumentoinnin asennuksen vaiheistus

Laaditun etukäteissuunnitelman mukaisesti mittausinstrumenttien asentaminen tapahtui kolmessa eri vaiheessa seuraavasti:

1. Ratapenkereeseen kahdelle alimmalle instrumenttien asennustasolle mittausinstrumentit asennettiin 26. toukokuuta 1999. Ajankohta määräytyi siten, että instrumentointikohteen kohdalla tapahtui ratapölkkyjen ja kiskojen vaihto lähes välittömästi mittausinstrumenttien asentamisen jälkeen.
2. Välittömästi tukikerroksen seulentatason alapuolelle asennettavien mittausinstrumenttien asentaminen tehtiin 27. ja 28. toukokuuta 1999 välisenä yönä, jolloin seulentayksikkö pysäytettiin tarkasti instrumentointikohteen kohdalle asennustyön ajaksi. Tällöin asennustyö voitiin tehdä suoraan tavoitteena olleelle instrumenttien asennussyvyydelle seulentakaluston alla.
3. Raiteeseen tehtävien instrumentointien asennus tapahtui 21. – 30. kesäkuuta 1999 välisenä aikana. Tätä ennen ratapenkereen läpi oli kuitenkin jo asennettu tiiviiseen pohjamaakerrokseen ulottuvat pystysuuntaiset ankkurointitangot ratapölkyn siirtymää mittaavien antureiden kiinnittämistä varten. Asennusvaiheen ajankohta oli valittu siten, että raide oli raiteenvaihdon ja tuennan jälkeen ehtinyt jo olla jonkin aikaa liikenteen alla. Näin ratarakenteessa välittömästi mainittujen toimenpiteiden jälkeen odotettavissa olevien liikkeiden voitiin otaksua pääosin tapahtuneen ennen instrumentoinnin asentamista.

Ennen varsinaisten mittausten suoritusajankohtaa instrumentointikohteessa testattiin vielä mittausjärjestelyjen ja niihin kytkettyjen tiedonkeruulaitteistojen toimivuutta. Raiteesta tehtävien mittausten osalta nämä ennakkomittaukset ajoittuivat 30. kesäkuuta – 1. heinäkuuta väliselle ajalle. Ratapenkereeseen asennettujen mittausinstrumenttien toimivuutta instrumentointikohteessa testattiin 1. heinäkuuta 1999.

2.2 Asennusvaihe 1

2.2.1 Asennusten toteutustapa

Syvälle ratapenkereeseen sijoittuvat mittausinstrumentit asennettiin seuraavan työvaiheistuksen mukaisesti:

- Raide katkaistiin noin 10 m matkalta ja ratapenger kaivettiin auki sivulta päin (kuva 2.2:1). Ratapenkereen puolivälin tasolla - noin syvyystasolla Kv – 1,3 m – kaivuu ulottui molempien kiskojen alapuolelle, mutta tasolla Kv – 2,0 m kaivuu ulotettiin vain ulomman raiteen alapuolelle.

- Ratapenkereen aukikaivuun yhteydessä sen alkuperäistä tiiviystilaa mitattiin volymetrikokeella, radiometrisellä tiivyyden mittauslaitteistolla (Troxler) sekä epäsuorasti kannettavalla pudotuspainolaitteella tehdyin mittauksin (kuva 2.2:2).



Kuva 2.2:1 Raiteen katkaisu ja ratapenkereen aukikaivuu.

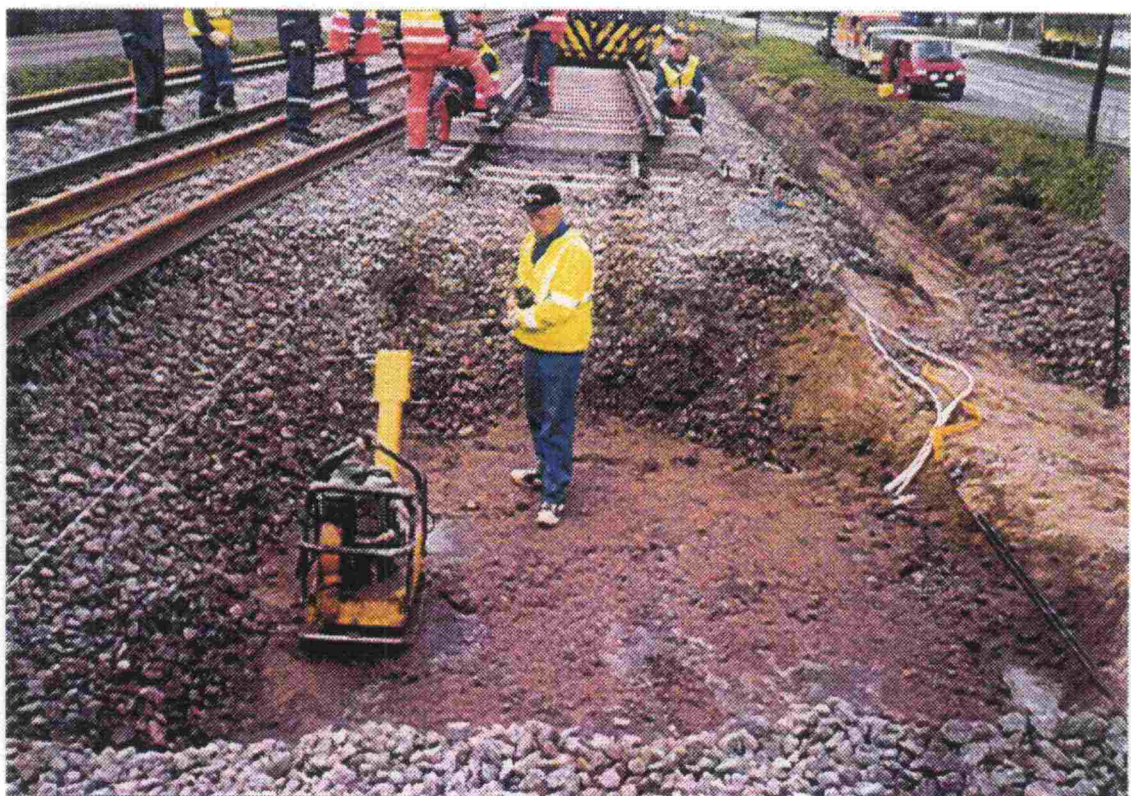


Kuva 2.2:2 Ratapenkereen tiiviuden mittaus aukikaivuun yhteydessä.

- Syvyydystasolle Kv – 2,0 m sijoittuvat mittausanturit asennettiin paikoilleen ja niiden todellinen sijainti mitattiin.
- Ratapenkereen alkuperäinen materiaali tiivistettiin kerroksittain suunnilleen ratapenkereen puolivälin korkeudelle asti.
- Syvyydystasolle Kv – 1,3 m sijoittuvat mittausinstrumentit asennettiin paikoilleen ja niiden todellinen sijainti mitattiin (kuva 2.2:3).
- Ratapenkereen yläosa tiivistettiin kerroksittain penkereen alkuperäisiä materiaaleja käyttäen (kuva 2.2:4).
- Raide asennettiin tilapäisesti paikoilleen sidekiskojaatkoksia käyttäen.



Kuva 2.2:3 Mittausinstrumenttien sijainnin mittaus.



Kuva 2.2:4 Ratapenkereen täyttö kerroksittain tiivistäen.

2.2.2 Asennetut mittausinstrumentit

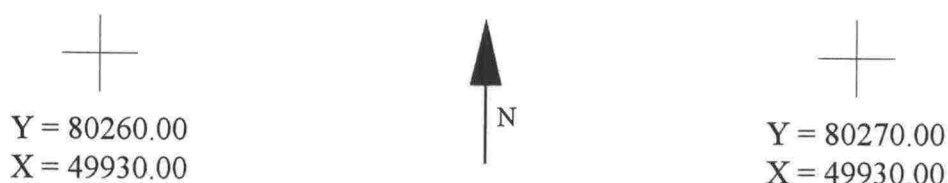
Yhteenveto ratapenkereeseen syvyydeltä $K_v = 2,0$ m asennettujen mittausinstrumenttien sijainnista suhteessa pohjoispuoleisen raiteen lopulliseen sijaintiin on esitetty kuvassa 2.2:5 ja syvyydeltä $K_v = 1,3$ m sijoitettujen mittausinstrumenttien sijainnista vastaavasti kuvassa 2.2:6.

Kuten kuvista 2.2:5 ja 2.2:6 havaitaan, vaihtelevat mittausinstrumenttien lopulliset sijaintipaikat jonkin verran suhteessa pölkkyjen ja pölkkyvälien sijaintiin. Itse asiassa toisilleen rinnakkaisten mittausinstrumenttien keskinäiset välit olivat tarkoituksella valittu puolelta pölkkyvälin mittausiksi juuri sitä silmällä pitäen, että antureiden sijainnissa suhteessa ratapölkkyjen sijaintiin olisi jonkin verran vaihtelua. Toisaalta näin voitiin varmistaa myös se ei-toivottu tilanne, että kaikki samantyyppiset anturit olisivat sattuneet sijoittumaan täsmälleen ratapölkkyjen puolivälin kohdalle. Ongelmana anturien sijoituspaikkoja valittaessahan oli, että instrumentointikohteen kohdalla raiteenvaihto tapahtui vasta mittausinstrumenttien asennuksen jälkeen ja ratapölkkyjen lopullisia paikkoja ei antureiden asennusvaiheessa näin ollen ollut mahdollista tietää.

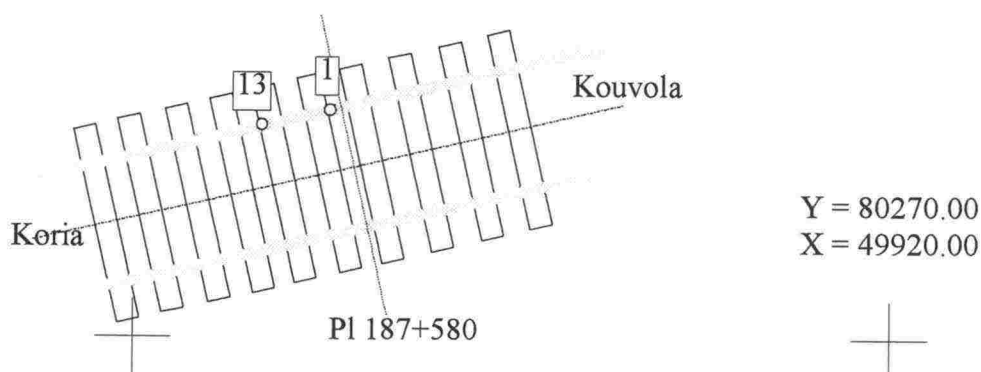
Kun sitten toisaalta otetaan huomioon antureiden asennussyvyys suhteessa poikkeamiin antureiden ideaalisista sijaintipaikoista suoraan ratapölkyn keskilinjan tai pölkkyvälin alapuolella, voitaneen todeta, että antureiden toteutuneet sijainnit eivät vaaranna mittaus tulosten edustavuutta. Antureiden sijaintitasolle vaikuttaessaanhan ratapölkkyjen kautta tukikerrokseen ja sen alapuolisiin ratapenkereen osiin välittyvät kuormat ehtivät

joka tapauksessa jo jakaantua kuta kuinkin tasaisesti. Samalla tavoin mittausinstrumenttien pienillä sivuttaissuuntaisilla poikkeamilla kiskojen keskikohtien kautta kulkevista pystytasoista ei mitä ilmeisimmin myöskään ole mainittavaa vaikutusta mittaustulosten edustavuuteen tai keskinäiseen vertailukelpoisuuteen.

Yhteenvedot kahdelle alimmalle mittausinstrumenttien asennustasolle sijoittuvien antureiden lukumääristä ja tarkoista asennussyvyyksistä on koottu taulukkoihin 2.2:1 ja 2.2:2.



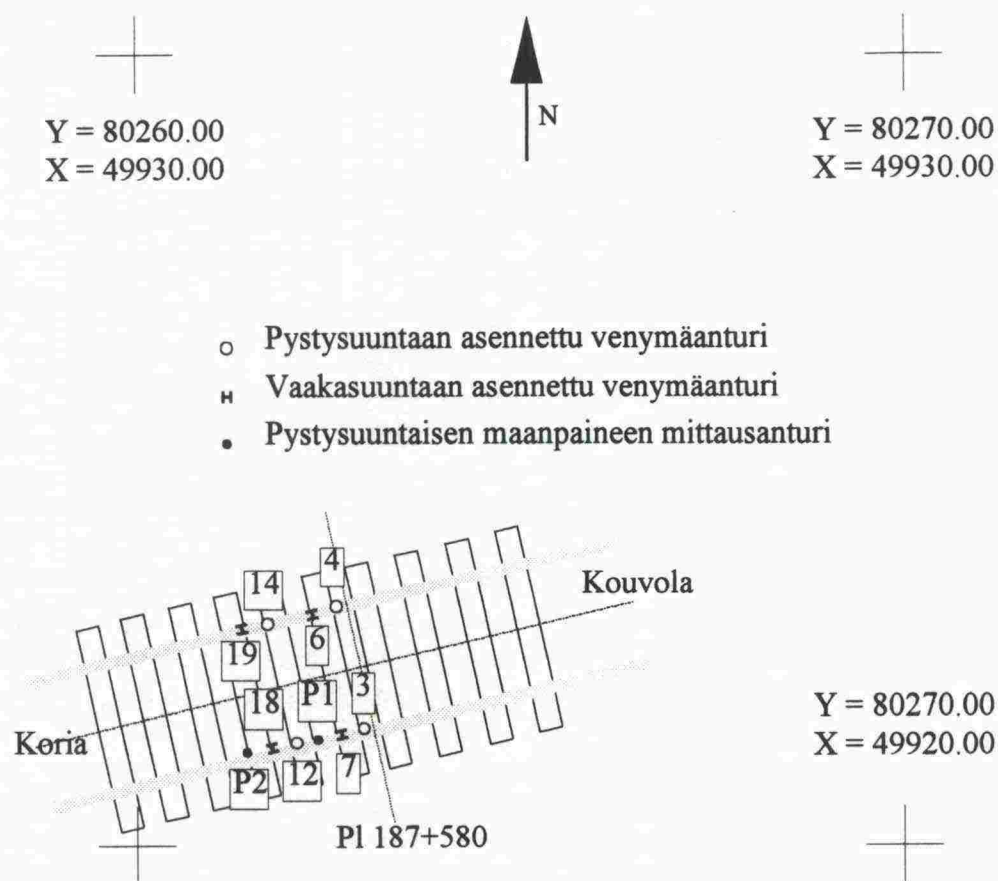
- Pystysuuntaan asennettu venymäanturi



Kuva 2.2:5 Syvyystasolle $K_v - 2,0$ m asennettujen mittausinstrumenttien sijainnit.

Taulukko 2.2:1 Mittausinstrumentit syvyystasolla $K_v - 2,0$ m.

Mittausinstrumentin tyyppi	Instrumentin numero	Asennussyvyys K_v :sta
Pystysuuntaan asennettu venymäanturi	1	2,00
	13	1,99
Lämpötilan mittausanturi	25	-



Kuva 2.2:6 Syvyystasolle Kv – 1,3 m asennettujen mittausinstrumenttien sijainnit.

Taulukko 2.2:2 Mittausinstrumentit syvyystasolla Kv – 1,3 m.

Mittausinstrumentin tyyppi	Instrumentin numero	Asennussyvyys Kv:sta
Pystysuuntaan asennettu venymäanturi	3	1,26
	4	1,31
	12	1,23
	14	1,30
Vaakasuuntaan asennettu venymäanturi	6	1,31
	7	1,25
	18	1,22
	19	1,30
Pystysuuntaan asennettu maanpaineanturi	P1	1,24
	P2	1,22
Lämpötilan mittausanturi	26	1,21
	27	1,27
Vesipitoisuuden mittausanturi	V1	-

2.2.3 Poikkeamat instrumentointisuunnitelmasta

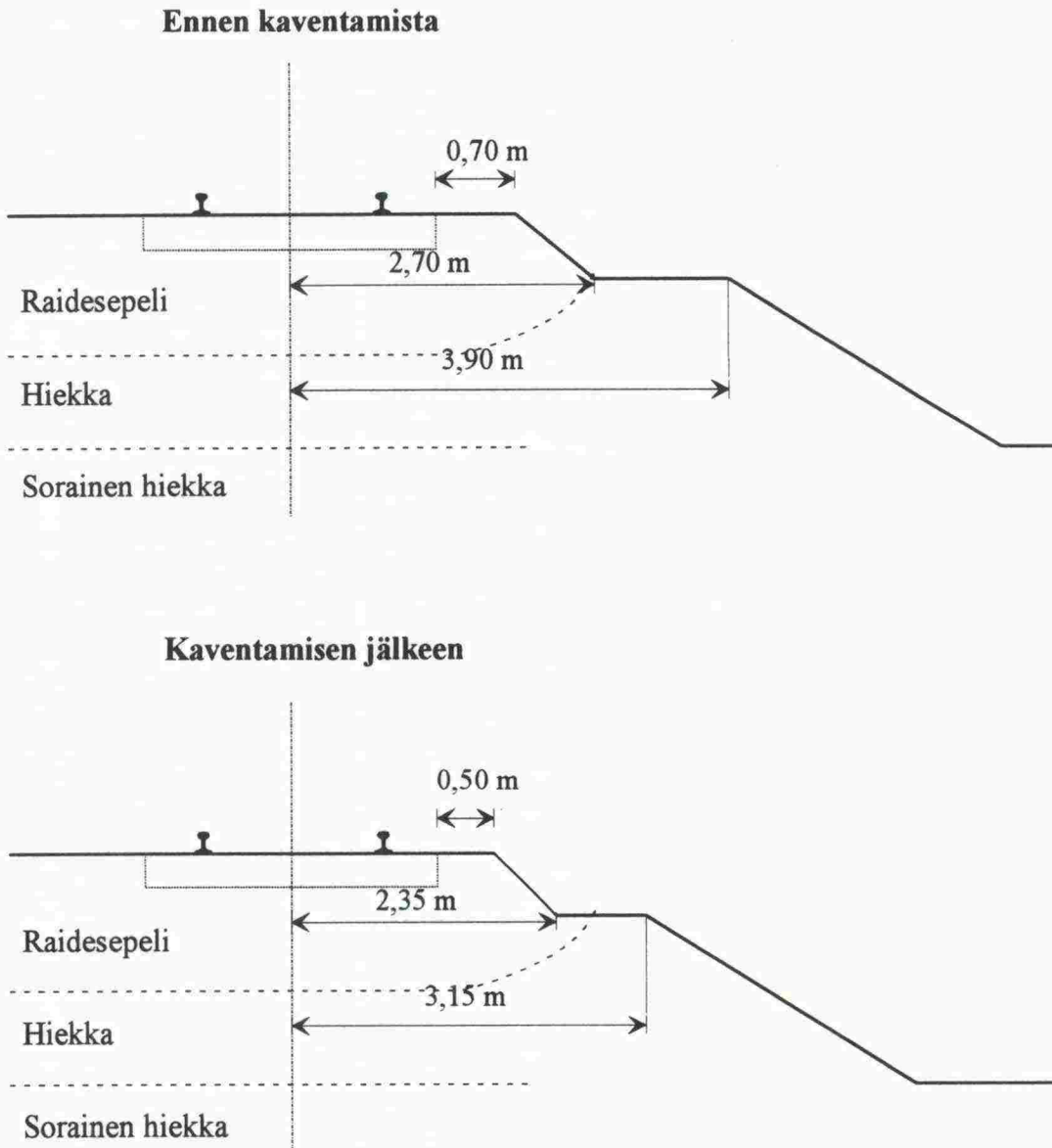
Asennettujen mittausinstrumenttien määrän ja tyyppien suhteen instrumentointi toteutettiin kahden alimman asennustason osalta ennalta laaditun suunnitelman (Järvenpää et al. 1999) mukaisesti. Ennakoarvioista poikkeavana voidaan sen sijaan pitää ratapenkereen todellista koostumusta ja kerrosrakennetta. Sepelikerroksen paksuudeksi penkereen aukikaivuun yhteydessä nimittäin todettiin noin 1,2 m (kuva 2.2:7). Tämän tason alapuolella ratapenkereessä oli noin 0,8 m vahvuudelta hiekkaa ja tämän alla jonkin verran karkearakeisempaa soraista hiekkaa. Soraisen hiekkakerroksen paksuudesta ei asennuksen yhteydessä tehdyn kaivuun syvyysulottuman puitteissa pystytty varmistumaan, mutta oletettavasti kerros ulottui ainakin jonkin verran ratapenkerettä ympäröivän alkuperäisen maanpinnan tason alapuolelle.

Varsin ilmeisenä syynä sepelikerroksen selvästi tavanomaista suuremmalle paksuudelle on instrumentointikohteen pohjamaassa esiintyvä paksu hienorakeisten maalajien muodostama kerros. Tässä kerroksessa vuosikymmenten aikana tapahtuneen konsolidaatiopainuman vaikutusta raiteen korkeusasemaan on todennäköisesti korjattu sepelikerrosta vaiheittain täydentämällä. Samalla myös ratapenkereessä alimpana sijaitsevat rakennekerrokset ovat vähitellen painuneet alkuperäisen maanpinnan tason alapuolelle.

Nykyisiin ratojen suunnittelu- ja rakentamishojeisiin nähden epätavanomaisena pidettävää rakennekerrosten järjestystä – hiekkakerros välittömästi sepelikerroksen alla ja karkearakeisempi sorainen hiekka tämän alapuolella – voitaneen sitäkin pitää pitkällä aikavälillä tapahtuneen ratapenkereen vaiheittaisen rakentamisen ja vahvistamisen seurauksena. Mahdollista voisi nimittäin ehkä olla, että alempi sorainen hiekkakerros on jossain vaiheessa toiminut radan alkuperäisenä tukikerroksena. Rakennekerrosten materiaaleille määritettyihin rakeisuusjakautumiin palataan tarkemmin jäljempänä luvussa 4.

Itse mittausinstrumenttien asennukselle ratapenkereen ennako-odotusten vastaisella kerrosrakenteella ei kahden alimman asennustason osalta ollut kovin suurta vaikutusta. Syvyystasolle Kv – 2,0 m sijoittuvat mittausinstrumentit asennettiin alemman hiekkakerroksen yläosaan ja syvyystasolle Kv – 1,3 m sijoittuvat anturit vastaavasti hienorakeisempaan hiekkakerrokseen jonkin verran sepelikerroksen alapinnan alapuolelle.

Mittausten alkuvaiheessa toinen instrumentointisuunnitelman mukaiseen tilanteeseen nähden todettu poikkeama liittyi ratapenkereen leveyteen. Leveyttä ei nimittäin oltu tehty tarkasti kaksiraiteisen radan normaalipoikkileikkauksen mukaiseksi, vaan ratapenger oli instrumentointikohteen kohdalla tätä leveämpi. Tästä syystä pengertä kavennettiin suunnilleen mittausjakson puolivälissä noin 10 m matkalta instrumentointikohteen ympäristöstä. Periaatekuvat ratapenkereen poikkileikkauksesta ennen kaventamista ja kaventamisen jälkeen on esitetty kuvassa 2.2:7. Samaan kuvaan on myös hahmoteltu arvioidut ratapenkeret rakennekerrosten rajapinnat.



Kuva 2.2:7 Ratapenkereen muoto ennen kaventamista ja kaventamisen jälkeen.

2.2.4 Tiiviysmittausten tulokset

Kuten edellä kohdassa 2.2.1 jo todettiin mitattiin ratapenkereen rakennekerrosten alkuperäistä tiiviyyttä penkerein aukikaivuun yhteydessä vesivolymetrikokeilla sekä radiometrisellä tiiviyyden mittauslaitteistolla. Tämän lisäksi tiiviystilaa testattiin epäsuorasti kannettavalla pudotuspainolaitteistolla tehdyin mittauksin. Penkerein rakennekerrosten kerroksittaisen tiivistämisen yhteydessä tiiviystilaa kontrolloitiin vastaavasti kahta viimeksi mainittua mittausmenetelmää käyttäen. Tavoitteena oli tällöin ennen muuta varmistua kerrosten riittävästä tiiviystilasta, jotta rataan ei instrumentointikohteen kohdalle myöhemmin muodostuisi haitallisia jälkipainumia.

Yhteenveto tehtyjen tiivysmittausten tuloksista penkereen aukikaivuun ja kerroksittaisen tiivistämisen yhteydessä on esitetty taulukossa 2.2:3. Vaikka tiivistettävän kerroksen pintaosasta mitattu tiivys saattaakin olla hieman vastaavan kerroksen keskimääräistä tiiviyyttä korkeampi, näyttäisi taulukon 2.2:3 tulosten perusteella siltä, että rakennekerrosten tiivistäminen oli ollut tehokkuudeltaan riittävää.

Taulukko 2.2:3 Ratapenkereen rakennekerroksista tehtyjen tiivysmittausten tulokset.

Mittauksen suoritustaso	Mittausmenetelmä ja tuloksen yksikkö	Mittauksen tulos	
		Aukikaivuun yhteydessä	Tiivistyksen jälkeen
Kv – 1,3 m (hiekkä)	Radiometrinen kuivairtotiheyden mittaus [kg/m ³]	1719	2111
		1784	1974
		1792	2014
		1766	2060
		1788	2037
		1763	1997
	Loadman-laitteella mitattu moduuliarvo [MPa]	85	104
		144	96
		116	122
		104	133
Kv – 2,0 m (sorainen hiekkä)	Kuivairtotiheys vesivolymetrillä [kg/m ³]	1749	
		1778	
	Radiometrinen kuivairtotiheyden mittaus [kg/m ³]	1878	
		1919	
		1867	
		1860	
		1884	
		1856	
	Loadman-laitteella mitattu moduuliarvo [MPa]	89	
		82	
89			

2.3 Asennusvaihe 2

2.3.1 Asennusten toteutustapa

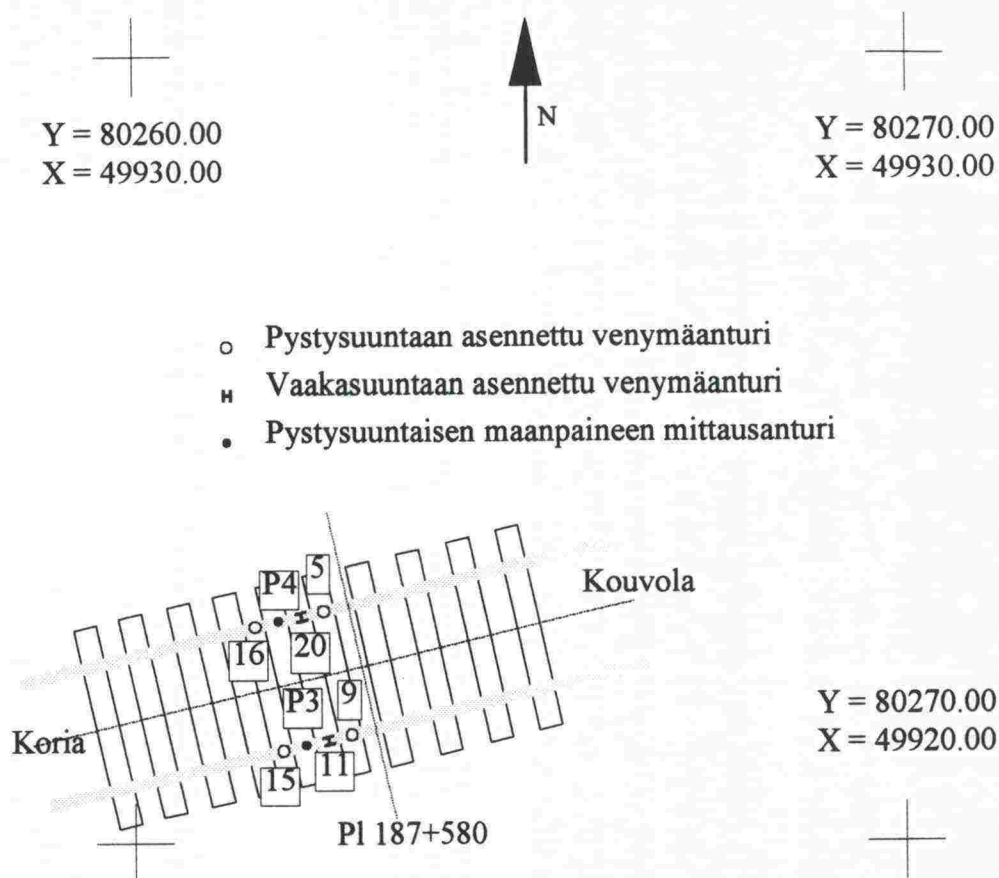
Jo edellä kappaleessa 2.1 todetun mukaisesti ratapenkereen sisälle sijoittuvien mittausinstrumenttien asennus korkeustasolle Kv – 0,7 m tapahtui perusparannuksen alaisena olevalla rataosuudella tehdyn sepelinseulonnan edettyä instrumentointikohteen kohdalle. Seulontakone pysäytettiin tällöin tarkasti asennuskohteen päälle, jolloin instrumenttiasennukset voitiin tehdä suoraan seulontatason alapuolelle jäävään sepelikerrokseen. Koska instrumenttien asennuskerrosta ei tällöin tarvinnut kaivaa antureiden asennuksen edellyttämää tilaa enempää, ei asennuskerroksen tiiviystilan säilymisestä ennallaan aiheutunut ongelmaa. Myöskään antureiden asennustason yläpuolelle jäävän sepelikerroksen tiiviystila ei edellyttänyt mitään erityistoimenpiteitä, koska kerroksessa oleva raide tuli joka tapauksessa kauttaaltaan tuettavaksi sepelinseulonnan jälkeen.

2.3.2 Asennetut mittausinstrumentit

Koska antureiden sijoituspaikat voitiin asennusvaiheen 2 yhteydessä sitoa suoraan asennustason yläpuolella olleen uuden raiteen sijaintiin, ei niiden toteutunutta sijaintia kontrolloitu geodeettista paikalleenmittausta käyttäen. Käytännössä tämä olisi asennusajankohdan pimeydestä johtuen ollut melko hankalaakin.

Yhteenveto asennustasolle Kv – 0,7 m sijoitettujen mittausinstrumenttien sijainnista suhteessa pohjoisenpuoleiseen raiteeseen on esitetty kuvassa 2.3:1. Kuten kuvasta todetaan sijoittuu puolet pystysuuntaisista venymäantureista nyt melko tarkasti ratapölkyn alle ja puolet pölkkyvälin kohdalle.

Taulukkomuotoinen yhteenveto asennustasolle Kv – 0,7 m sijoittuvien antureiden lukumääristä ja tarkoista asennussyvyyksistä on vielä esitetty taulukossa 2.3:1.



- Pystysuuntaan asennettu venymäanturi
- ◻ Vaakasuuntaan asennettu venymäanturi
- Pystysuuntaisen maanpaineen mittausanturi

Kuva 2.3:1 Syvyystasolle $K_v - 0,7$ m asennettujen mittausinstrumenttien sijainnit.

Taulukko 2.3:1 Mittausinstrumentit syvyystasolla $K_v - 0,7$ m.

Mittausinstrumentin tyyppi	Instrumentin numero	Asennussyvyys K_v :sta
Pystysuuntaan asennettu venymäanturi	5	0,66 ^(*)
	9	
	15	
	16	
Vaakasuuntaan asennettu venymäanturi	11	0,66 ^(*)
	20	
Pystysuuntaan asennettu maanpaineanturi	P3	0,66 ^(*)
	P4	
Lämpötilan mittausanturi	28	0,66 ^(*)
Vesipitoisuuden mittausanturi	V2	0,66 ^(*)

(* Asennussyvyys arvioitu mitatun seulontatason perusteella.

2.3.3 Poikkeamat instrumentointisuunnitelmasta

Tärkein ennakko-odotuksista poikkeava seikka asennusvaiheen 2 osalta oli se, että instrumentointikohteen ratapenkereessä sepelikerroksen paksuus oli merkittävästi otaksuttua tukikerrospaksuutta suurempi. Tästä johtuen asennustasolle Kv – 0,7 m sijoittuvat mittausinstrumentit jouduttiin asentamaan sepelikerroksen sisään, vaikka tätä oli materiaalin karkearakeisuuden vuoksi ennakkoon pidetty mittauksien luotettavan toiminnan kannalta mahdottomana tilanteena. Koska tarvittavat mittausinstrumentit kuitenkin oli jo hankittu ja mahdollisuudet ratapenkereen mekaanisen toiminnan mallinnuksen tarkistamiseen kokonaan ilman penkereen yläosasta saatavaa mittaustietoa olisivat merkittävästi heikentyneet, päätettiin mittausinstrumentit kaikesta huolimatta asentaa alun perin suunnitellulle asennussyvyydelle.

Myös asennettavien mittausinstrumenttien lukumäärän suhteen asennustasolla Kv – 0,7 m toimittiin laaditun instrumentointisuunnitelman mukaisesti lukuun ottamatta sitä seikkaa, että mainitulle syvyydelle asennettiin kummankin kiskon alapuolelle myös yksi vaakasuuntainen venymämittausanturi. Näiden asennusten tarkoituksena oli kerätä lisää kokemusta kehitetyn anturityypin soveltuvuudesta erilaisiin asennus- ja mittaolosuhteisiin, vaikkakin mittausten onnistumiseen tämän nimenomaisen materiaalin tapauksessa oli syytä suhteutua varsin varauksellisesti.

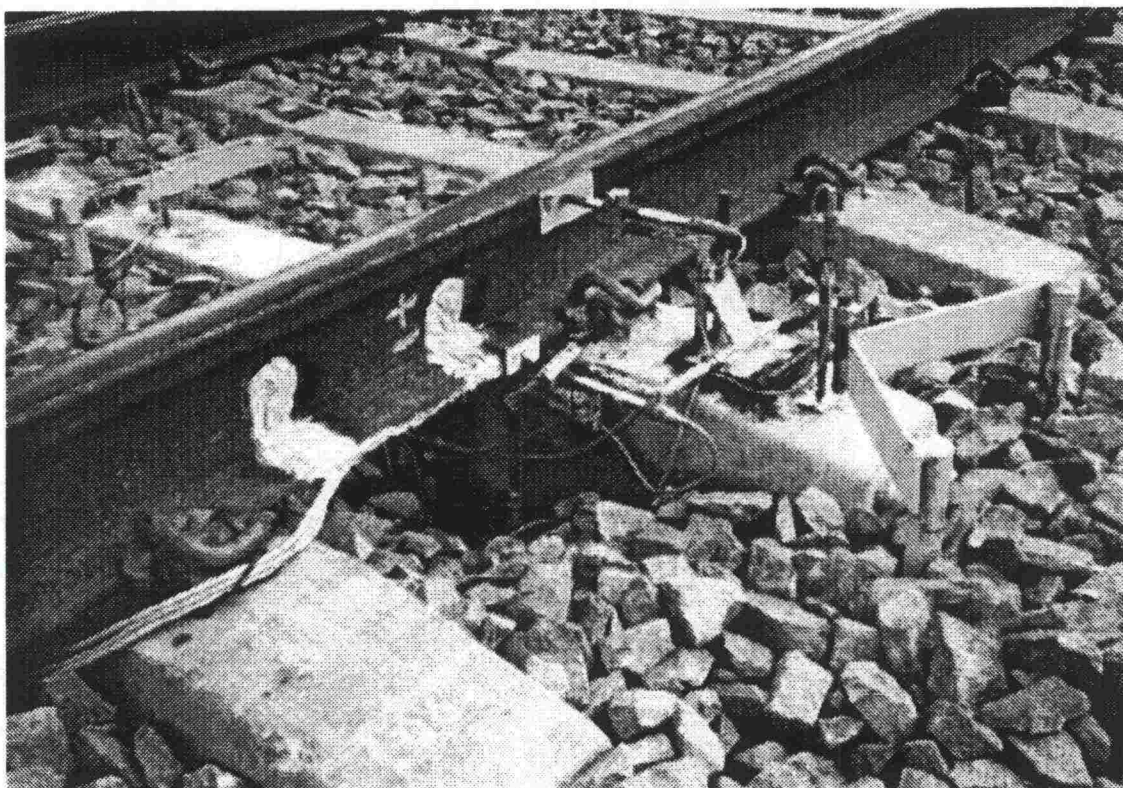
2.4 Asennusvaihe 3

2.4.1 Asennusten toteutustapa

Raiteen instrumentointi toteutettiin hyvinkin tarkoin suunnitelman mukaisesti (kuva 2.4:1). Tätä edesauttoi se, että TKK:n Lujuusopin laboratoriollla oli kokemusta samantapaisista mittauksista. Koska sääolosuhteet olivat suotuisat, riitti asennustöille varattu aika niinkään sopivasti.

Suunnitelman mukaiset venymäliuska-asennukset tehtiin syanoakrylaattiliimaa (Kyowa CC-33A) käyttäen kumpaankin kiskoon samalla tavalla pölkkyvälin keski- ja kolmannesleikkauksiin. Liuska-asennukset suojattiin Sikaflex-massalla. Ratapölkkyyn liimattiin 3 liuskaa. Yksi pölkyn yläpinnalle keskelle ja yksi kummankin kiskon kohdalle pölkyn sivupintaan lähelle yläreunaa. Pölkyn pinta kyllästettiin liimauskohdissa useampaan kertaan kyseisellä syanoakrylaattiliimalla, ja pinta hiottiin kuivumisen jälkeen. Pölkkyyn liimatut liuskat täydennettiin mittauksia varten puolisolloiksi passiivisilla venymäliuskoilla.

Siirtymäantureita varten oli tehty tarkoitukseen sopivat teräksiset kiinnityselimet, jotka liimattiin pikaepoksiliimalla pölkkyyn. Pölkyn liikettä mittaavia antureita varten hitsattiin kiinnikkeet maahan upotettuihin pystyteräksiin.



Kuva 2.4:1 Raiteen instrumentointia valmiiksi asennettuna.

2.4.2 Asennetut mittausinstrumentit

Suurin osa kiskoihin asennetuista venymäliuskoista oli tyyppiä Kyowa KFW-5-120-D16-11L1M2S ('T-liuska'). Näissä liuskoissa on kaksi mittahilaa, joiden pituus on 5mm ja mittaussuuntien välinen kulma 90 astetta. Pystyvoiman mittaamiseen käytetyt, kiskon uumaan asennetut yksittäisliuskat olivat saman valmistajan tyyppiä KFW-5-120-C1-11L1M2R. Kumpaankin mainituista liuskatyypeistä on integroitu taipuisa muovilevyn kappale perussuojaksi sekä ohut muovipäällysteinen parikaapeli kytkentöjä helpottamaan. Liuskat on lämpötilasovitettu teräkselle. Pölkkyyn asennettujen yksittäisliuskojen mittapituus oli 70mm ja tyyppi Kyowa KC-70-A1-11.

Kiskon ja pölkyn liikkeiden mittaamiseen käytetyt induktiiviset anturit olivat kaikki tyyppiä HBM W10TK. Niiden putkimaisen runko-osan sisällä aksiaalisesti liikkuva kara on jousipalautteinen. Radalla tehdyistä aikaisemmista mittauksista saatujen kokemusten perusteella jousivoimaa oli kasvatettu ulkoisen lisäjousen avulla, jotta anturi kykenisi paremmin seuraamaan ratarakenteissa esiintyviä hyvinkin äkäisiä liikkeitä. Anturikaapelina käytettiin kaikissa tapauksissa muovipäällysteistä punosrakenteisella suojasukalla varustettua $4 \times 0,5 \text{ mm}^2$ kaapelia.

2.4.3 Poikkeamat instrumentointisuunnitelmasta

Mitään varsinaisia poikkeamia suunnitelmasta ei tapahtunut. Voidaan kuitenkin mainita, että kiskon jalan ja pölkyn välistä pystyliikettä mittaavat anturit kiinnitettiin toisena olleen vaihtoehdon mukaisesti kiskon alle mahdollisimman lähelle pölkkyä.

3 MITTAUSTEN TOTEUTUS

3.1 Mittausajankohta ja mitattu liikenne

Mittaukset Korian ja Kouvolan välisillä rataosuudella sijainneissa instrumentointikohteessa tehtiin 6.7.1999 kello 14.30 ja 8.7.1999 kello 12.00 välisenä aikana. Näiden ajankohtien välillä mittauksia tehtiin yhtäjaksoisesti vuorokauden ympäri kaikesta instrumentointikohteen kautta idästä länteen päin kulkeneesta liikenteestä lukuun ottamatta 7.7.1999 kello 16.00 – 18.00 välistä ajanjaksoa, jonka aikana ratapengertä kavennettiin edellä kappaleessa 2.2.3 ja kuvassa 2.2:7 esitetyllä tavalla.

Mittausjakson aikana instrumentointikohteen yli kulki liikennettä taulukon 3.1:1 mukaisesti. Kuten taulukosta 3.1:1 ilmenee, mittauspaikan ohitti 10 kertaa myös nimenomaisesti instrumentointikohteesta tehtäviä mittauksia varten varustettu koejuna, jonka kokoonpano oli Dv12 2545 + Rbnqss-vaunu 75140-4 (kuva 3.1:1). Koejunassa oli siis dieselveturin lisäksi yksi neliakselinen vaunu, jonka kaikille akseleille akseli-kuormaksi oli mahdollisimman tarkoin pyritty asettamaan 250 kN. Pöytäkirja koejunan punnituksesta samoin kuin yksityiskohtaisempi erittely mittauskohteen yli kulkeneesta muusta liikenteestä on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 3.1:1. Yhteenveto instrumentointikohteen yli kulkeneesta liikenteestä.

Junan tyyppi ja kulkusuunta	Mitattujen ylitysten lukumäärä
Koejuna, jossa 4 kpl 250 kN akseleita (Koria - Kouvola)	5
Koejuna, jossa 4 kpl 250 kN akseleita (Kouvola - Koria)	5
Säiliöjuna (Kouvola - Koria)	10
Muu tavarajuna (Kouvola - Koria)	20
Pikajuna (Kouvola - Koria)	30
Muu henkilöjuna (Kouvola - Koria)	5
Työkone (Kouvola - Koria)	1



Kuva 3.1:1 Koejuna, jonka vaunussa neljä 250 kN suuruista akselipainoa.

3.2 Mittausjärjestelyt

3.2.1 Raiteesta tehdyt mittaukset

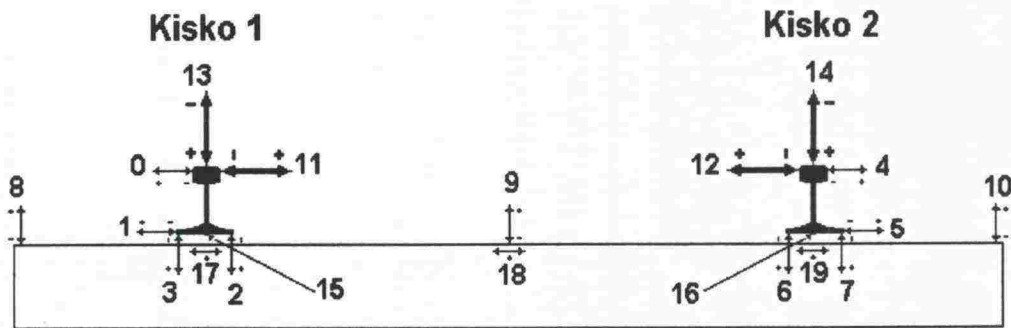
Teknillisen korkeakoulun Lujuusopin laboratorion toimesta mitattiin molemmista kiskoista pyöräkuorman pysty- ja vaakakomponentti (=Y-voima). Mittauksessa käytettiin hyväksi pölkkyvälin keskellä vaikuttavan voiman kiskoon synnyttämiä leikkausmuodonmuutoksia. Venymäliuskasillat kalibroitiin hydraulisyylinterin, voima-anturin ja kiskoon kiinnitettävän kuormituskehän avulla. Kalibroitu voima-alue oli pystysuunnassa 0-170kN ja vaakasuunnassa 0-70kN. Vahvistimien nimellisiksi mitta-alueiksi oli valittu 200kN ja 100kN. Venymäliuskoja käytettiin lisäksi mittaamaan kummastakin kiskosta jalan alapinnan venymä pölkkyvälin keskikohdalta sekä pölkyn taivutusmuodonmuutosta kolmesta pisteestä.

Siirtymäantureilla mitattiin kummastakin kiskosta pölkyn suhteen jalan pystysiirtymää sekä jalan ja hamaran vaakasiirtymää. Jalan pystysiirtymän mittaamiseen käytettiin kahta anturia, jotka oli sijoitettu jalan reunojen tuntumaan. Pölkyn pystysiirtymä maaperän suhteen mitattiin pölkyn keskileikkaukseen ja päihin sijoitetuilla antureilla.

Venymäliuskasillat oli kytketty HBM3073- ja siirtymäanturit HBM MC55-vahvistimiin. Anturisignaalit tasapainotettiin ennen mittausten alkua, jolloin vahvistimien ulostulo oli nolla. Mittausten välillä ulostuloja tarkkailtiin, ja havaitut tasomuutokset korjattiin muista paitsi kiskon jalan alapinnan venymäsignaalista.

Volttitasolle vahvistetut anturisygnaalit johdettiin edelleen rekisteröintilaitteisiin eli tiedonkeruukortilla varustettuun PC-koneeseen ja kahteen Teac RD-145T DAT-nauhuriin. DAP1200E/6-tiedonkeruukortin näytteenottotaajuudeksi asetettiin 10kHz. Koska kanavia oli tiedonkeruussa mukana yhteensä 24, saatiin kustakin signaalista näyte 2,4 millisekunnin välein. Näytteet tallennettiin PC:n junakohtaiseen levytiedostoon. Rekisteröinti käynnistettiin ja pysäytettiin manuaalisesti. Signaalit rekisteröitiin varmuuden vuoksi myös edellä mainituilla 16-kanavaisilla nauhureilla. Niissä näytteenottotaajuus oli 6-kertainen edelliseen verrattuna.

Yhteenvedo raiteesta mitatuista suureista, näiden merkkisäännöistä ja vastaavista tiedonkeruun kanavanumeroista on esitetty kuvassa 3.2:1 ja taulukossa 3.2:1.



Kuva 3.2:1 Raiteesta mitatut suureet. Numerot viittaavat tiedonkeruun kanavanumerointiin, joka on esitetty taulukossa 3.2:1.

Taulukko 3.2:1 Raiteesta mitatut suureet ja tiedonkeruun kanavanumerot.

Kanavan numero	Mitattu suure
0	Kiskon 1 hamaran vaakasuora siirtymä pölkyn suhteen
1	Kiskon 1 jalan vaakasuora siirtymä pölkyn suhteen
2	Kiskon 1 jalan sisäreunan pystysuora siirtymä pölkyn suhteen
3	Kiskon 1 jalan ulkoreunan pystysuora siirtymä pölkyn suhteen
4	Kiskon 2 hamaran vaakasuora siirtymä pölkyn suhteen
5	Kiskon 2 jalan vaakasuora siirtymä pölkyn suhteen
6	Kiskon 2 jalan sisäreunan pystysuora siirtymä pölkyn suhteen
7	Kiskon 2 jalan ulkoreunan pystysuora siirtymä pölkyn suhteen
8	Pölkyn painuma kiskon 1 puoleisessa päässä
9	Pölkyn keskikohdan painuma
10	Pölkyn painuma kiskon 2 puoleisessa päässä
11	Pyöräkuorman horisontaalikomponentti kiskossa 1
12	Pyöräkuorman horisontaalikomponentti kiskossa 2
13	Pyöräkuorman vertikaalikomponentti kiskossa 1
14	Pyöräkuorman vertikaalikomponentti kiskossa 2
15	Venymä kiskon 1 jalan alapinnassa pölkkyvälin keskellä
16	Venymä kiskon 2 jalan alapinnassa pölkkyvälin keskellä
17	Pölkyn yläreunan venymä kiskon 1 kohdalla
18	Pölkyn yläpinnan venymä keskileikkauksessa
19	Pölkyn yläreunan venymä kiskon 2 kohdalla
20 - 23	TTKK:n paineantureita

3.2.2 Ratapenkereestä tehdyt mittaukset

Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratorion vastuulla olleet mittaukset käsittivät ratapenkereen sisältä kolmelta eri syvyystasolta tehdyt venymämittaukset ja kahdelta eri syvyystasolta tehdyt maanpainemittaukset. Lisäksi mittausjakson alussa ja lopussa rekisteröitiin ratapenkereen lämpötilaa ja kosteuspitoisuutta mittaavien antureiden lukemat.

Koska kaikki asennetut venymämittausturit yhtä lukuun ottamatta – vaakasuuntaan syvyystasolle Kv – 0,7 m asennettu anturi numero 18 – näyttivät mittausjakson alussa olevan ainakin periaatteessa toimintakuntoisia ja mittausalueensa sisällä, oli rekisteröitävien venymäantureiden kokonaismäärä 15 kappaletta. Näistä 10 mittasi ratapenkereen pystysuuntaista venymää ja viisi vaakasuuntaista venymää. Tämän lisäksi penkereessä oli syvyystasoille Kv – 0,7 m ja Kv – 1,3 m asennettuna yhteensä neljä pystysuuntaisen maanpaineen mittausturua, joita venymäantureiden tavoin rekisteröitiin mittausten aikana tihein aikaväleihin.

Tiedonkeruulaitteistona venymäantureiden rekisteröinnissä käytettiin TTKK:n geotekniikan laboratorion käytössä olevaa 16-kanavaista 12 bitin Computerscope A/D-muunninkorttia, jonka suurin näytteenottotaajuus yhden kanavan mittauksessa on 1 MHz. Instrumentointikohteesta tehtyjen mittausten yhteydessä näytteenottotaajuutena käytettiin kuitenkin vain 1 kHz kutakin mittauskanavaa kohti. Computerscope-laitteiston rajoitetun mittauskanavamäärän vuoksi ratapenkereeseen asennettujen paineantureiden rekisteröinti oli kytketty TTKK:n lujuusopin laboratorion instrumentointikohteelle tuomaan tiedonkeruulaitteistoon (kappale 3.2.1).

Koska Computerscope-tiedonkeruulaitteisto käyttää kaksi muistitavua yhden binäärimuotoon tallennettavan mittaushavainnon esittämiseen, kertyi 15 venymämittauskanavan tiedonkeruusta 1 kHz näytteenottotaajuutta käytettäessä noin 30 kilotavua mittausdataa yhtä mittaussekuntia kohti. Kun lisäksi otetaan huomioon, että mittaus käynnistettiin manuaalisesti muutamaa sekuntia ennen junan saapumista instrumentointikohteen päälle, vaihteli yhtä junaa kohden tallennetun mittausdatan määrä junan pituudesta riippuen noin 200 kilotavun ja 1,5 megatavun välillä. Koko mittausjakson aikana tallennetun mittaustiedon yhteismääräksi venymämittausten osalta muodostui näin ollen noin 50 megatavua.

3.2.3 Tärinä- ja nopeusmittaukset

Tärinämittaukset toteutettiin Koriolla 7.-9. heinäkuuta 1999 muiden tässä raportissa kuvattujen mittausten yhteydessä. Mittauksista vastasivat yhteistyössä Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulun yrityspalvelu ja Teknillisen korkeakoulun tielaboratorio (TKK/TIE). Mittauksissa käytetyt tärinäanturit asensi Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulun yrityspalvelu ja tämän raportin tärinäosuudet valmisti TKK/TIE. Antureita oli yhteensä kolme kappaletta ja ne asennettiin maaperään kohtisuoraan rataan nähden eri etäisyyksille. Tarkemmin anturien sijainti ja koejärjestely kuvataan luvussa 8.

Tärinämittausten lisäksi TKK/TIE vastasi kaikkien junien nopeuksien tutkimuksista, junien tyyppien ja kulkuaikojen muistiin kirjaamisesta sekä valoisana aikana instrumentointikohteen kautta kulkeneiden junien videokuvauksesta.

4 MALLINNUKSEN LÄHTÖTIEDOT

4.1 Raiteen ominaisuudet

Kouvolan-Korian rataosuudelle oli perusparannustyön yhteydessä vanha raiderakenne täysin uusittu. Uusi rakenne oli toteutettu käyttäen BP89-betoniratapölkkyjä ja 60E1-kiskoja. BP89-pölkkyt varustetaan valmistuksen yhteydessä Pandrol-jousikiinnittimin, joihin kisko asennetaan käyttäen Pandrol e1817-tyyppistä joustaa. Kiskon alla on Teknikumin valmistama kuminen P-välilevy. Lisäksi rakenteeseen kuuluu kiskonkiinnittimen yhteyteen asennettava P-eristin, millä aikaansaadaan galvaaninen eristys jousikiinnikkeen ja kiskon välille.

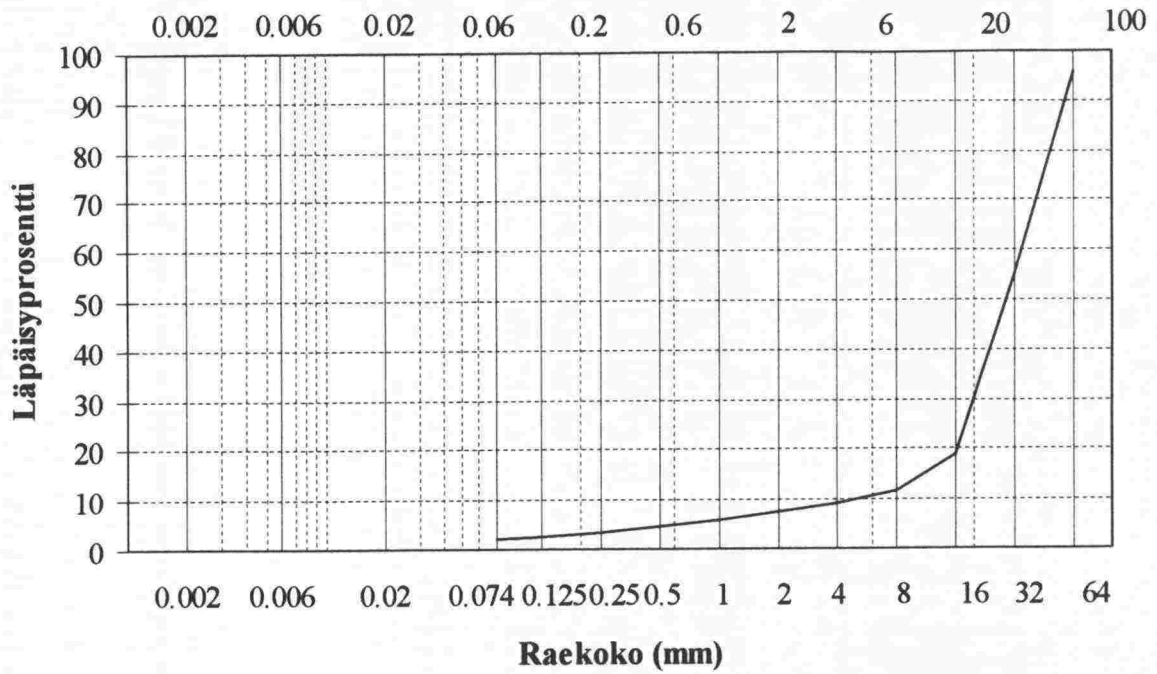
4.2 Ratapenkereen ominaisuudet

4.2.1 Ratapenkereen mitat

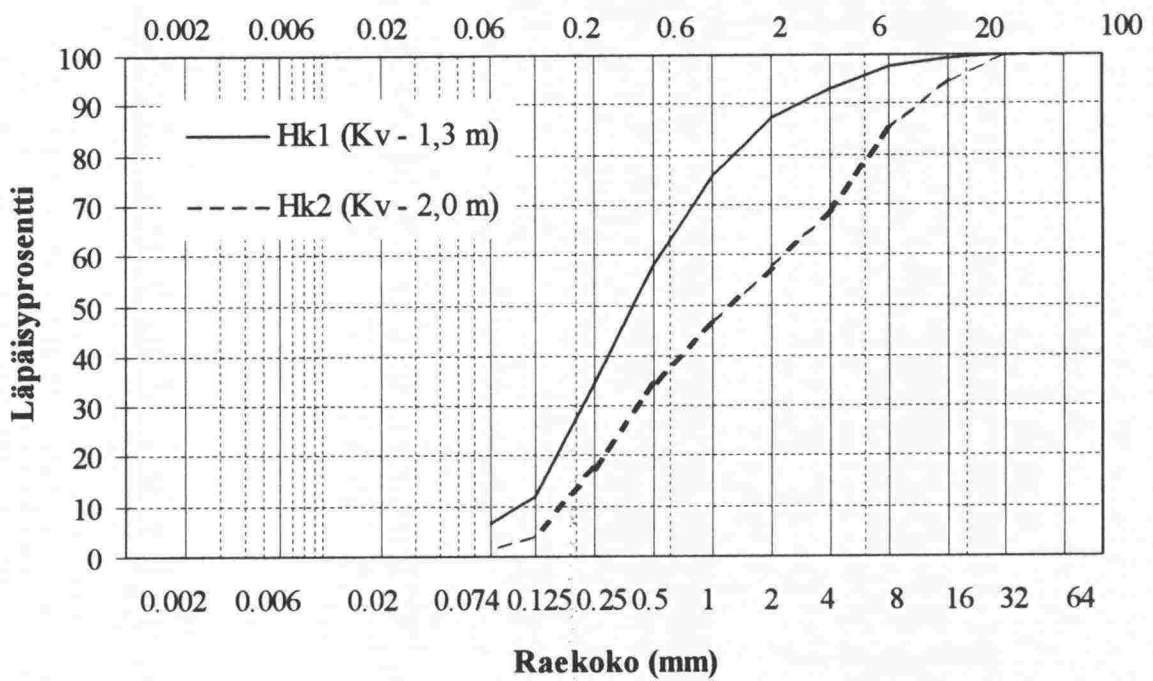
Mittausten yhteydessä instrumentointikohteen ratapenkereen leveydessä todettua poikkeamaa ratojen normaalipoikkileikkausten mukaisesta pengerialueesta käsiteltiin jo edellä kappaleessa 2.2.3. Koska pengerialuetta muutettiin instrumentointikohteen lähiympäristössä mitausten kuluessa, edustavat ensimmäisen mittausvuorokauden aikana saadut tulokset leveydeltään noin 0,75 m suurempaa toispuolista pengerialuetta kuin jälkimmäisen mittausvuorokauden aikana saadut tulokset (kuva 2.2:7). Kaikki akselipainoltaan 250 kN olevan koejunan ylitykset tapahtuivat kuitenkin ajankohtana, jolloin pengerialuetta instrumentointikohteen kohdalla oli jo kavennettu.

4.2.2 Penger materiaalien rakeisuusjakautumat

Mittausinstrumenttien asentamisen yhteydessä otettujen näytteiden perusteella määritetyt radan rakennekerros materiaalien rakeisuusjakautumat on esitetty seulomattoman sepelikerroksen osalta kuvassa 4.2:1 ja sepelikerroksen alla sijainneen hiekan sekä tämän alla sijainneen soraisen hiekan osalta kuvassa 4.2:2. Näistä sepelikerroksesta otetulla näytteellä saadun tuloksen edustavuus voidaan kuvan 4.2:1 perusteella asettaa jossain määrin epäilyksenalaiseksi, koska sen mukaan kyseinen sepelinäyte olisi ollut selvästi puhdistusrajan alapuolella, mikä ilmeisesti ei kuitenkaan ollut rataosan tukikerroksen todellinen tilanne.



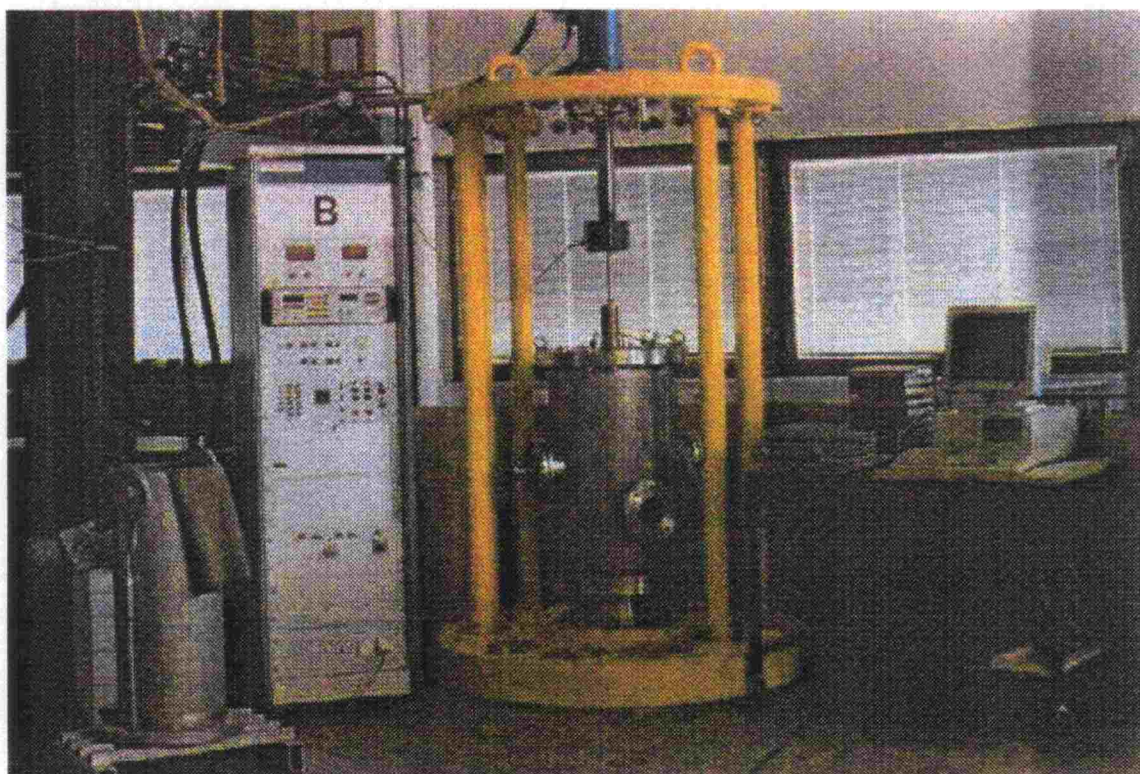
Kuva 4.2:1. Sepelikerroksen rakeisuusjakautuma ennen seulontaa.



Kuva 4.2:2. Ratapenkereen hiekan ja soraisen hiekan rakeisuusjakautumat.

4.2.3 Penger materiaalien mekaaniset ominaisuudet

Syksyn 1999 aikana tehtävien alustavien mallinnustarkastelujen tarpeisiin ratapenkereen rakennekerrosmateriaaleille oli ohjelmoitu tehtäväksi niiden palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä jännitystasosta riippuvana kuvaavien moduularvojen määrittäminen. Koemenetelmänä tähän käytettiin syklistä kolmiaksaalikoetta ja kokeet tehtiin TTKK:n geotekniikan laboratorion käytössä olevaa suurimittakaavaisella kolmiaksaalilaitteistolla (kuva 4.2:3).



Kuva 4.2:3. TTKK:n geotekniikan laboratorion syklinen kolmiaksaalilaitteisto.

Koemenetelmänä käytettiin amerikkalaista SHRP (Strategic Highway Research Program) protocol P46:n mukaista kuormitustapasuositusta (AASHTO T 294-92 I). Koska kyseinen kuormitussarja koostuu 15 erilaisella sellipaineen ja aksiaalisen kuormituspulssin yhdistelmällä tehtävästä osasta, saadaan sen tuloksena 15 erilaista jännitysyhdistelmää vastaavaa nk. resilient-moduulin arvoa. Sepelikerroksen alapuolella olleen hiekkakerroksen ja tämän alla olleen sorakerroksen materiaaleille näin saadut moduularvot on esitetty liitteessä 2.

Jotta moduularvojen riippuvuus jännitystasosta olisi käytännön mallinnustarkasteluissa mahdollista ottaa huomioon, tulee materiaalin mitattu käyttäytyminen pystyä esittämään jonkin sopivan materiaalimallin avulla. Lineaarisen kerrosrakennemallin avulla tehtävien mallinnustarkastelujen (luku 6) tarpeisiin edellä kuvattujen moduularvojen

riippuvuutta jännitystasosta on tässä yhteydessä kuvattu kaavan 4.2:1 mukaisella nk. $k\theta$ -mallilla:

$$M_r = k_1 \theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_2} \quad (4.2:1)$$

missä,

- M_r on resilient-moduuli
 θ on pääjännitysten summa kuormituksen ollessa maksimiarvossaan,
 $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$
 θ_0 on vertailujännitys 100 kPa
 k_1 on materiaaliparametri ('moduuliluku')
 k_2 on materiaaliparametri ('jännitysekspONENTTI')

Kun kaavan 4.2:1 materiaaliparametrit k_1 ja k_2 on sovitettu erikseen liitteen 2 mukaisiin mittaustuloksiin, on moduuliarvojen jännitystilariippuvuudelle saatu mittaustulosten yhteydessä katkoviivoilla esitetyt kuvaukset. Kuvauksia vastaavat materiaaliparametrien arvot on puolestaan esitetty taulukossa 4.2:1.

Taulukko 4.2:1 Kaavan 4.2:1 mukaiset materiaaliparametrit instrumentointi-kohteen ratapenkereen materiaaleille.

Materiaali	k_1	k_2
Seulottu raidesepeleli	2000	0,50
Seulomaton raidesepeleli	1750	0,50
Hiekka	1635	0,38
Sorainen hiekka	2265	0,50

Instrumentointikohteen sepeleille materiaaliparametrien määrittämiä ei tässä vaiheessa ole tehty kokeellisesti, vaan ne on arvioitu TTKK:n geotekniikan laboratoriossa aikaisemmin rakeisuudeltaan vastaavanlaisille materiaaleille tehtyjen määrittäysten tulosten perusteella (Kolisoja 1997). Syynä tähän on ollut toisaalta se, että yksittäisen näytteen testaus rakeisuudeltaan näin karkealla materiaalilla ei kokemuksen mukaan välttämättä antaisi paljoakaan luotettavampaa tulosta ja toisaalta se, että näytemateriaalia haluttiin säästää myöhemmän vaiheen tarkemmissa mallinnustarkasteluissa mahdollisesti tarpeellisiksi tulevien erityistutkimusten tekemiseen.

Syklisten kolmiakksiaalikoekiden näytteille tehtiin kuormitussarjan lopuksi myös murtotilanteeseen johtaneet staattiset kolmiakksiaalikoeket 50 kPa sellipaineella (liite 2). Kattavampia määrittämiä rakennekerros materiaalien plastista muodonmuutoskäyttäytymistä kuvaavien materiaaliominaisuuksien määrittämiseksi sen paremmin staattisen kuin hyvin lukuisia kertoja toistuvan syklisen kuormituksenkaan alaisena ei koesarjaan tässä vaiheessa kuitenkaan sisällynyt.

4.3 Pohjamaan ominaisuudet

4.3.1 Instrumentointikohteen pohjasuhteet

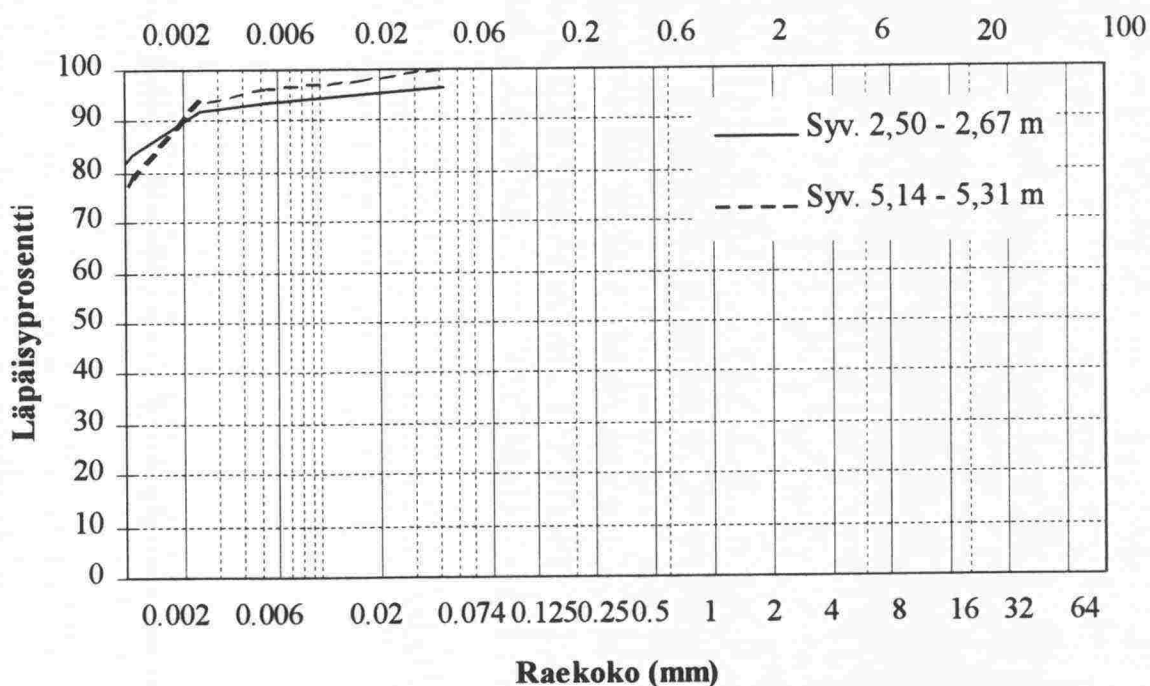
Instrumentointikohteen suunnitteluvaiheessa kohteen pohjasuhteisiin liittyvät tiedot rajoittuivat vuonna 1975 tehtyihin ajojohtimien pylväspaikkatutkimuksiin ja instrumentointikohteesta ratalinjalla noin 750 m Kouvolan suuntaan vuonna 1970 tehtyyn rumpupaikkatutkimukseen. Instrumentointikohteen alueella ja lähiympäristössä nämä painokairausmenetelmällä tehdyt tutkimukset oli kuitenkin lopetettu määräsyyvyyteen enimmillään noin 12 m alkuperäisen maanpinnan tason alapuolelle.

Sekä edellä mainittujen tutkimusten että kohteen maastonmuodoista tehtyjen silmämääräisten havaintojen perusteella oli ennakoitavissa, että instrumentointikohteen alueella esiintyy hienorakeisia maakerroksia. Kerrosten paksuudesta ei käytettävissä olleiden tietojen perusteella kuitenkaan ollut mahdollista varmistua. Niinpä instrumentointikohteen alueella ohjelmoitiin tehtäväksi pohjatutkimus, jonka yhteydessä tehtiin kaksi tiiviiden pohjamaakerrosten pintaan ulottunutta painokairausta. Kairauspisteiden sijainti ja painokairausten yhteydessä havaitut kairausvastukset on esitetty liitteessä 3.

Painumamittausten perusteella tiiviin pohjamaakerroksen etäisyys maanpinnasta on instrumentointikohteen kohdalla noin 22 m ja 27,25 m kohtisuoralla etäisyydellä pohjoisen raiteen keskilinjasta etelään päin noin 18 m.

Pohjatutkimuksen yhteydessä otettiin tutkimuspisteen 1 (liite 3) kohdalta myös häiriintymättömiä maanäytteitä kahdelta näytteenottotasolta. Syvyystasolta 2,50 – 2,84 m otetut näytteet edustivat pohjamaakerroksen pintaosassa noin 4 m matkalla esiintyvää kairausvastukseltaan jonkin verran tiiviimpää maakerrosta. Syvyystasolta 4,97 – 5,48 m otetut näytteet puolestaan edustivat tämän kerroksen alapuolella esiintyvää alhaisemman kairausvastuksen omaavaa maakerrosta.

Edellä mainituilta näytteenottotasoilta otettujen maanäytteiden rakeisuusjakautumat on esitetty kuvassa 4.3:1. Yhteenveto näytteiden muista määritetyistä geoteknisistä ominaisuuksista on esitetty vastaavasti taulukossa 4.3:1.



Kuva 4.3:1 Pohjamaasta otettujen näytteiden rakeisuusjakautumat.

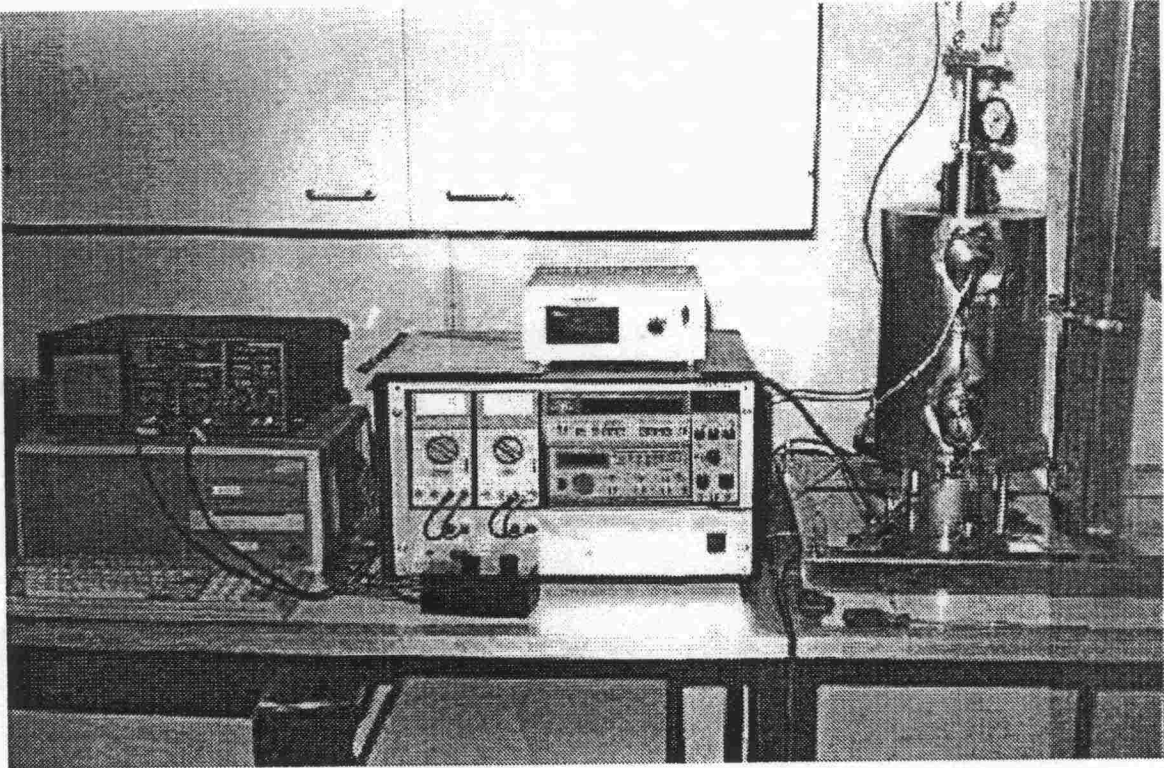
Taulukko 4.3:1 Pohjamaasta otettujen näytteiden geotekniset ominaisuudet.

Ominaisuus ja mittayksikkö	Syvyys 2,50 – 2,67 m	Syvyys 5,14 – 5,31 m
Maalaji	Lihava savi	Lihava savi
Tilavuuspaino [kN/m^3]	15,9	14,2
Vesipitoisuus [%]	66,9	100,4
Humuspitoisuus [%]	1,78	1,38
Kartiolujuus [kPa]	39,2	21,5
Sensitiivisyys	2,35	15,66
Hienousluku	114	86

4.3.2 Pohjamaan mekaaniset ominaisuudet

Täydennyksenä instrumentointi- ja mallinnussuunnitelman yhteydessä ohjelmoituihin laboratoriotutkimuksiin pohjamaasta otetuille häiriintymättömille maanäytteille tehtiin mallinnustarkasteluja palvelevat leikkausmoduulimääritykset. Määritykset tehtiin TTKK:n geotekniikan laboratorion käytössä olevalla yhdistetyllä Resonant Column ja

Bender Element (BERC) –laitteistolla (Souto et al. 1994), jonka valokuva on esitetty kuvassa 4.3:2. Määrittysten tulokset on puolestaan esitetty liitteessä 4.



Kuva 4.3:2 TTKK:n yhdistetty Resonant Column ja Bender Element –laitteisto.

Kuten liitteessä 4 esitetyistä mittaustuloksista ilmenee, vaihtelevat pohjamaamateriaaleille määritetyt leikkausmoduulin G arvot maamateriaaleille luonteenomaisesti sekä määrittelyn yhteydessä vallinneen jännitys- että muodonmuutostason funktiona. Tästä syystä mallinnustarkasteluissa sovellettavien moduuliarvojen valinta edellyttää näiden tekijöiden tuntemista tai otaksumista. Erityisesti luvussa 6 käsiteltävän lineaarisen kerrosrakennemallinnuksen yhteydessä lisäongelmana on vielä se, että pohjamaa on mallinnuksessa käytännössä otaksuttava ominaisuuksiltaan homogeeniseksi puoliavaruudeksi, vaikka sekä jännitys- että muodonmuutostason toisaalta tiedetään muuttuvan jatkuvasti sekä syvyysuuntaan että sivuttaissuuntaan radasta mitatun etäisyyden kasvaessa.

Linearisessa kerrosrakennemallinnuksessa sovellettavaksi pohjamaan leikkausmoduulin arvoksi tehdyillä jännitys- ja muodonmuutostasoa koskevilla otaksumilla arvioitiin $G = 13,3$ MPa. Kun vedellä kyllästyneen maan suljetun tilan Poissonin luvun arvoksi toisaalta tiedetään $\nu = 0,5$, saadaan tästä edelleen kimmoteorian perusyhtälöiden mukaan pohjamaan kimmomodulaarivoksi $E = 40$ MPa. Tämän otaksuman oikeellisuutta arvioidaan jäljempänä luvussa 6 pohjamaan moduuliarvolle tehtävän herkkyytarkastelun perusteella.

4.4 Edustavien mittaustulosten valinta

4.4.1 Mittaukset 250 kN akselipainolla

Instrumentointikohteen yli 10 kertaa kulkeneen koejunan (kuva 3.1:1) ylityksistä yksityiskohtaisempaan tarkasteluun valittiin mittaus numero 64. Tämän mittauksen aikana koejuna ylitti mittauskohteen nimellinopeudella 50 km/h länteen eli Kouvolasta Korian suuntaan. Perusteluina tämän ylityskerran valinnalle oli ennen muuta se, että mainitun mittauksen yhteydessä koejunan nopeus oli alhaisin junan tullessa instrumentointikohteeseen Kouvolan suunnassa ollutta suoraa rataosuutta pitkin. Tämä kulkusuunta taas haluttiin valita siitä syystä, että Korian suunnalta instrumentointikohtetta lähestyessään koejunan keskimääräisissä pyörävoimissa oli pääsääntöisesti jonkin verran eroa sisä- ja ulkokiskon välillä (taulukko 4.4:1).

Taulukko 4.4:1 Koejunan vaunun pyörävoimien ja akselipainon keskiarvot eri nopeuksilla tapahtuneissa instrumentointikohteen ylityksissä.

Mittauksen numero	Junan nopeus [km/h]	Junan kulkusuunta	Pyörävoima1 (ulkokisko) [kN]	Pyörävoima2 (sisäkisko) [kN]	Akselipaino [kN]
62	41	Itään	123,3	127,6	251,0
64	47,5	Länteen	126,1	127,1	253,2
67	61	Itään	113,9	132,0	245,9
68	68	Länteen	127,8	124,8	252,6
70	80,5	Itään	109,7	137,1	246,8
73	89	Länteen	122,7	124,8	247,1
74	98	Itään	117,0	129,6	245,6
75	100	Länteen	124,3	129,2	253,5
78	90 (jarrutus)	Itään	113,3	128,0	241,3

Kuten taulukosta 4.4:1 havaitaan, ei koejunan keskimääräisissä akselipainoissa ole havaittavissa mainittavaa riippuvuutta junan nopeudesta. Syynä tähän on mitä ilmeisimmin se, että instrumentointikohteen kohdalla raide oli uusittu juuri ennen mittausten suoritusajankohtaa ja ainakin silmämääräisesti arvioituna myös koejunan vaunun pyörät näyttivät erittäin hyväkuntoisilta. Vastaavanlainen mittaustulosten riippumattomuus koejunan nopeudesta oli todettavissa myös muiden mitattujen suureiden osalla.

4.4.2 Mittaukset muilla akselipainoilla

Pääpaino tässä raportissa esitetyissä mittaustuloksissa ja niihin liittyvissä tarkasteluissa on ilman muuta ollut koejunan 250 kN akselipainolla tehdyissä mittauksissa. Mittaustulosten suuresta kokonaismäärästä johtuen läheskään kaikkia muita mittaustuloksia ei ole ollut mahdollista yksityiskohtaisesti käsitellä tämän raportin yhteydessä. Taulukossa 4.4:2 on esitetty yhteenveto mittaustapahtumista, joiden osalta muiden mittausten tuloksia on kuitenkin ainakin joiltain osin esitelty. Näiden lisäksi monien muidenkin mittausten tuloksia on mallinnustarkastelujen eri vaiheissa toki tarkasteltu, mutta taulukon mukaiset mittaustapahtumat edustavat lähinnä tyyppiesimerkkejä, jotka ovat esimerkiksi akselipainojen suuruuden tai jakautuman kannalta olleet eri tarkastelutilanteissa esimerkkitapauksiksi soveltuvia.

Taulukko 4.4:2 Koejunan lisäksi yksityiskohtaisempaan tarkasteluun valittuja mittaustapahtumia.

Mittauksen numero	Mittaustapahtuman valintaperuste tai tarkastelun kohteena ollut asia	Kappale
7	Lovipyörän isku	5.1
11	Lyhyehkö säiliöjuna, jossa vaihtelevia akselipainoja	6.10
40	Säiliöjuna, jossa 8-akselisia vaunuja	4.5.1
	Pyöräkuormien jakautuma ja välilevyn rasitukset	5.1, 5.2
46	Kuormitusten jakautuminen peräkkäisille pölkyille	5.6
77	Säiliöjuna, jossa runsaasti raskaita akselipainoja	5.1, 7.5
85	Työkone, jonka akselipainot tavanomaista pienempiä	5.5, 6.10

4.5 Esimerkkejä mittaustuloksista

4.5.1 Raiteesta tehdyt mittaukset

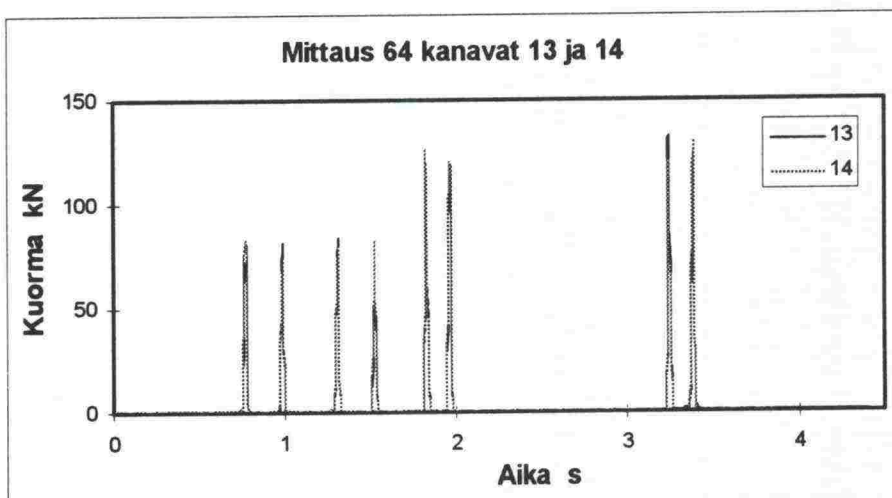
KISKOON KOHDISTUVAT VOIMAT

Pystysuora pyöräkuorma mitattiin kohdan 3.2.1 mukaisesti kiskosta pölkkävälän keskiosalta. Koejunan saavuttua mittaustaikalle ensimmäistä kertaa Kouvolan suunnasta tehtiin staattinen mittaus ajamalla kukin junan akseleista vuorollaan instrumentoidun pölkkävälän keskelle ja pysäytettiin siihen mitta-arvojen kirjaamisen ajaksi. Taulukossa 4.5:1 on esitetty kyseisen staattisen mittauksen tulokset. Kun otetaan huomioon, että vetovoimakiinetyvyyden arvo 60. leveyspiirillä on noin $9,82 \text{ m/s}^2$, saadaan koejunan vaunun massaksi hyvinkin tarkasti 100.000kg eli sama kuin punnituksessa. Tästä voidaan päätellä, että pystysuoran pyöräkuorman mittaamiseen käytetty menetelmä toimi hyvin ainakin staattisessa tilanteessa.

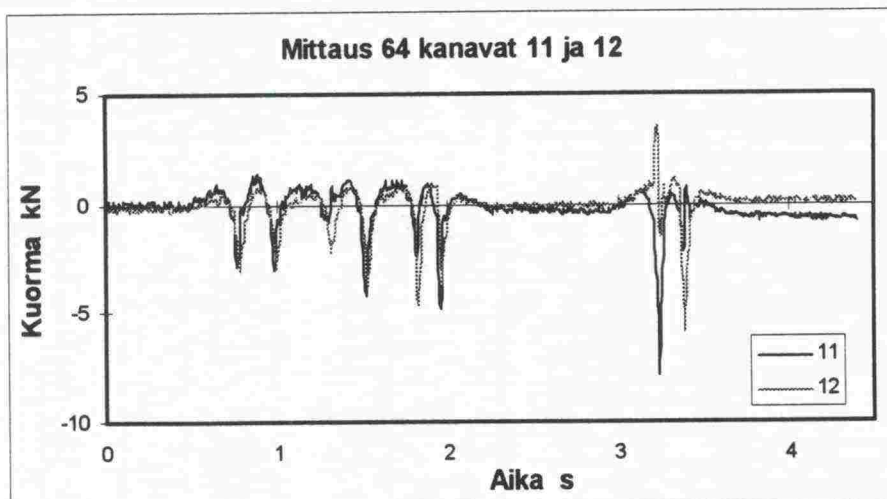
Taulukko 4.5:1 Koejunasta mitatut staattiset pystysuorat pyöräkuormat.

Akselin numero	Vahvistimen ulostulo V		Voima kN		Akseli-paino kN
	kisko 1	kisko 2	kisko 1	kisko 2	
Veturi:					
1	3,640	4,060	72,8	81,2	154,0
2	3,930	4,110	78,6	82,2	160,8
3	3,940	3,752	78,8	75,0	153,8
4	3,620	4,120	72,4	82,4	154,8
Veturin paino					623,4
Vaunu:					
5	6,020	6,060	120,4	121,2	241,6
6	6,023	6,180	120,5	123,6	244,1
7	6,500	6,280	130,0	125,6	255,6
8	5,710	6,300	114,2	126,0	240,2
Vaunun paino					981,5
Junan kokonaispaino					1604,9

Liikkuvan junan ohittaessa instrumentoidun rataleikkauksen saatiin kiskoista rekisteröityä pyöräkuormiin verrannolliset signaalit. Oheisiin kuviin 4.5:1 ja 4.5:2 on esimerkkinä mittauksessa 64 rekisteröidyt signaalit. Tässä mittauksessa koejuna ajoi mittausta paikan ohi nimellinopeudella 50 km/h Kouvolasta Korian suuntaan. Ajan funktiona piirretyissä pystysuoraa pyöräkuormaa kuvaavissa signaaleissa näkyvät piikit syntyvät pyörien ylittäessä polkkyvälin keskikohdan. Piikin huippuarvo edustaa kyseisen pyörän kiskoon synnyttämää hetkellistä kuormaa mainitussa kohdassa. Pyörän synnyttämän vaakasuoran pyöräkuorman hetkellinen arvo saadaan poimittua Y-voimasignaalista samalta ajanhetkeltä. Vaakasuoran pyöräkuorman vaikutussuunta voi olla joko ulos- (signaalin etumerkki negatiivinen) tai sisäänpäin (positiivinen). Kuvissa viitataan mittauksissa käytössä olleisiin kanavanumeroihin, jotka on esitetty taulukossa 3.2:1 ja kuvassa 3.2.1.



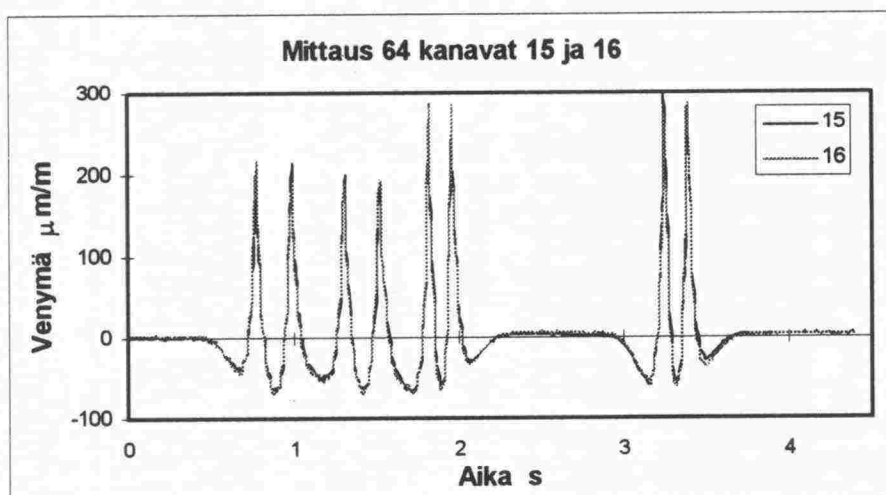
Kuva 4.5:1 Esimerkkitapauksen pystysuorat pyöräkuormat.



Kuva 4.5:2 Pyöräkuormien vaakakomponenttien aikarekisteröinnit.

KISKON ALAPINNAN VENYMÄ

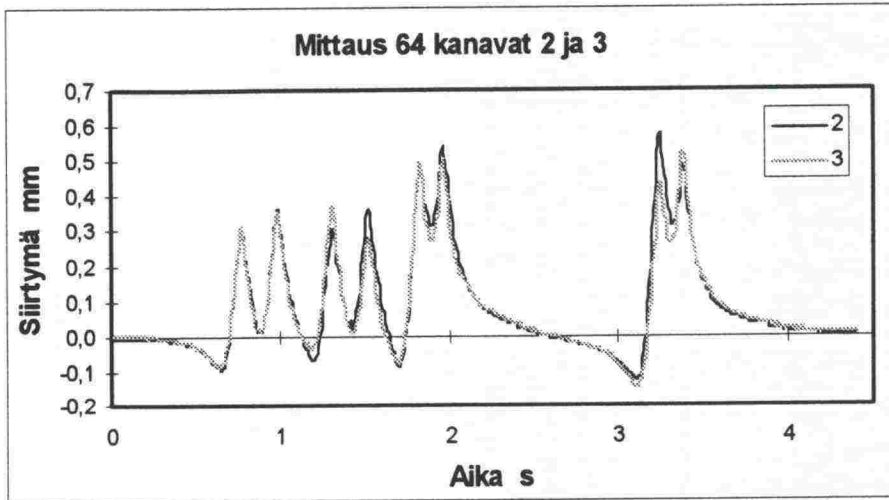
Kuten kuvasta 4.5:3 nähdään, on kiskon jalan alapinnalta rekisteröity venymäsignaali hyvin selkeä terävine huippuineen. Huiput syntyvät pyörän ohittaessa pölkkyvälin keskikohdalla olevan kiskoleikkauksen, johon venymäliuskat oli asennettu. Kiskoon syntyvä taipuma aiheuttaa alapintaan vetojännityksen. Pehmeämuotoisemmat laaksot ovat peräisin kiskon kaareutumisesta mittauskohdassa ylöspäin pyörän ollessa viereisillä pölkkyväleillä. Kiskon jalkaan vaikuttava rasitus on tällöin puristusta.



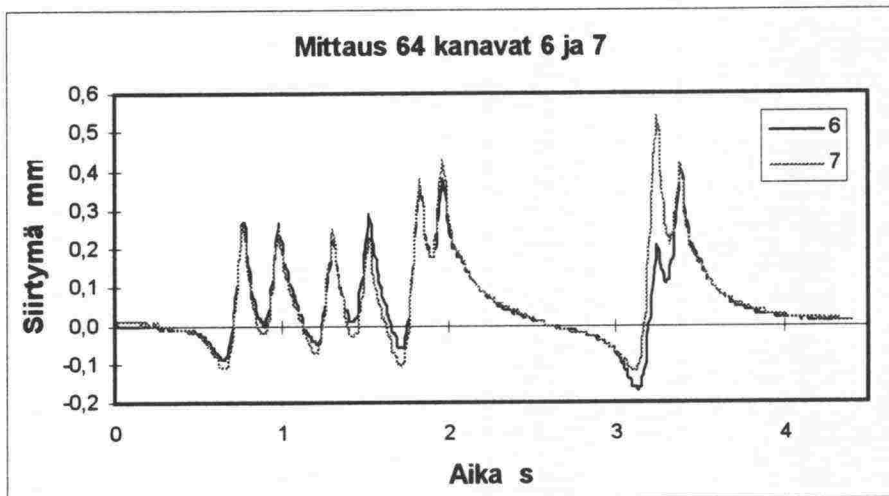
Kuva 4.5:3 Kiskon jalan suurin taivutusmuodonmuutos esimerkkitapauksessa oli 300 $\mu\text{m/m}$ vastaten noin 60 MPa:n jännitystä.

KISKON LIIKE PÖLKYN SUHTEEN

Kiskon jalan pystysiirtymä pölkyn suhteen ajan funktiona esitettynä muistuttaa muodoltaan edellistä, kuten kuvista 4.5:4 ja 4.5:5 nähdään. Kunkin akselin vaikutus erottuu selvästi, vaikka huiput ovatkin hieman pyöreämmät ja laaksot eivät ole yhtä syviä. Positiivinen suunta merkitsee kiskon siirtymää pölkkyä kohti.

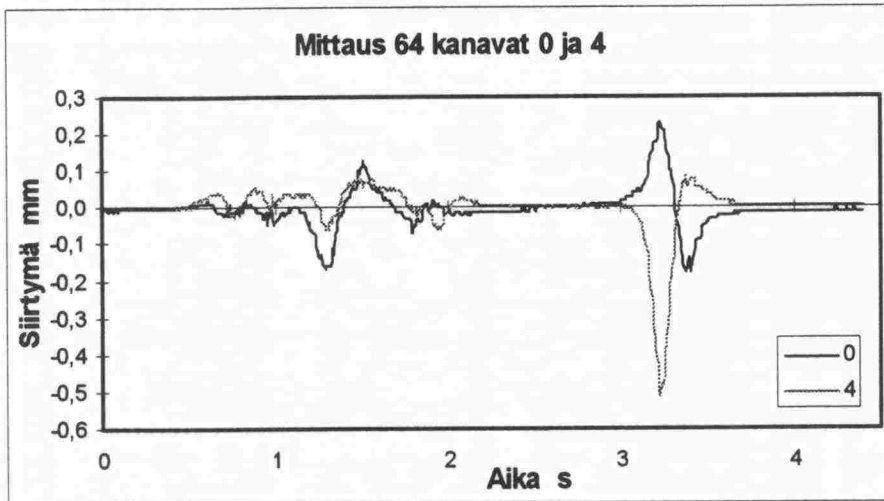


Kuva 4.5:4 Kiskon 1 pystysiirtymä pölkyn suhteen.

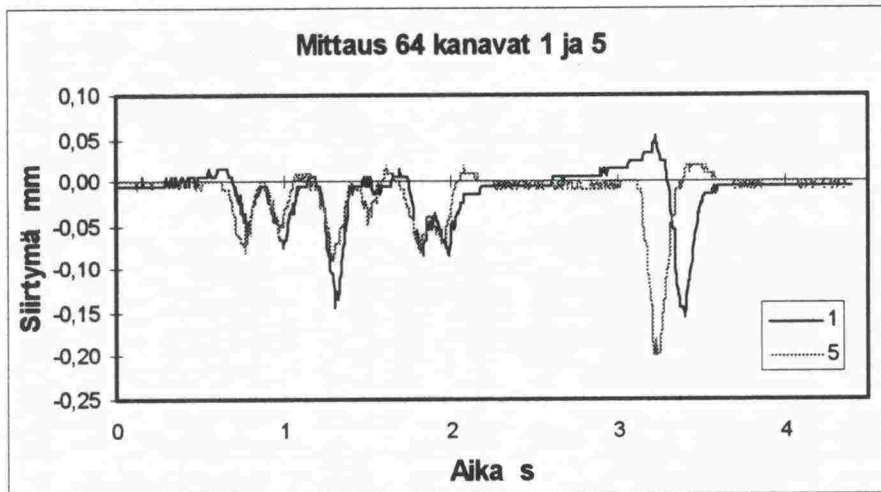


Kuva 4.5:5 Kiskon 2 pystysiirtymä pölkyn suhteen.

Kuvassa 4.5:6 on esitetty kiskon hamaran ja kuvassa 4.5:7 jalan vaakasiirtymä pölkyn suhteen. Varsinkin jalan osalta liike jäi hyvin pieneksi, koska se nojaa suoraan P-eristimen välityksellä pölkyssä olevaan jousikiinnikkeeseen. Vaakasuoran siirtymän positiivinen suunta on raiteesta ulospäin. Hamaran suurin vaakasiirtymä mittauksessa 64 esiintyy kiskossa 2 koejunan vaunun taaemman telin etuakselin synnyttämänä. Kuvaajia vertailemalla nähdään, että kisko on kallistunut sisäänpäin.



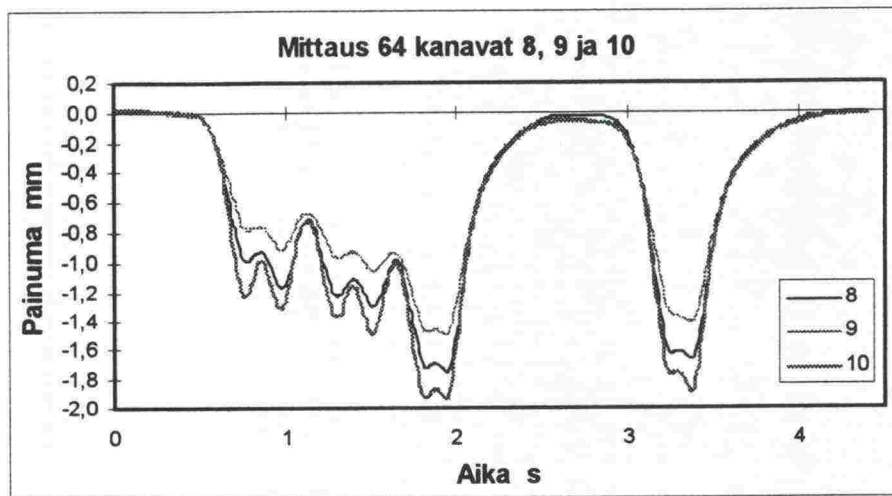
Kuva 4.5:6 Kiskon 1 ja 2 hamaran vaakasiirtymä pölkyn suhteen esimerkkitapauksessa.



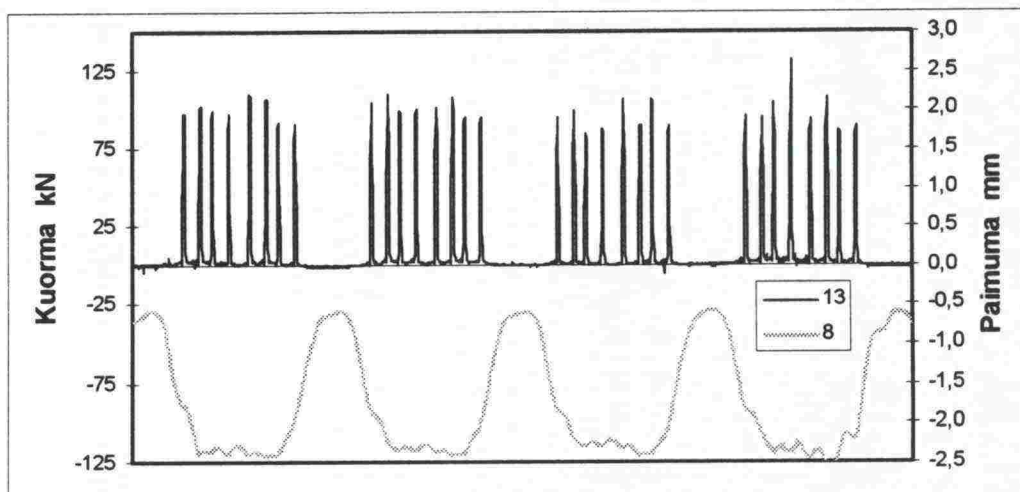
Kuva 4.5:7 Kiskon 1 ja 2 jalan vaakasiirtymä pölkyn suhteen esimerkkitapauksessa.

Pölkyn pystysuuntainen siirtymä

Pölkyn pystysiirtymää maaperän suhteen eli lyhyesti ilmaistuna pölkyn painumaa mitattiin kolmella anturilla. Näistä antureista mittauksessa 64 rekisteröidyt signaalit on piirretty samaan kuvaan 4.5:8. Signaaleista näkyy mm., että pölkyn painumat eroavat toisistaan päissä ja keskellä, ja että telien vaikutus on hallitseva verrattuna yksittäiseen akseliin. Erikoisen selvästi viimeksi mainittu käy ilmi kuvasta 4.5:9, johon on piirretty näyte mittauksessa 40 rekisteröidystä pystysuorasta pyöräkuormasta ja vastaavasta pölkyn pään painumasta. Kysymyksessä on 8-akseliset säiliövaunut, joiden synnyttämä painuma pienenee hetkellisesti vain vaunun keskiosan ohittaessa mittauskohdan.

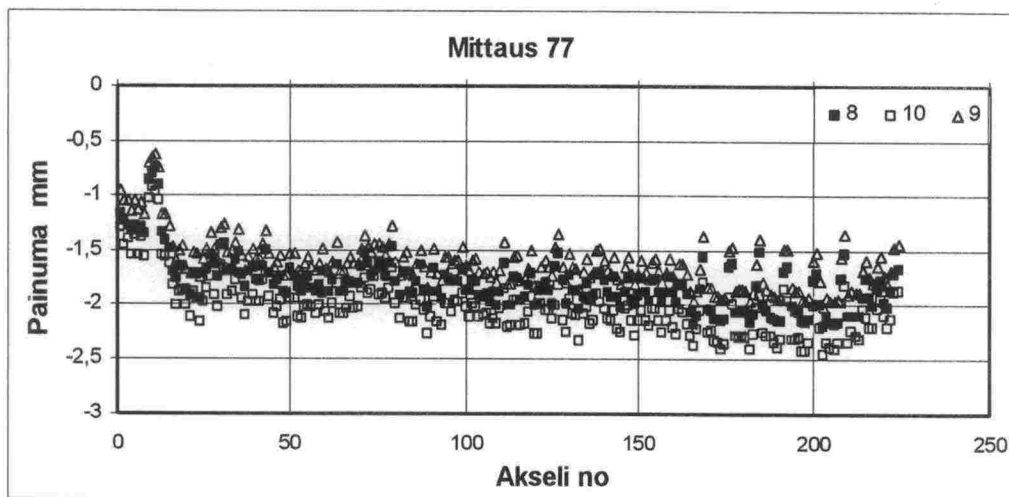


Kuva 4.5:8 Koejunan synnyttämät pölkyn painumat.



Kuva 4.5:9 Pölkyn pään painuma 8-akselisten säiliövaunujen alla.

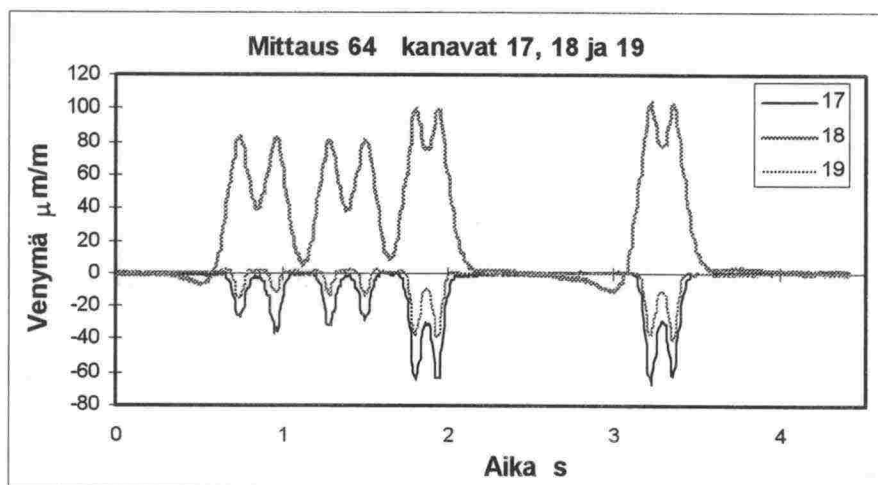
Pitkän junan ylittäessä mittauskohdan oli havaittavissa, että maaperään syntyi hitaasti palautuva muodonmuutos. Tähän viittaa esimerkiksi kuvan 4.5:10 mitta-arvoissa näkyvä painuman kasvava trendi. Mitään pidempiaikaista pysyvää painumaa ei kuitenkaan syntynyt. Se olisi ollut havaittavissa mittalaitteiden 0-tason siirtymänä.



Kuva 4.5:10 Pölkystä rekisteröidyt akselikohtaiset maksimipainumat. Säiliövaunuista koostuvassa junassa oli kaksi veturia ja nopeutena 59 km/h.

Pölkyn venymät

Pölkkyyn asennetuista venymäliuskoista rekisteröidyt signaalit on esitetty kuvassa 4.5:11. Ne muistuttavat muodoltaan lähinnä pölkyn painumasta piirrettyjä kuvaajia, joskin telien eri akselit erottuvat selvemmin. Suurin venymä mitattiin pölkyn keskileikkauksesta.



Kuva 4.5:11 Pölkystä rekisteröidyt venymät esimerkkitapauksessa.

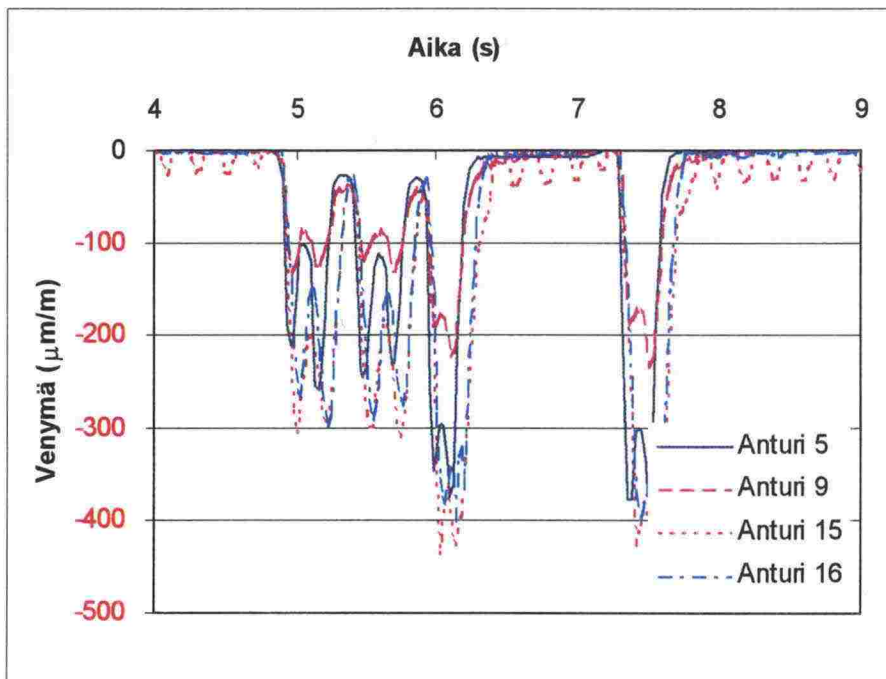
4.5.2 Ratapenkereestä tehdyt mittaukset

Pystysuuntaiset venymät

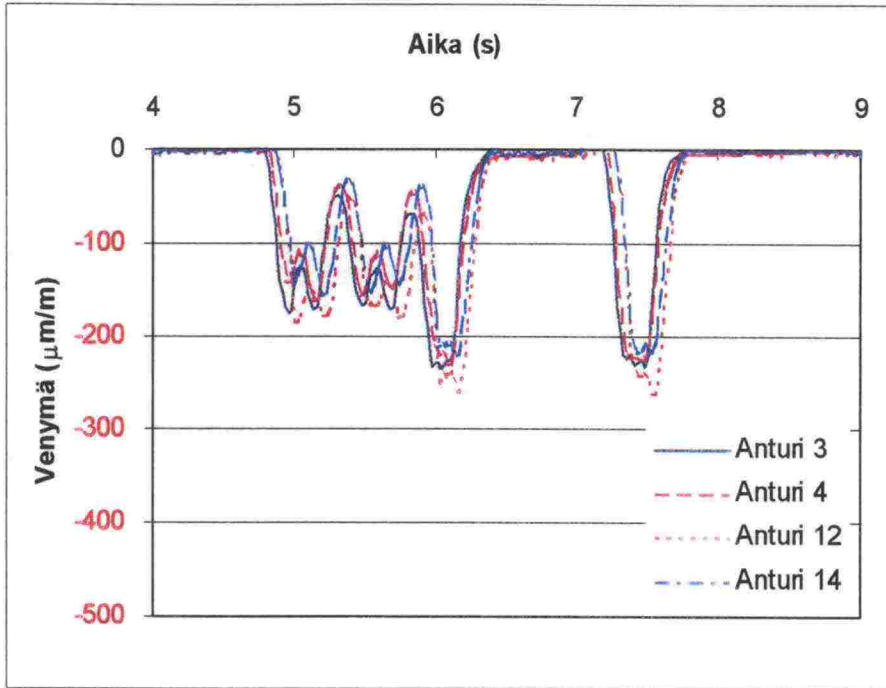
Ratapenkereen osalta meneillään olevan analysointivaiheen keskeisimpänä tehtävänä oli ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden mallinnus, jossa tärkeimpinä vertailusuureina olivat rakennekerrosten pystysuuntaiset venymät. Niitä mitattiin kolmelta eri syvyystasolta ratapenkereestä. Kahdella ylimmällä mittaustasolla rinnakkaisia venymäantureita oli neljä kappaletta eli kaksi kummankin kiskon alapuolella, mutta alimmalla mittaustasolla rinnakkaisia antureita oli vain kaksi kappaletta (kuvat 2.2:6, 2.2:7 ja 2.3:1). Mittauksen numero 64 yhteydessä näillä rekisteröidyt venymäsignaalit on esitetty kuvissa 4.5:12 – 4.5:14.

Tavanomaisesta geotekniikan käytännöstä poiketen kaikissa jäljempänä esitettävissä tarkasteluissa merkisääntönä on myös ratapenkereen osalta pidetty sitä, että venymät ja vetojännitykset esitetään positiivisina sekä kokoonpuristumat ja puristavat jännitykset vastaavasti negatiivisina. Näin esitetyt tulokset ovat suoraan yhteismitallisia raiteesta tehtyjen mittausten tulosten kanssa.

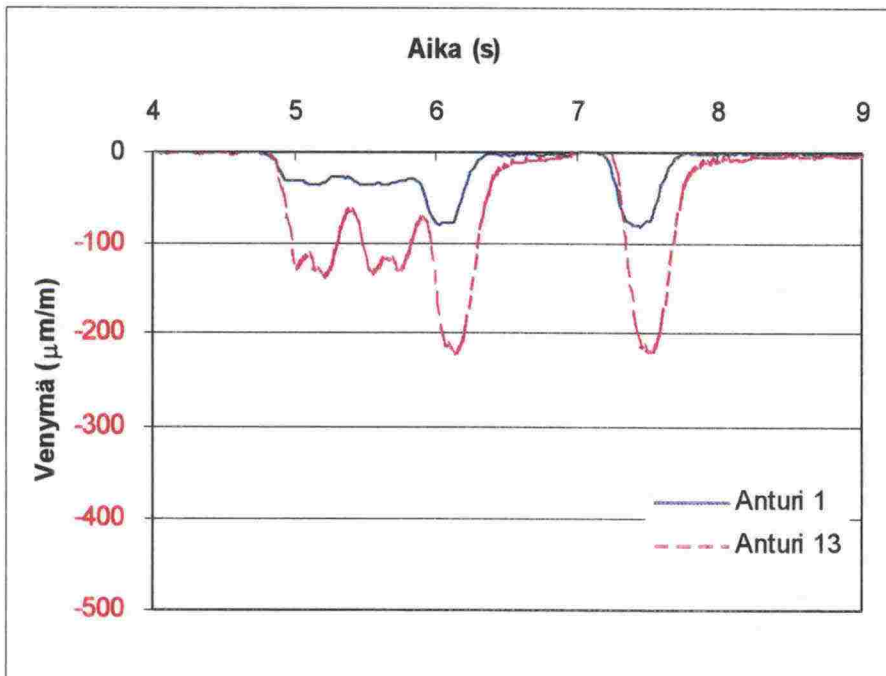
Kaikkein yhdenmukaisimmat tulokset pystysuuntaisista venymämittauksista on saatu mittausinstrumenttien asennustasolla $K_v - 1,3$ m. Asennustasolla $K_v - 0,7$ m yksi venymäanturi on antanut selvästi kolmea muuta pienemmän mittaussignaalin, mutta antureiden asennuskerroksen erittäin karkearakeisesta koostumuksesta – seulomaton raidesepeli – johtuen tulosta on tässäkin tapauksessa syytä pitää vähintäänkin tyydyttävänä. Asennustasolla $K_v - 2,0$ m signaalit sen sijaan ovat selvästi toisistaan poikkeavat, mutta ilmeistä syytä näiden tulosten eroavaisuuteen ei ole suoralta kädeltä todettavissa.



Kuva 4.5:12 Pystysuuntaiset venymät tasolla $K_v - 0,7$ m mittauksessa 64.



Kuva 4.5:13 Pystysuuntaiset venymät tasolla $K_v - 1,3 \text{ m}$ mittauksessa 64.

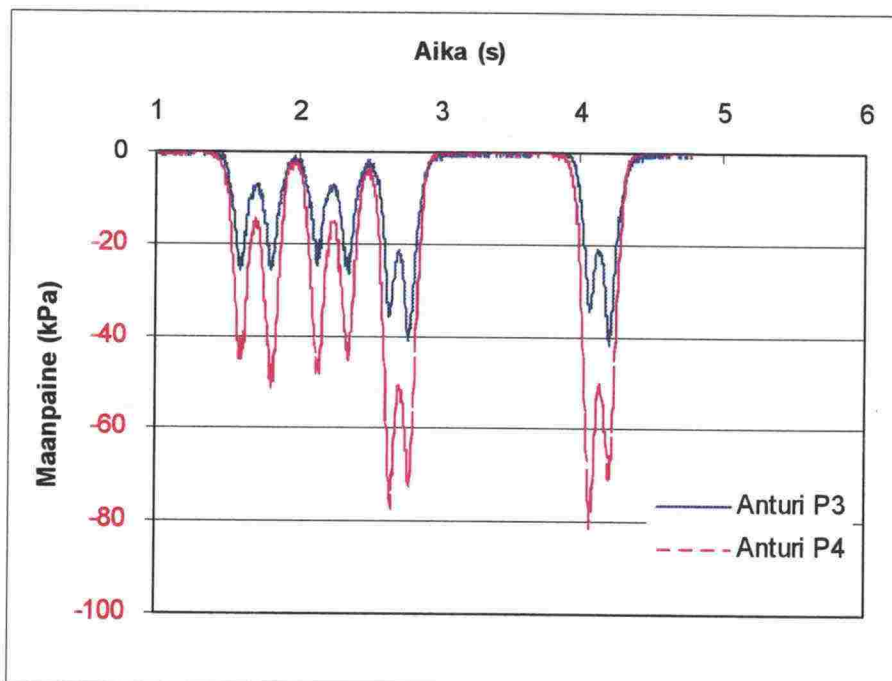


Kuva 4.5:14 Pystysuuntaiset venymät tasolla $K_v - 2,0 \text{ m}$ mittauksessa 64.

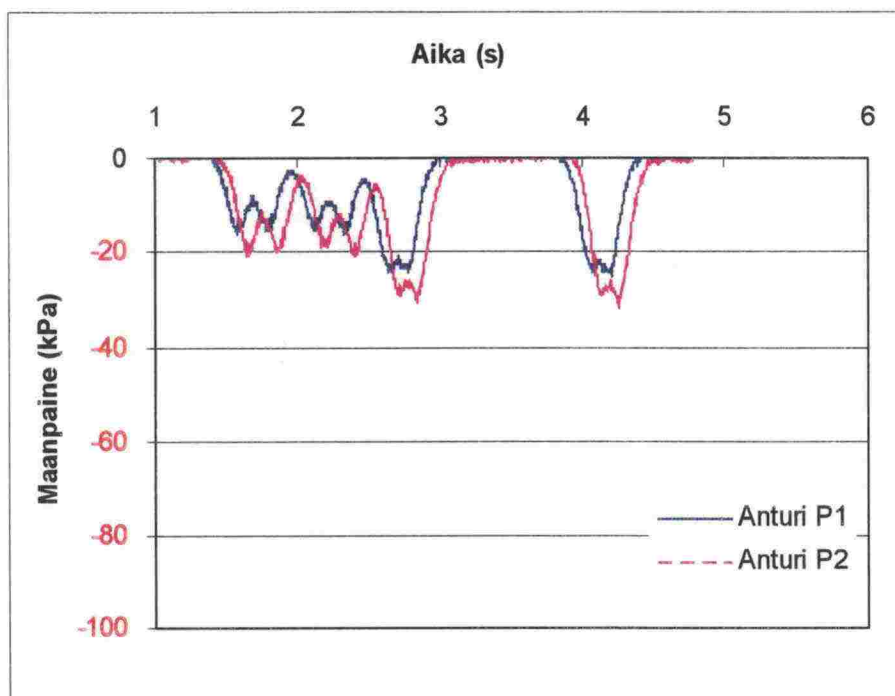
Pystysuuntaiset maanpaineet

Ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden mallinnuksessa luonteeltaan täydentävää ja varmistavaa tietoa antaviksi suunniteltuja pystysuuntaisen maanpaineen mittausantureita oli instrumentointikohteeseen asennettu kahdelle ylemmälle mittausinstrumenttien asennustasolle kaksi kumpaisellekin (kuva 2.2:6 ja 2.3:1). Näillä mittauksen numero 64 yhteydessä rekisteröidyt maanpainesignaalit on esitetty kuvissa 4.5:15 ja 4.5:16.

Kuten kuvista 4.5:15 ja 4.5:16 todetaan, antavat sepelikerroksen alla olevaan hiekkakerrokseen asennetut mittausanturit jälleen keskenään varsin yhdenmukaisen tuloksen. Sepelikerrokseen asennettuna rinnakkaisten mittausantureiden keskinäinen poikkeama sen sijaan on huomattavan suuri, mihin tässäkin tapauksessa ilmeisenä syynä on kyseessä olevan materiaalin karkearakeisuus – ovathan sepelikerroksen suurimmat yksittäiset rakeet läpimitaltaan jopa käytössä olleen maanpaineanturin halkaisijaa suurempia.



Kuva 4.5:15 Pystysuuntaiset maanpaineet tasolla Kv – 0,7 m mittauksessa 64.

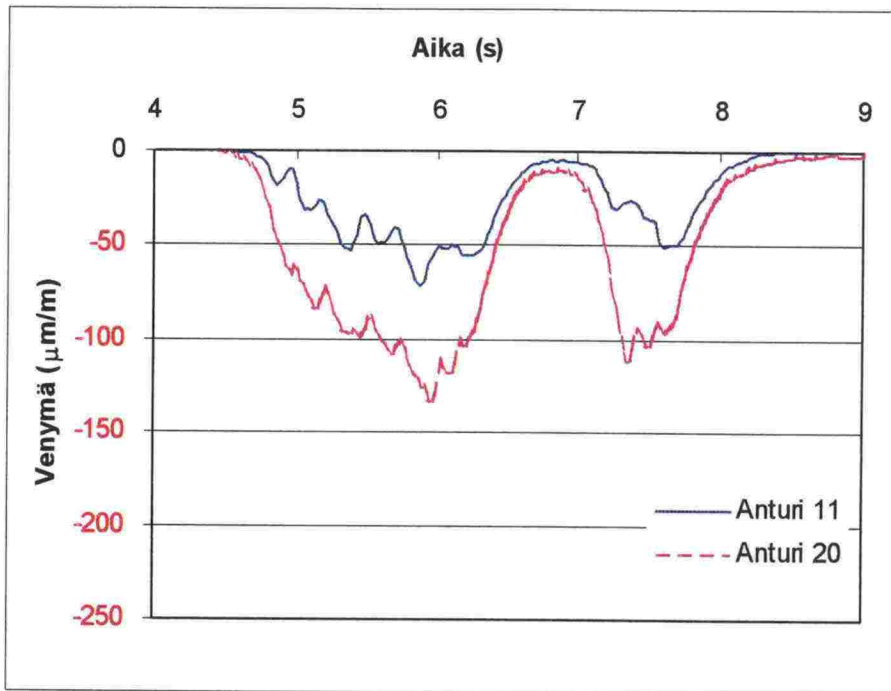


Kuva 4.5:16 Pystysuuntaiset maanpaineet tasolla $K_v - 1,3$ m mittauksessa 64.

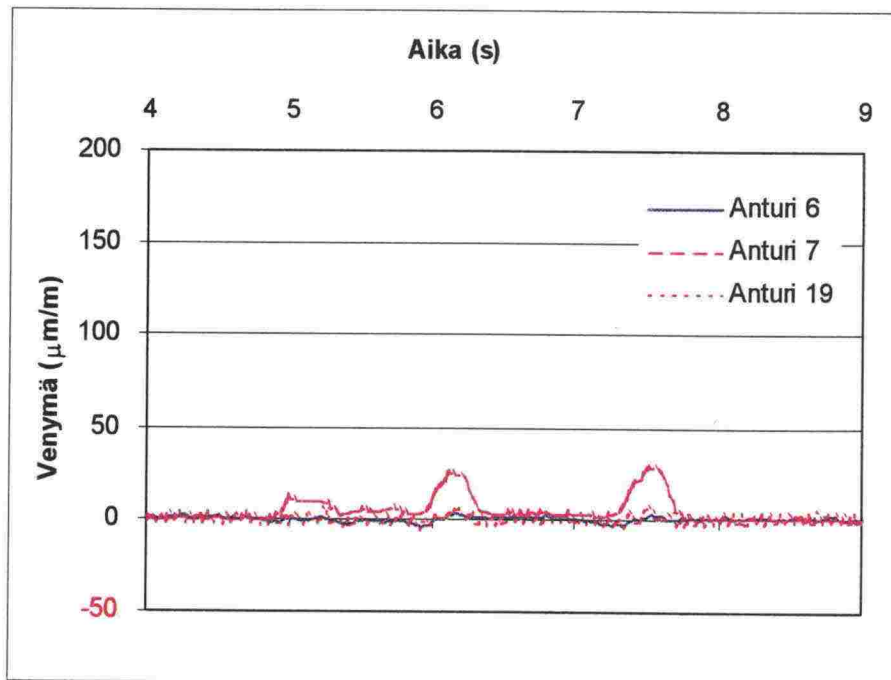
Vaakasuuntaiset venymät

Kuten kappaleessa 2.3.3 edellä jo todettiin, on instrumentointikohteessa toteutettuja mittausjärjestelyjä vaakasuuntaisten venymien mittauksen osalta syytä pitää jossain määrin kokeiluluonteisina. Yhtenä päätavoitteena mittauksilla olikin saada kokemusta käytössä olleen instrumenttityypin soveltuvuudesta vaakasuuntaisen venymän mittaamiseen mahdollisia myöhempää pengerleveyden riittävyteen liittyviä yksityiskohtaisempia tarkasteluja silmällä pitäen. Vaakasuuntaan asennettujen venymäantureiden mittaussignaalit mittauksen numero 64 yhteydessä on esitetty kuvassa 4.5:17 ja 4.5:18.

Sepelikerrokseen tasolle $K_v - 0,7$ m asennettujen venymäantureiden osalta rinnakkaisten mittausantureiden antama tulos on tässäkin tapauksessa varsin odotetusti melko epäyhtenäinen. Luonteenomaisena piirteenä molempien antureiden antamissa mittaussignaaleissa näyttäisi myös olevan, että mitattu vaakasuuntainen muodonmuutos ei peräkkäisten akseliylitysten välillä ehdi palautua yhtä paljoa kuin mitä samalta syvyystasolta mitattu pystysuuntaisen venymä palautuu (kuva 4.5:12).



Kuva 4.5:17 Vaakasuuntaiset venymät tasolla $K_v - 0,7 \text{ m}$ mittauksessa 64.



Kuva 4.5:18 Vaakasuuntaiset venymät tasolla $K_v - 1,3 \text{ m}$ mittauksessa 64.

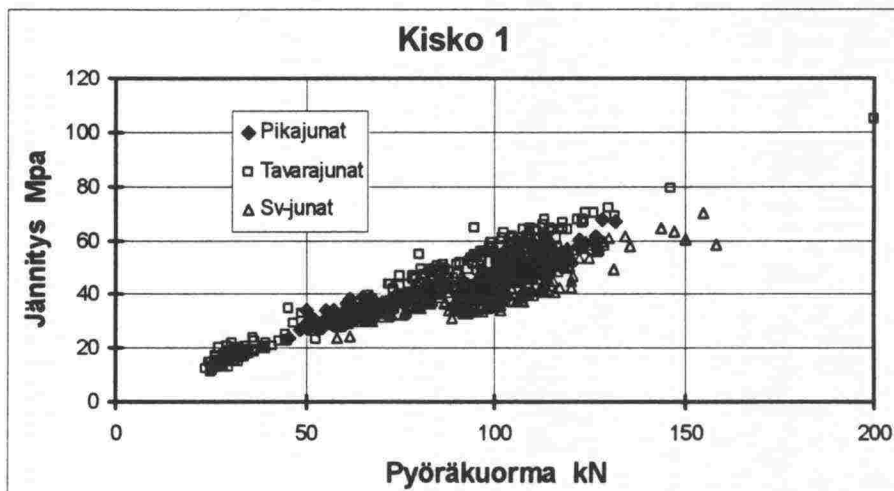
Syvyystasolle Kv – 1,3 m asennettujen vaakasuuntaisten venymämittausten osalta tulos näyttäisi riippuvan selvästi siitä, kumman kiskon alapuolelle tarkasteltava mittausanturi on asennettu. Ulomman kiskon alapuolelle asennetuilla antureilla – anturit numero 6 ja 19 - mitatut vaakasuuntaiset muodonmuutokset näyttäisivät nimittäin olevan hyvin pieniä, mutta sisemmän kiskon alapuolella – anturi numero 7 - selvästi mitattavissa olevia (kuva 4.5:18).

Erityisen huomionarvoinen seikka sisemmän kiskon alapuolelle asennetusta venymä-anturista rekisteröidyssä mittaussignaalissa on se, että päinvastoin kuin kaikkien muiden venymämittausten tapauksessa mitattu liike ei nyt ole kokoonpuristumaa vaan anturin mittausvälillä tapahtuvaa pituuden kasvua. Luonteensa mukaisesti periaatteessa vetoa kestämillä rakeisilla materiaaleilla tällaiset sykliset vetomuodonmuutokset aiheuttavat ilmeisen riskin palautumattomien muodonmuutosten kehittymiselle pengermateriaaliin. Kun myös mainitun anturin rinnakkaisanturi – anturi numero 18 kuvassa 2.2:6 – oli antureiden asennuksen ja mittausajankohdan välillä ajautunut mittausalueensa ulkopuolelle anturin mittausvälillä tapahtuneen liian suuren pitenemisen vuoksi, voisi tämäkin havainto indikoida pengermateriaalissa toistuvien vetomuodonmuutospulssien vaikutuksesta kumuloitunutta palautumatonta muodonmuutosta, jonka kehittymiselle ratapenkereen leveydellä ja akselipainon suuruudella luvussa 7 esitettyjen suuntaa-antavien tarkastelujen valossa mitä ilmeisimmin on varsin ratkaiseva vaikutus.

5 RAITEEN TOIMINTAAN LIITTYVÄT TARKASTELOT

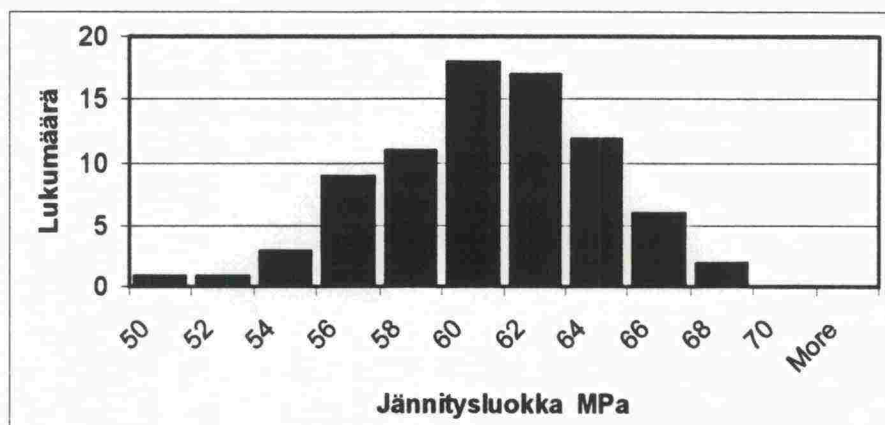
5.1 Kiskoon kohdistuvat rasitukset

Kiskon osalta instrumentoinnin lähtökohtana oli se, että määräävin rasitus syntyy kiskoa pystytasossa kuormittavan taivutusmomentin vaikutuksesta. Taivutusmomentin synnyttämä muodonmuutos mitattiin kiskon jalan alapinnalta venymäliuskasillalla. Mittauksen tuloksena saaduista suhteellisen venymän arvoista voidaan laskea vastaavat jännityksen arvot, kun kiskomateriaalin kimmokerroin tunnetaan. Kuvassa 5.1:1 on esitetty joukko erityyppisille junille rekisteröidyistä maksimivenymistä laskettuja jännityksen arvoja pystysuoran pyöräkuorman funktiona. On huomattava, että kyseisen pyöräkuorman lisäksi viereisten akselien pyörillä on osuutensa taivutusmomentin ja sitä kautta venymän suuruuteen. Kuvasta nähdään, että taivutuksesta peräisin olevat jännitykset pysyttelevän tason 80 MPa alapuolella, kun ei oteta lukuun lovipyörien iskuja. Jännitysten laskennassa on kimmokertoimella käytetty arvoa 210 000 Mpa.

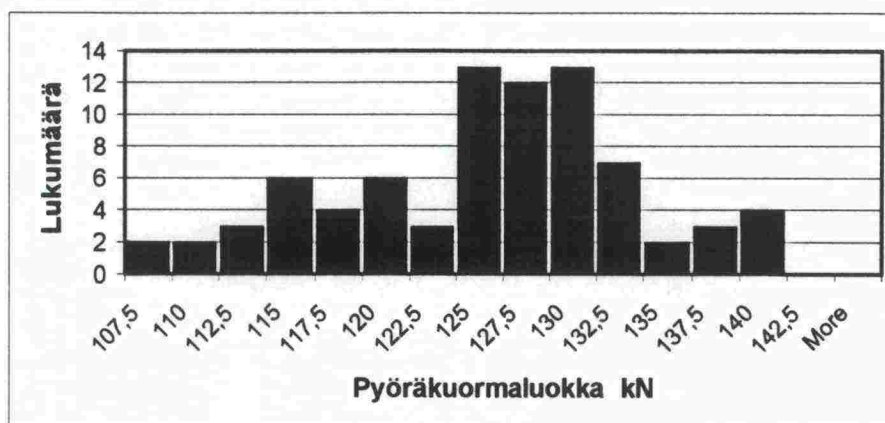


Kuva 5.1:1 Eri junatyypin kiskon alapintaan synnyttämiä taivutusjännityksen maksimiarvoja.

Koejunan vaunun pyöräkerrat vaikuttivat hyväkuntoisilta, joten niiden kiskoon synnyttämiä rasituksia voidaan pitää jonkinlaisena referenssitapauksena. Kuvassa 5.1:2 on mittaustulokset näiltä osin esitetty maksimijännitysten jakautumana. Vastaava pystysuorien dynaamisten pyöräkuormien jakautuma nähdään kuvassa 5.1:3. Koejunan vaunulle mitattujen staattisten pyöräkuormien keskiarvoksi saatiin 122,7 kN (vrt. taulukko 4.5:1).



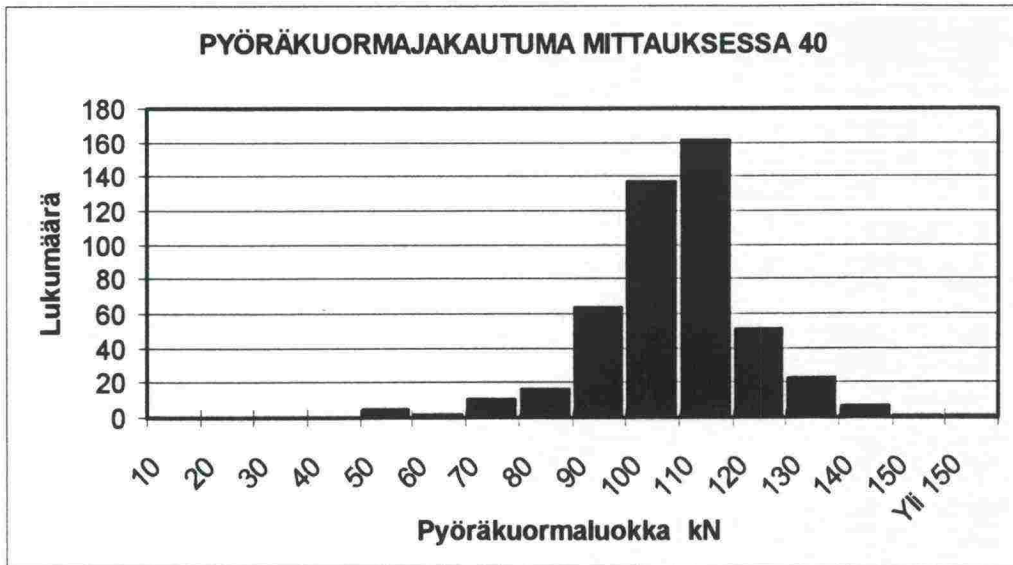
Kuva 5.1:2 Koejunan vaunun synnyttämien maksimijännitysten jakautuma. Niiden keskiarvo on 59,4MPa ja keskihajonta 6,0%.



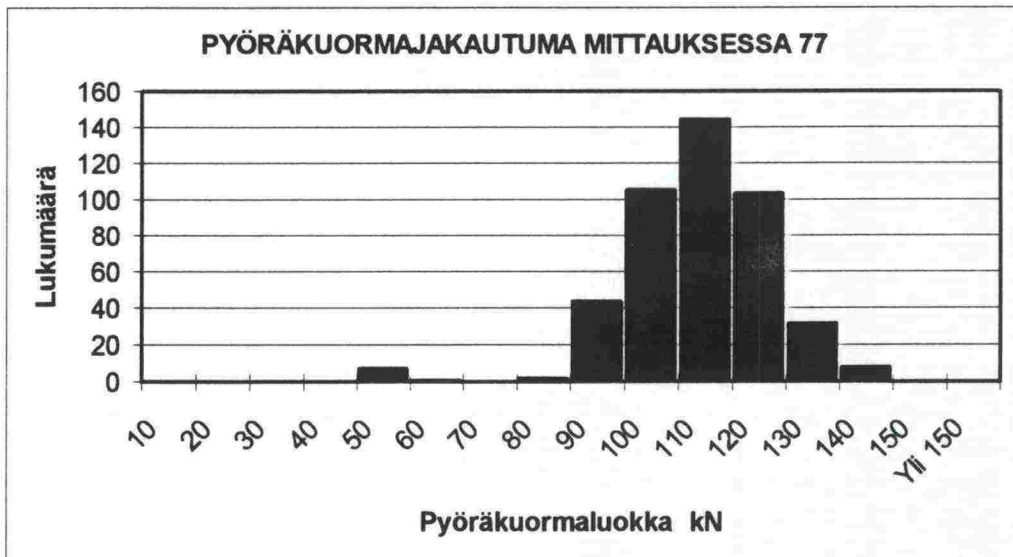
Kuva 5.1:3 Koejunan vaunun dynaamisten pyöräkuormien jakautuma. Keskimäärin ne olivat suuruudeltaan 124,3kN keskihajonnan ollessa 6,4%.

Kuvissa 5.1:4 ja 5.1:5 on esitetty pari esimerkkiä säiliövaunun synnyttämien pystysuorien pyöräkuormien jakautumista. Niiden perusteella voidaan arvioida nykyisillä akselipainoilla esiintyvien maksimikuormien suuruutta.

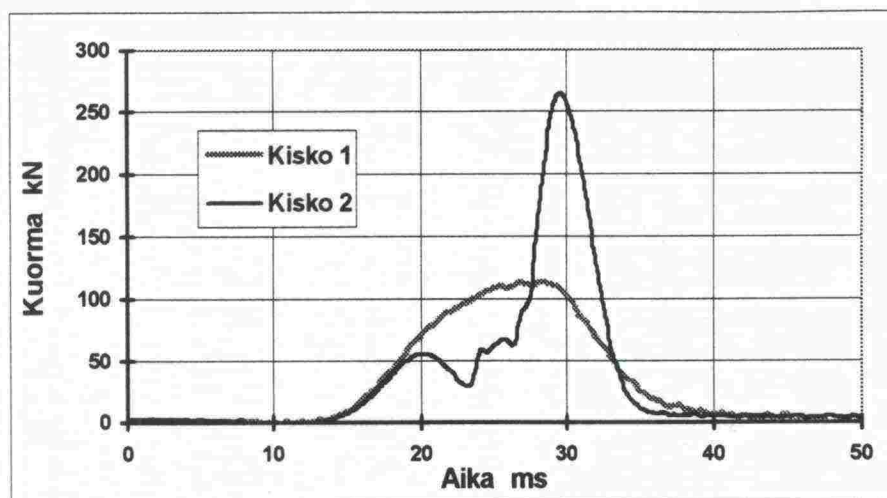
Äänihavaintoihin perustuen voidaan todeta, että varsinkin tavarajunissa oli usein lovipyörällisiä akseleita. Lovipyörän isku sattui kuitenkin aika harvoin juuri instrumentoidun pölkkyvälin keskelle, mutta joitakin tapauksia saatiin rekisteröityä. Kuvassa 5.1:6 nähdään eräs tällainen isku, jossa pystykuormalle mitattiin maksimiarvoksi 265 kN. Sen suuruus vastaa kutakuinkin mittaukseen käytetyn vahvistimen maksimiulostulojännitettä, mutta huippu ei näytä leikkautuneen. Kiskon alapinnalta mitattiin maksimivienymä 484 $\mu\text{m}/\text{m}$, mistä saadaan laskemalla jännitykseksi 102 MPa. Kuormituksen impulssimaisuus yhdistettynä rakenteen hitauteen on todennäköisesti estänyt suuremman taivutusmuodonmuutoksen syntyminen.



Kuva 5.1:4 Mitattujen pyöräkuormien jakautuma tapauksessa, jossa niiden keskiarvo on 99,5 kN ja keskihajonta 14,5 kN. Normaalijakautuneeksi olettamalla 99,7% niistä olisi suuruudeltaan alle 143,0 kN eli niiden keskiarvo lisätynä kolme kertaa keskihajonnalla.

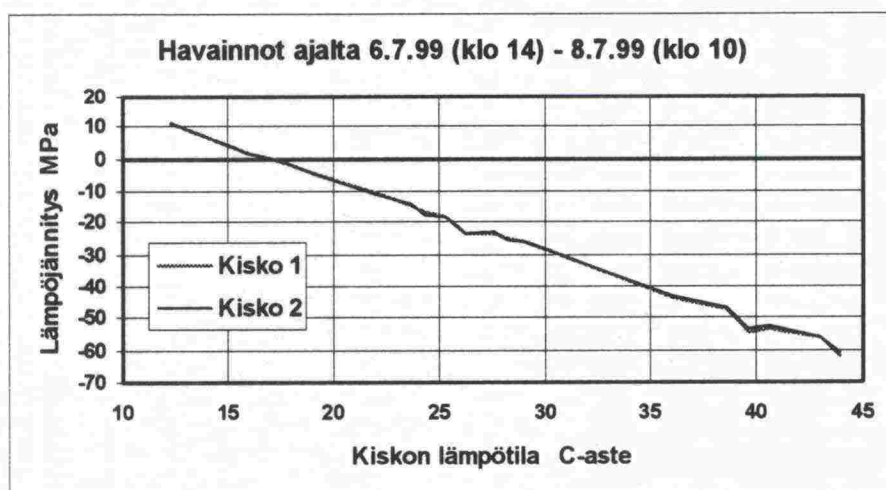


Kuva 5.1:5 Normaalijakautumaolettamuksella 99,7% yllä olevista pyöräkuormista olisi suuruudeltaan alle 144,3 kN. Pyöräkuormien keskiarvo on 103,8 kN ja keskihajonta 13,5 kN.



Kuva 5.1:6 Instrumentoidun pölkkyvälin keskialueelle kiskoon 2 osunut lovipyörän isku. Kyseisen tavarajunan nopeus oli noin 15m/s eli se eteni 0,15 metriä kymmenessä millisekunnissa. Kuvaan on piirretty myös saman akselin toiselle pyörälle kiskosta 1 rekisteröity pyöräkuorma.

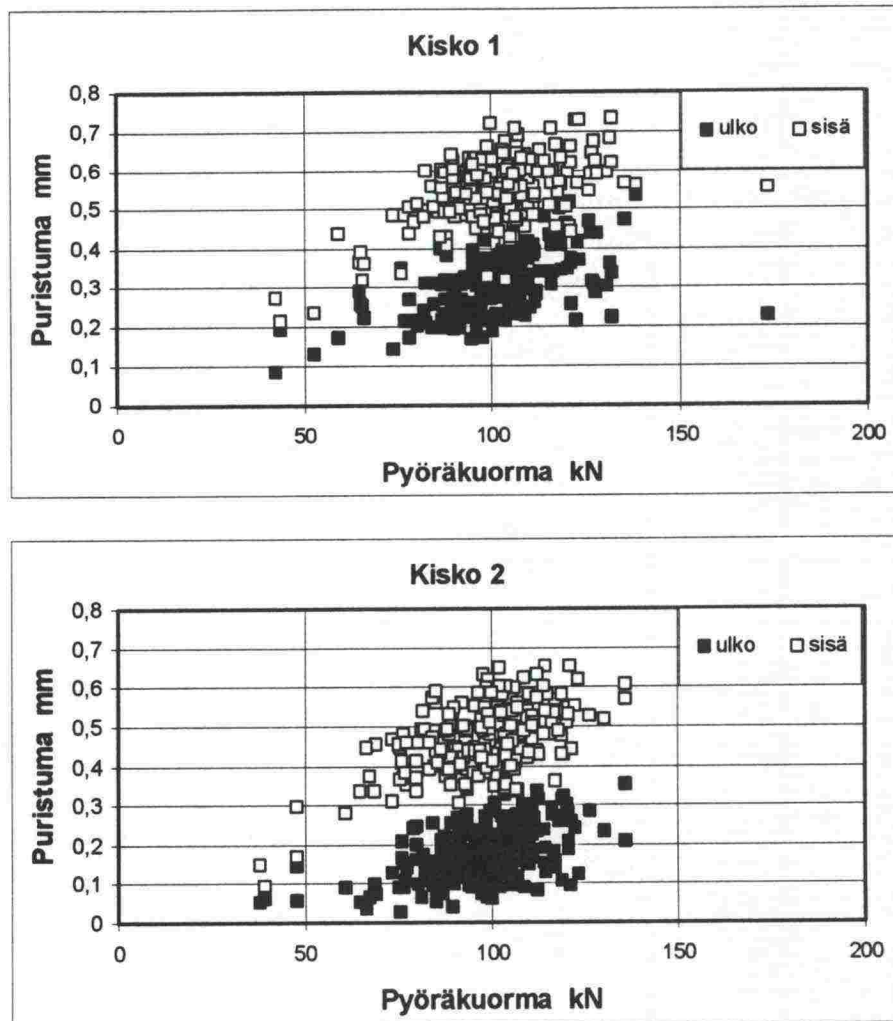
Kiskon alapinnan venymäliuskoja käytettiin myös lämpöjännitysten seurantaan mittausten aikana. Teräkselle lämpötilasovitetut venymäliuskat eivät kiskoon asennettuna indikoi venymää, mikäli kisko pääsee vapaasti muuttamaan muotoaan lämpötilan mukaan. Koska kiskon lämpöpiteneminen oli estetty, saatiin venymäsignaalien 0-tasonmuutoksista laskettua vastaavat lämpöjännitysten muutokset. Kiskojen lämpötila mitattiin muutaman kerran vuorokaudessa erillisellä kosketuslämpömittarilla. Tulokset on esitetty kuvassa 5.1:7. Jännityksen nollassoksi on asetettu raiteelle ilmoitettu neutraalilämpötila 17 °C.



Kuva 5.1:7 Venymäsignaalien 0-tason siirtymistä lasketut lämpöjännitykset kiskon lämpötilan funktiona. Neutraalilämpötilaksi on oletettu 17 °C.

5.2 Välilevyn rasiutukset ja toiminta

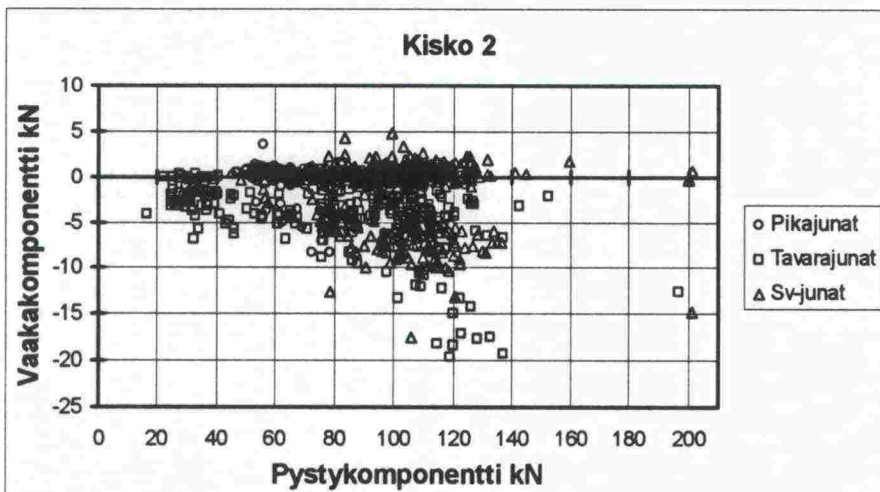
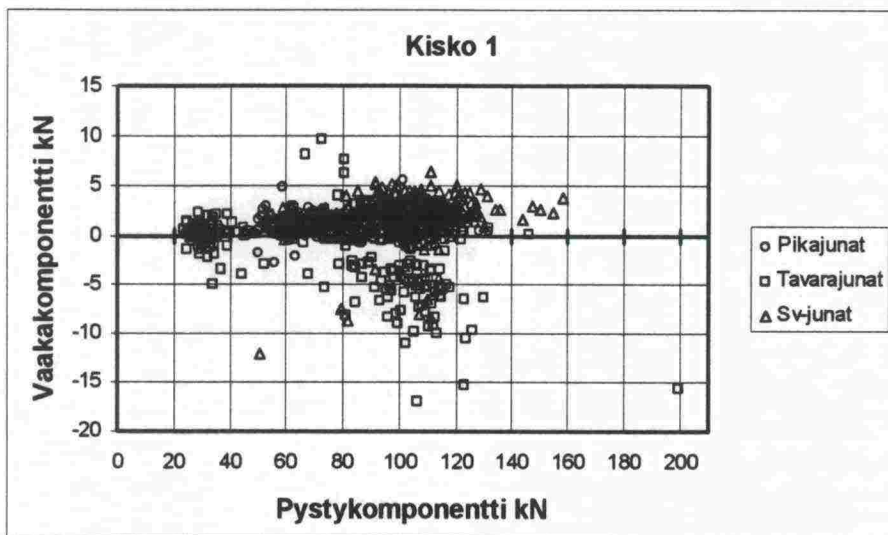
Välilevyn rasiutusten määrittäminen on vaikeaa muutoin kuin mittaamalla sen dynaaminen puristuma kiskon ja pölkyn välisenä pystysuuntaana. Mittaamiseen käytettiin varmuuden vuoksi kahta siirtymäanturia per kisko sijoitettuna jalan reunojen tuntumaan. Näin saatiin näkyviin myös kiskon jalan mahdollinen kallistuma, mikä merkitsee samalla sitä, että välilevyn puristuma ei ole jakautunut tasaisesti. Kuvaan 5.2:1 on poimittu mittauksessa 40 rekisteröidyt em. puristumien maksimiarvot, jotka kuvassa on esitetty vastaavien pystysuorien pyöräkuormien funktiona. Kyseisen tavarajunan nopeudeksi mitattiin 57-62 km/h, ja se koostui lähinnä säiliövaunuista. Mukana oli myös tyhjiä vaunuja, joten mitattujen pyöräkuormien vaihteluväli on kyseisessä tapauksessa melkoisen edustava. Välilevyn puristuma oli selvästi suurempi jalan sisä- kuin ulkoreunalla eli kiskot kallistuivat sisäänpäin. Lisäksi kiskon 1 alla oleva välilevy puristui kokonaisuudessaan selvästi enemmän kuin kiskon 2 levy.



Kuva 5.2:1 Mittauksessa 40 rekisteröidyt välilevyn maksimipuristumat kiskon jalan ulko- ja sisäreunalla junan akselien ylittäessä instrumentoidun pölkyn.

5.3 Kiskonkiinnitysten rasitukset ja toiminta

Myös kiskon kiinnitysoisiin syntyvien rasitusten suuruudesta saadaan tietoa nyt tehtyjen mittausten perusteella. Pölkkyyn integroidut teräksiset jousikiinnikkeet pitävät kiskon sivusuunnassa paikoillaan eristekappaleiden välityksellä. Niihin kohdistuu siis pyöräkuorman vaakakomponentin suuruusluokkaa olevia kuormituksia. Kuvaan 5.3:1 on poimittu erityyppisille junille mitattuja pyöräkuorman komponenttipareja. Koska instrumentoitu leikkaus sijaitsee suoralla rataosuudella, niin kiskonkiinnikkeitä rasittava vaakakomponentin suuruus jäi pienemmäksi kuin esimerkiksi kaarteissa ja vaihteissa on toisissa yhteyksissä mitattu. Mittauksissa signaalin positiivinen suunta vastasi kuormitusta sisäänpäin. Kuvasta havaitaan, että suurimmat vaakavoimat pyrkivät painamaan kiskoa raiteesta ulospäin.

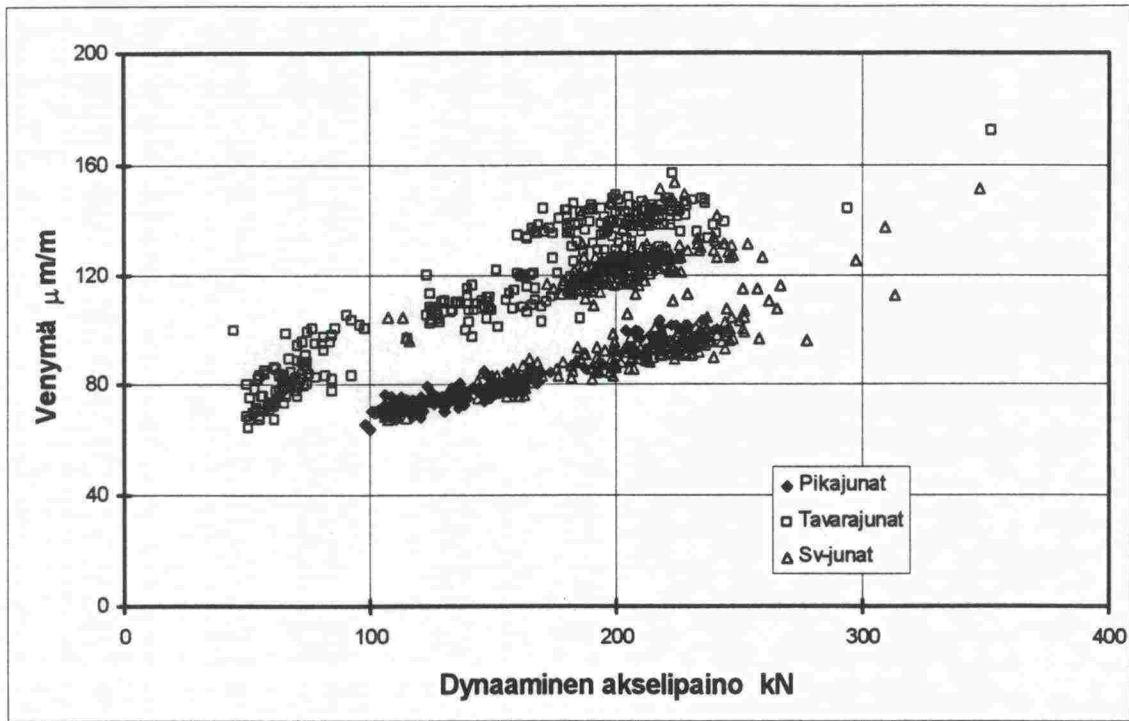


Kuva 5.3:1 Eri junatyypeille mitattuja pyöräkuorman komponenttipareja.

Pandrol-jousen rasituksista saadaan käsitys tarkastelemalla kiskon pystyliikettä jalan reunoilla. Kiskon liikkessa pölkkyä kohti jousen jännitys pienenee. Vastaavasti kiskon siirtyessä lepotilastaan vastakkaiseen suuntaan jännitys kasvaa. Jousen väsymisen kannalta merkittävää on syntyvien jännitysheilahdusten suuruus ja niiden lukumäärä. Kuvan 5.2:1 esittämät siirtymät edustavat välilevyn puristuman ohella riittävällä tarkkuudella myös jousen pään siirtymää lepotilastaan pölkkyyn päin. Mittaustulosten tarkastelu osoitti, että jalan liike pölkystä pois päin oli enimmillään 0,25 mm jalan sisä- ja 0,20 mm ulkoreunalla kummankin kiskon osalta. Mittaustulosten perusteella saadaan siis jousen pään liikealueeksi kiskon 1 jalan sisäreunalla 1,0 mm ja ulkoreunalla 0,75 mm. Kiskolle 2 vastaavasti 0,90 mm ja 0,55 mm. On huomattava, että edellä mainitut liikealueet kattavat suurimmatkin yksittäiset ääriarvot nyt rekisteröidyissä mittauksissa, ja että valtaosa jousien kokemista jännitysheilahduksista oli suuruudeltaan pieniä. Kiskon kiinnikkeille laboratoriossa tehdyissä kuormituskokeissa jouset ovat kestäneet väsymättä miljoonia 1-1,5 mm:n suuruisia kuormituksia.

5.4 Pölkyn rasitukset

Pölkyn pääasiallinen rasitus on peräisin pystykuormien ja tuennan aikaansaamasta taivutuksesta. Sopivasti päiden alta tuettuna pölkyn keskiosalle ei pitäisi syntyä lainkaan taivutusmomenttia. Kuten kuvasta 4.5:8 nähdään, on pölkyn päistä mitatut painumat huomattavasti suuremmat kuin keskeltä mitattu. Tämä merkitsee sitä, että pölkky on taipunut kaarelle, ja että keskialueen yläpinnalle syntyy vetoa. Venymämittaustulokset pitävät yhtä tämän päätelmän kanssa, kuten kuvasta 5.4:1 voidaan havaita. Kuvasta nähdään lisäksi, että tavarajunat rasittavat pölkkyä selvästi eniten. Säiliövaunuista koostuvia junia ja pikajunia edustavat pisteet sijoittuvat omalle tasolle. Lovipyöräakselit erottuvat joukosta. Pölkyn yläreunaan kiskojen kohdalle asennetuista venymäliuskoista saatiin huomattavasti pienempiä arvoja. Karkeasti yleistäen saatiin kiskon 1 kohdalta itseisarvoltaan puolet ja kiskon 2 kohdalta kolmasosa keskeltä mitatusta venymästä. Näissä viimeksi mainituissa kohdissa muodonmuutos oli puristusta.



Kuva 5.4:1 Eri junatyypeille saatuja venymän maksimiarvoja pölkyn keskiosalla.

5.5 Raiteen karakteristinen pituus

Kiskon taivutusrasitusten laskennallisessa määrittämisessä voidaan käyttää vaikutusviivafunktioita, joita tapaukseen sovelsi ensimmäisenä Zimmermann 1800-luvun loppupuolella. Pari vuosikymmentä aikaisemmin Winkler oli esittänyt yksinkertaistetun otaksumansa, että kimmoisen alustan painuma z on joka kohdassa verrannollinen siinä vaikuttavaan painekuormaan p . Riippuvuus ilmaistaan tavallisimmin muodossa

$$p = Cz, \quad (5.5.1)$$

missä kerroin C on nimeltään alustaluku. Zimmermann redusoi raiderakenteen kimmoisalla alustalla lepääväksi äärettömän pitkäksi palkiksi, jota kuormittaa pistevoima. Esimerkiksi taivutusmomentille muodostetun vaikutusviivafunktion avulla voidaan laskea mielivaltaisen kuormituksen synnyttämä momentti halutussa kohdassa palkkia superpositioperiaatetta noudattaen. Vaikutusviivafunktion muuttujana käytetään dimensiota etäisyyttä origosta, joka sijaitsee tarkasteltavassa leikkauksessa. Suurin osuus taivutusmomentista aiheutuu origon kohdalla vaikuttavasta pyöräkuormasta, jossa vaikutusviivafunktiolla on arvo yksi. Viereisten akselien pyöräkuormat tulevat mukaan omalla osuudellaan, joka voi olla joko momenttia lisäävä tai vähentävä, ja jonka suuruus riippuu pyörän etäisyydestä origoon. Etäisyys saadaan dimensiottomaksi jakamalla metrinen arvo niin kutsutulla raiteen karakteristisella pituudella. Sen suuruus riippuu kiskon ja alustan (välilevyn, pölkyn, sepelin jne.) ominaisuuksista. Mitattavana

suurena ei nyt tehdyissä mittauksissa ollut suoraan kiskon taivutusmomenttia vaan kiskon alapinnan venymä. Käyttämällä hyväksi tunnettuja yhteyksiä kyseisen venymän, jännityksen ja kiskon poikki-pinta-alasuureiden välillä saadaan yhtälö

$$L = 4 E W \varepsilon / \sum Q_i \mu(\xi_i) \quad (5.5:2)$$

joka sitoo yhteen karakteristisen pituuden L ja kiskon alapinnan venymän ε . Yhtälössä on käytetty seuraavia merkintöjä:

E = kiskomateriaalin kimmokerroin

W = kiskon taivutusvastus jalan suhteen

Q_i = pyöräkuorma i

$\mu(\xi_i)$ = vaikutusviivafunktion arvo kohdassa ξ_i

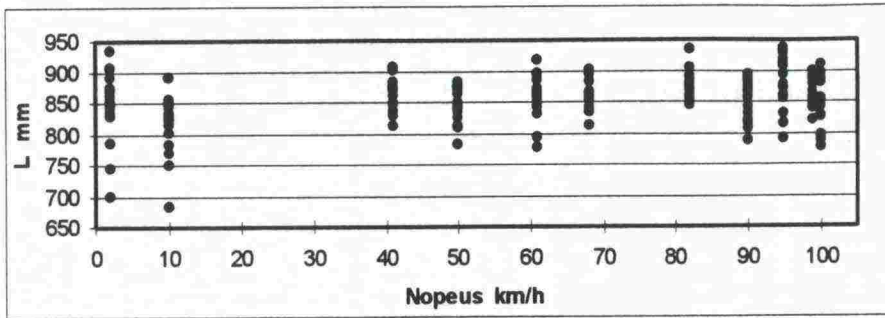
ξ_i = x_i / L = pyöräkuorman Q_i dimensioton etäisyys origosta

x_i = pyöräkuorman Q_i metrinen etäisyys origosta

Itse vaikutusviivafunktio on muotoa

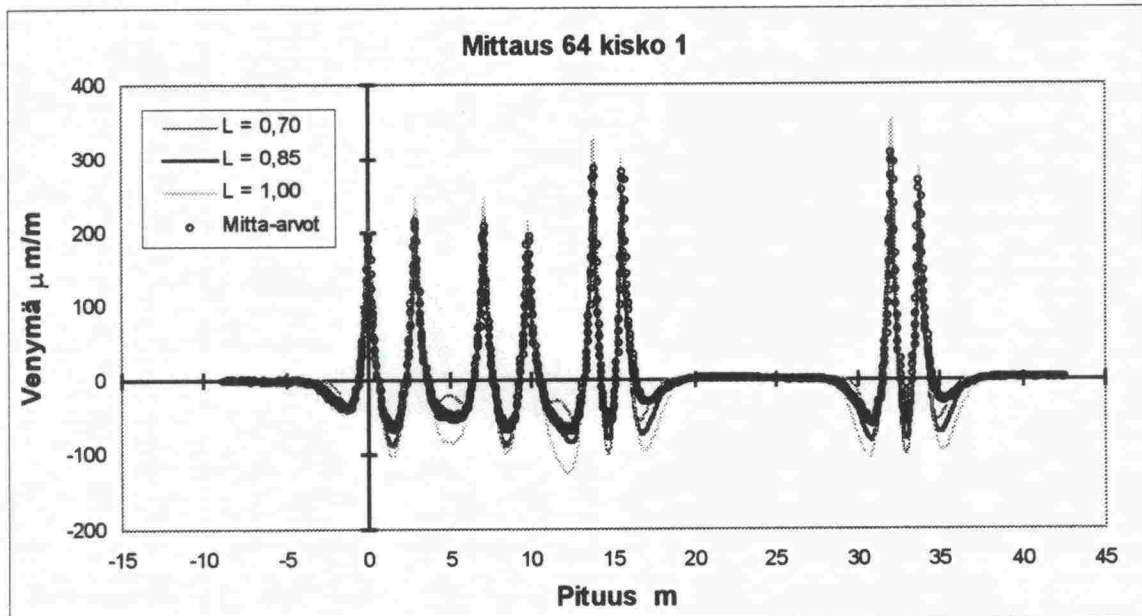
$$\mu(\xi) = (\pm \sin \xi + \cos \xi) / e^{\pm \xi} \quad (5.5:3)$$

Kuvassa 5.5:1 on esitetty karakteristisen pituuden arvot, jotka on saatu käyttäen kutakin koejunalle eri nopeuksilla mitattua pystysuoran pyöräkuorman ja vastaavaa kiskon alapinnalta mitatun venymän arvoa. Pyöräkohtaiset L :n arvot on laskettu iteratiivisella menettelyllä ottaen huomioon myös viereisen pyörän vaikutus. Mitään merkittävää nopeusriippuvuutta ei ole havaittavissa, ja karakteristinen pituus kyseisessä rataleikkauksessa näyttäisi olevan noin 0,85 metriä. Karakteristisen pituuden avulla voidaan mm. pelkistää pistevoiman kuormittama, kimmoisalla alustalla oleva palkki yksinkertaiseksi keskeltä kuormitetuksi 2-tukiseksi palkiksi. Tukivälin ollessa L on taivutusmomentti kyseisen voiman kohdalla kummassakin tapauksessa yhtä suuri.



Kuva 5.5:1 Koejunalle mitatuista pyöräkuormista ja kiskon alapinnan venymästä laskettuja raiteen karakteristisen pituuden arvoja esitettynä nopeuden funktiona.

Venymämittaustulokset istuvat hyvin edellä kuvatulla yksinkertaisella matemaattisella mallilla laskettuihin venymiin. Kuvassa 5.5:2 on esitetty mittauksessa 64 kiskosta 1 rekisteröidyt venymäarvot sekä mitattujen pyöräkuormien ja vaikutusviivafunktioiden avulla lasketut venymäkuvaajat karakteristisen pituuden ollessa parametrina. Kunkin vaikutusviiva on laskettu ensin omassa paikallisessa koordinaatistossaan. Sitten ne on yhdistetty superpositioperiaatteen nojalla siten, että kukin pyörä sijoittuu kuvan pituusakselilla omalle paikalleen. Nähdään, että L :n arvolla 1,0m syntyy liian suuria venymiä ja arvolla 0,7m liian pieniä. Karakteristinen pituuden arvolla 0,85m päästään selvästi lähemmäksi mitattuja arvoja. Alkuperäisen rekisteröinnin aika-akseli on muutettu pituudeksi kertomalla muuttujan arvot junan nopeudella.



Kuva 5.5:2 Esimerkki mitatuista ja vaikutusviivafunktioiden avulla lasketuista kiskon alapinnan venymistä.

Olettaen, että karakteristisen pituuden arvo on esimerkiksi em. 0,85 metriä, saadaan muodostettua vastaavanlainen vertailu vaikutusviivafunktioiden avulla lasketun kiskon painuman ja mitattujen arvojen välillä. Itse vaikutusviivafunktio on muotoa

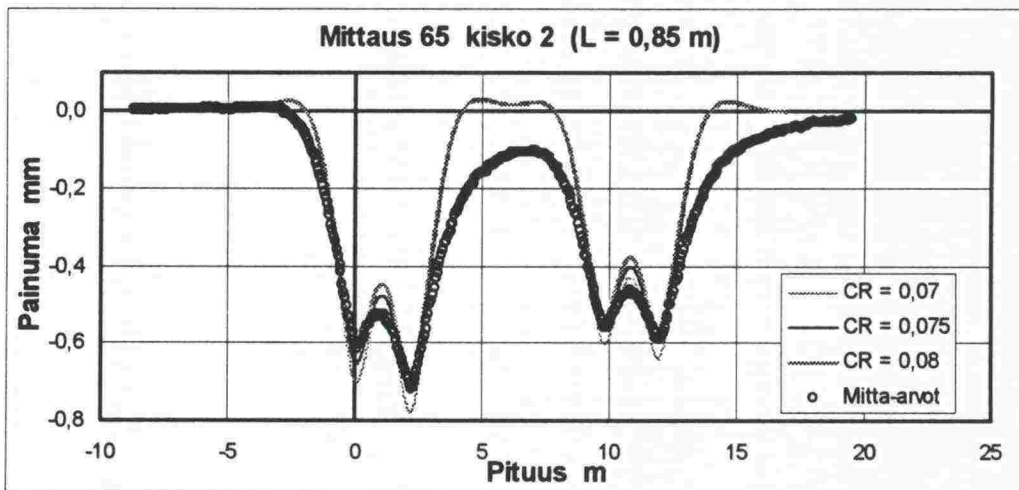
$$\eta(\xi) = -(\pm \sin \xi + \cos \xi) / e^{\pm \xi}. \quad (5.5:4)$$

Kiskon painuman kuvaaja voidaan muodostaa vastaavalla tavalla kuin edellä tehtiin venymän kohdalla. Kunkin pyörän osuus z_i painumakuvaajasta saadaan käyttämällä yhtälöä

$$z_i(\xi) = Q_i \eta(\xi) / (2bC_R L). \quad (5.5:5)$$

Yhtälössä vakio C_R on ratarakenteen redusoitu alustaluku, jossa on mukana myös välilevyn jousto. Mikäli oletetaan, että tukipaine jakautuu pölkyn koko alapinnalle, saadaan b jakamalla tämän pinta-alan puolikas pölkkyjaolla.

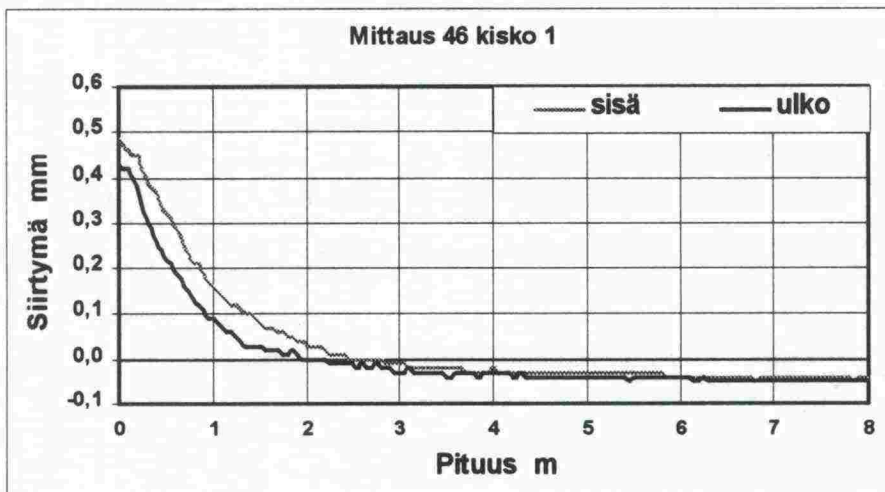
Kuvan 5.5:3 tapauksessa kiskon painuman mitta-arvot on saatu summaamalla yhteen välilevyn puristuma ja pölkyn keskiosan ja kiskon 2 puoleisen pään painuman keskiarvo. Tämän on oletettu edustavan riittäväällä tarkkuudella pölkyn puolikkaan painumaa kiskon 2 alla. Välilevyn osuus kokonaispainumasta oli kyseisessä tapauksessa 10-15%. Vaikutusviivafunktioiden avulla muodostetut kuvaajat on laskettu käyttämällä mitattuja pyöräkuorman arvoja, ja parametrina on käytetty redusoitua alustalukua. Sen arvolla 0,075 saatu kuvaaja näyttää istuvan parhaiten mitattuihin painumiin



Kuva 5.5:3 Esimerkki mitattujen ja vaikutusviivafunktioiden avulla lasketujen kiskon painumien välillä. Mitta-arvot saatiin ratatyökone TTV 16:n ylittäessä instrumentoidun leikkauksen nopeudella 84,3 km/h.

5.6 Kuormituksen jakautuminen peräkkäisille pölkyille

Mittaustuloksista ei ainakaan suoraan käy selville yksittäisen pyöräkuorman jakautuminen vierekkäisille pölkyille. Esimerkiksi välilevyn puristumaa voitaisiin teoriassa käyttää pölkkyyen kohdistuvan kuorman mittarina. Tilannetta hankaloittaa kuitenkin se, että junan kyseessä ollen tämä kuorma on käytännössä aina peräisin useammasta kuin yhdestä pyörästä. Kun mitatuista tapauksista pitäisi löytää sellainen, jossa tilanne olisi lähimpänä yksittäisen pyörän kuormittamaa kiskoa, tulee mieleen 2-akselinen vaunu junan viimeisenä. Kuvassa 5.6:1 on esimerkki tällaisen viimeisen akselin jälkeisestä kiskon ja pölkyen välisen pystysiirtymän rekisteröinnistä. Aika-akseli on muutettu pituudeksi samoin kuin edellä eli kertomalla argumentin arvot junan nopeudella. Lepotilassa ennen junan saapumista signaalit ovat olleet 0-tasossa. Kuvaajista nähdään, että välilevyn keskimääräinen puristuma akselin ollessa kohdalla on ollut noin 0,45mm. Se on sitten yhden pölkyvälin matkalla pudonnut noin 50%, mutta sitä on vielä 20% jäljellä kahden pölkyvälin etäisyydellä, minkä lisäksi se palautuu lopuksi lepoasemansa ohitse 0,05mm. Tämä käyttäytyminen selittynee suureksi osaksi välilevyn joustokäyrän epälineaarisuudella, mutta myös maaperän ominaisuuksista juontuva hystereesin vaikeuttaa mittaustulosten tulkintaa.



Kuva 5.6:1 Esimerkki kiskon ja pölkyen välisen siirtymän palautumisesta junan viimeisen akselin jälkeen.

6 RATAPENKEREEN MALLINTAMINEN KERROSRAKENNEOHJELMALLA

6.1 Johdanto

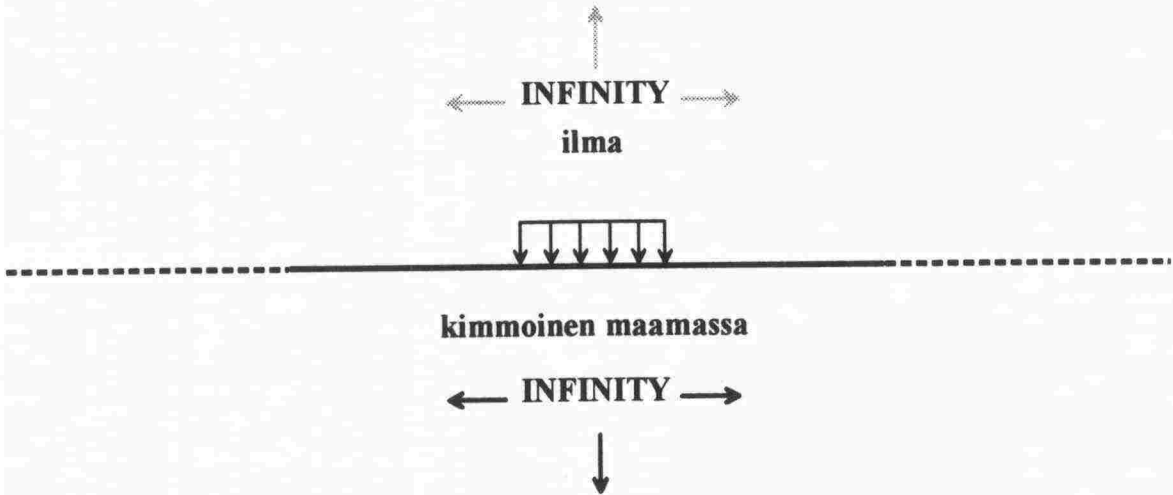
Ratapenkereen mallintamisesta kerrosrakenneohjelmilla on saatu hyviä tuloksia maailmalta (Selig & Waters 1994). Kerrosrakenneohjelmien käyttö edellyttää ratapenkereeltä lähes täysin kimmoista toimintaa toistuvien kuormitusten alaisuudessa. Tutkimuksissa on todettu, että jo muutama sata kuormitusyhtä riittää aiheuttamaan tilanteen, jossa maa toimii lähes täysin kimmoisesti. Toisaalta vakio resilient -moduulin saavuttaminen syklisessä kuormituksessa vaatii muutamia tuhansia toistokuormituksia (Selig & Waters 1994). Toistokuormitusta ja resilient -moduulin määrittämistä on tarkemmin käsitelty tämän tutkimuksen kirjallisuustutkimusosuudessa (Kolisija et al. 1999).

Kerrosrakenneohjelmia on kehitetty useita, joista osa on tarkoitettu erityisesti ratapenkereen mallintamiseen ja toiset vastaavasti tiepenkereen mallintamiseen. Suurin ero on ohjelmien kaupallisuudessa. Ratapenkereiden mallintamiseen erikoistuneet ohjelmat ovat yleensä epäkaupallisia, tutkijoiden omaan käyttöön suunniteltuja ohjelmia, kun taas tiepenkereiden mallintamiseen sopivista ohjelmista löytyy myös kaupallisia versioita ja niitä on suhteellisen helposti saatavissa. Yhteistä näille ohjelmille on kuitenkin maakerrosten oletettu käyttäytyminen lineaarisen kimmoteorian mukaan. Bousinessq esitti jo vuonna 1885 pistemäisen kuormituksen jännitys jakauman elastisessa puoliavuudessa. Tierakenteiden suunnitteluohjelmat hyödyntävät Bousinessqin jännitys jakaumaa ympyrämuotoiselle kuormitukselle, kun taas ratapenkereiden mallinnusohjelmat käyttävät Loven (1928) jännitys jakaumaa. Loven jännitys jakaumateoria on edelleen kehitetty Bousinessqin teoriasta ja se pystyy ottamaan huomioon nelikulmiomaisen kuormituksen. Maan pinnalla olevalla kuormituksen muodolla ei ole käytännön merkitystä kuin tukikerroksen osalta. Syvemmälle mentäessä kuormitukset tasaantuvat.

Tässä tutkimuksessa on käytetty tierakenteen analysointiin suunniteltua kaupallista ohjelmaa nimeltä BISAR, joka on öljy-yhtiö SHELLin kehittämä kerrosrakenneohjelma. Ohjelman toimivuus on tarkistettu toisella kerrosrakenneohjelmalla (NOAH), sekä soveltuvien osin analyttisin ratkaisuin sekä numeerisesti (FEM). Maamateriaali käyttäytyy penkereen käyttötarkoituksesta riippumatta samalla tavalla, kun kuormitus on samanlainen. Tämä mahdollistaa tierakenteen analysointia varten kehitetyn ohjelman käyttämisen ratarakenteen toiminnan analysoinnissa.

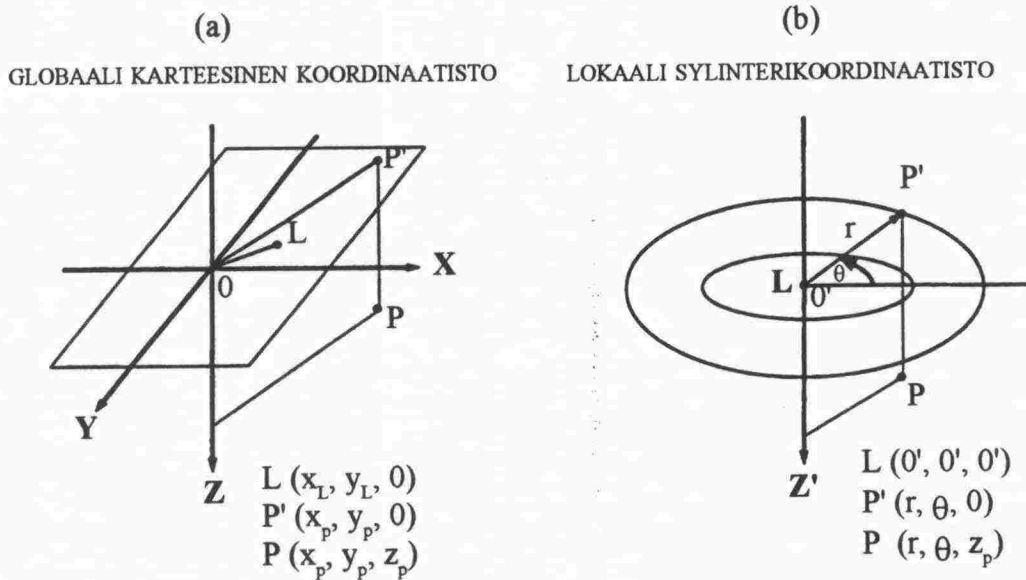
6.2 Kerrosrakennemallin koordinaatistoista

Kerrosrakenneohjelmat perustuvat oletukseen puoliäärettömästä kimmoisesta maamassasta, missä pyörähdysymmetrinen kuormitus sijaitsee maan pinnalla (kuva 6.2:1). Ratapenkereen idealisointi vaakasuuntaan äärettömän laajoiksi kerroksiksi ei täten huomioi penkereen reunan läheisyyttä.



Kuva 6.2:1 Kimmoinen ympyräkuormitettu puoliäärettömyys.

Paikallisena laskentakoordinaatistona käytetään sylinterikoordinaatistoa (kuva 6.2:2b). Tämän takia kuormitus on annettava ympyräkuormituksena. Käyttäjälle BISAR näyttäytyy karteesisissa koordinaatistossa (kuva 6.2:2a).



Kuva 6.2:2 (a) Globaalin karteesisen ja (b) lokaalin sylinterikoordinaatiston yhteys (BISAR 1995).

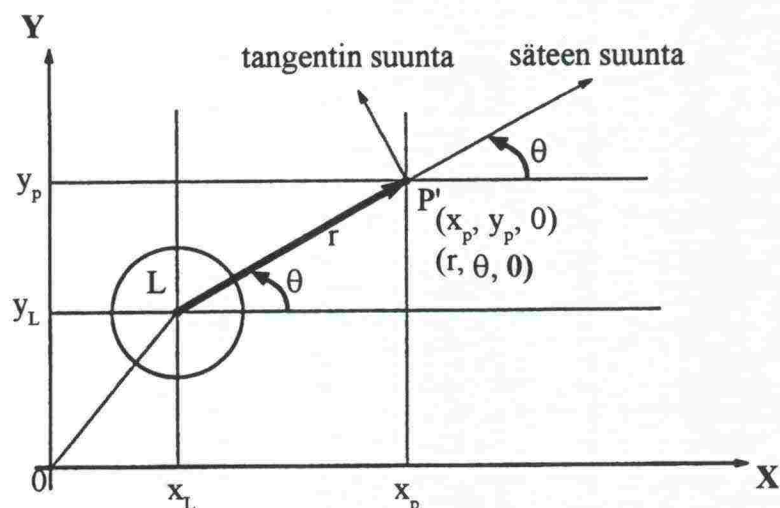
Kartesisisessa koordinaatistossa paikan määrittäminen tapahtuu x , y ja z -arvoilla. Sylinterikoordinaatistossa paikan määrittäminen tapahtuu vastaavasti z , θ ja r avulla. Merkkien selitykset käyvät ilmi kuvasta 6.2:2. Karteesisten ja sylinterikoordinaattien yhteys esitetään yhtälöillä 6.2:1 – 6.2:3.

$$x = r \cos \theta \quad (6.2:1)$$

$$y = r \sin \theta \quad (6.2:2)$$

$$z = z \quad (6.2:3)$$

Yhtälöt 6.2:1 ja 6.2:2 olettavat lokaalin sylinterikoordinaatiston nollakohdan sijaitsevan globaalissa nollakohdassa. Muussa tapauksessa yhtälöihin 6.2:1 ja 6.2:2 globaalien koordinaatiston puolelle on lisättävä lokaalin koordinaatiston siirtotermit x_L ja y_L (kuva 6.2:3). Kuvassa 6.2:2 esiintyvä L merkitsee ympyräkuormituksen keskipistettä, P ja P' ovat tutkittavien pisteiden koordinaatit sekä O ja O' ovat globaalien ja lokaalin koordinaatiston origot. Kuvassa 6.2:3 esitetään globaalien ja lokaalin koordinaatiston yhteys globaalien koordinaatiston X - Y tasossa sekä lokaalin sylinterikoordinaatiston säteen ja tangentin suunnat.



Kuva 6.2:3 Globaalien ja lokaalin koordinaatiston yhteys sekä lokaalin koordinaatiston säteen ja tangentin suunta (BISAR 1995).

Edellä esitetty globaali- ja lokaalikoordinaatisto ovat kerrosrakenneohjelmasta riippumattomia. Kuitenkin käytetyt globaalien koordinaatiston koordinaattiakselien positiiviset suunnat saattavat vaihdella ohjelmasta toiseen.

6.3 Käytetty teoria

Kerrosrakeneohjelmat olettavat maamassan kyseisen kerroksen osalta homogeeniseksi ja useimmissa tapauksissa isotrooppiseksi. Joissakin ohjelmissa kuten NOAH, pohjamaan eli viimeisen kerroksen isotrooppisuus on mahdollista muuttaa anisotrooppiseksi. Kerrosrakeneohjelmien perusyhtälönä voidaan pitää Burmisterin vuonna 1943 kehittämää jännitysfunktiota (yhtälö 6.3:1), jonka avulla voidaan laskea monikerroksisen rakenteen i:nnen isotrooppisen kerroksen jännitykset ja siirtymät. Tällöin ylimmän kerroksen kuormituksena on a-säteinen ympyräkuorma.

$$\phi_i = pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i e^{mz} - B_i e^{-mz} + zC_i e^{mz} - zD_i e^{-mz}] dm \quad (6.3:1)$$

Sylinterikoordinaatistossa voidaan määrittää jännitysfunktiota hyväksikäyttäen vertikaalinen, säteinen ja tangentialinen normaalijännitys yhtälöillä 6.3:2, 6.3:3 ja 6.3:4.

$$\begin{aligned} \sigma_z = pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} - C_i m(1 - 2\nu_i - mz)e^{mz} + \\ D_i m(1 - 2\nu_i + mz)e^{-mz}] dm \end{aligned} \quad (6.3:2)$$

ja

$$\begin{aligned} \sigma_r = -pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + 2\nu_i - mz)e^{mz} \\ - D_i m(1 + 2\nu_i - mz)e^{-mz}] dm + pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr} [A_i m^2 e^{mz} + \\ B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}] dm \end{aligned} \quad (6.3:3)$$

sekä

$$\sigma_{\theta} = -pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [C_i m e^{mz} - D_i m e^{-mz}] 2\nu_i dm$$

$$\begin{aligned}
& -pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr} [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1+mz)e^{mz} \\
& - D_i m(1-mz)e^{-mz}] dm
\end{aligned} \tag{6.3:4}$$

Leikkausjännitys kaarevassa tasossa θz suuntaan z on määritetty yhtälöllä 6.3:5.

$$\begin{aligned}
\tau_{rz} = & -pa \int_0^{\infty} J_1(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} - B_i m^2 e^{-mz} - C_i m(2-4\nu_i - mz)e^{mz} \\
& - D_i m(2-4\nu_i + mz)e^{-mz}] dm
\end{aligned} \tag{6.3:5}$$

Siirtymät saadaan laskettua yhtälöillä 6.3:6 ja 6.3:7. Tällöin pystysuuntaisesta siirtymästä käytetään merkintää w .

$$\begin{aligned}
w = & \frac{1+\nu_i}{E_i} pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i m^2 e^{mz} - B_i m^2 e^{-mz} - C_i m(2-4\nu_i - mz)e^{mz} \\
& - D_i m(2-4\nu_i + mz)e^{-mz}] dm
\end{aligned} \tag{6.3:6}$$

ja säteen suuntaisesta vastaavasti merkintää u .

$$\begin{aligned}
u = & -\frac{1+\nu_i}{E_i} pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{m} [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1+mz)e^{mz} \\
& - D_i m(1-mz)e^{-mz}] dm
\end{aligned} \tag{6.3:7}$$

Yhtälöissä 6.3:1 – 6.3:7 esiintyvien merkkien selitykset ovat:

- a = tasaisesti jakaantuneen ympyräkuorman säde
 p = vertikaalisen jännityksen arvo

r	=	säteen suuntainen etäisyys sylinterikoordinaatistossa
z	=	syvyys
σ_z	=	vertikaalinen normaalijännitys
σ_r	=	säteen suuntainen normaalijännitys
σ_θ	=	kaarevuuden mukainen normaalijännitys
τ_{rz}	=	leikkausjännitys kaarevassa tasossa θz suuntaan z
w	=	vertikaalinen siirtymä
u	=	säteen suuntainen siirtymä
E_i	=	i :nen kerroksen kimmomoduuli
ν_i	=	i :nen kerroksen Poissonin luku
$A_i \dots D_i$	=	reunaehtojen määrittämät tuntemattomat parametrit
J_0	=	nollannen asteen Besselin funktio
J_1	=	ensimmäisen asteen Besselin funktio
m	=	integrointiparametri

6.4 Kuormituksen antaminen laskentamalliin

BISAR -ohjelman laskentamalli ei ota huomioon radan rakenteesta muuta kuin alusrakenteen ja päällysrakenteesta raiteen tukikerroksen. Kuormitus annetaan tällöin ratapölkyn alapinnassa vaikuttavana paineena tai vastaavasti voimana ja pinta-alana. Tällöin ratapölkyn alapinta on laskennan nollataso eli laskennan nollataso on 225 mm korkeusviivasta (Kv) alaspäin. Laskenta ei täten ota huomioon ratapölkyn alapinnan yläpuolella olevaa tukikerroksen osaa.

BISAR-laskentaa varten on ratapölkyn tehollinen pinta-ala määritetty yhtälöllä 6.4:1.

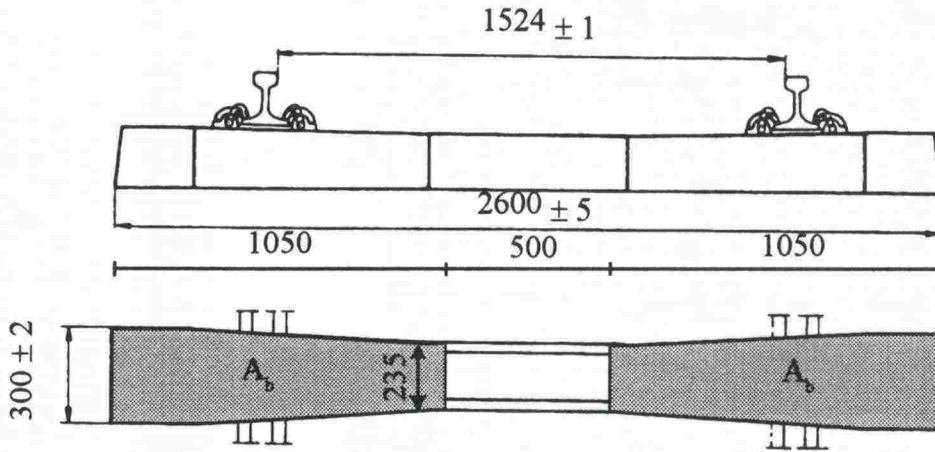
$$A_b = (l - m)b \quad (6.4:1)$$

missä

A_b	=	ratapölkyn tehollinen pinta-ala
b	=	ratapölkyn leveys
l	=	ratapölkyn pituus
m	=	ratapölkyn keskiosalla olevan alueen pituus, jonka matkalla ratapölkyn alapinnan ja tukikerroksen välillä ei otaksuta vaikuttavan kosketuspainetta

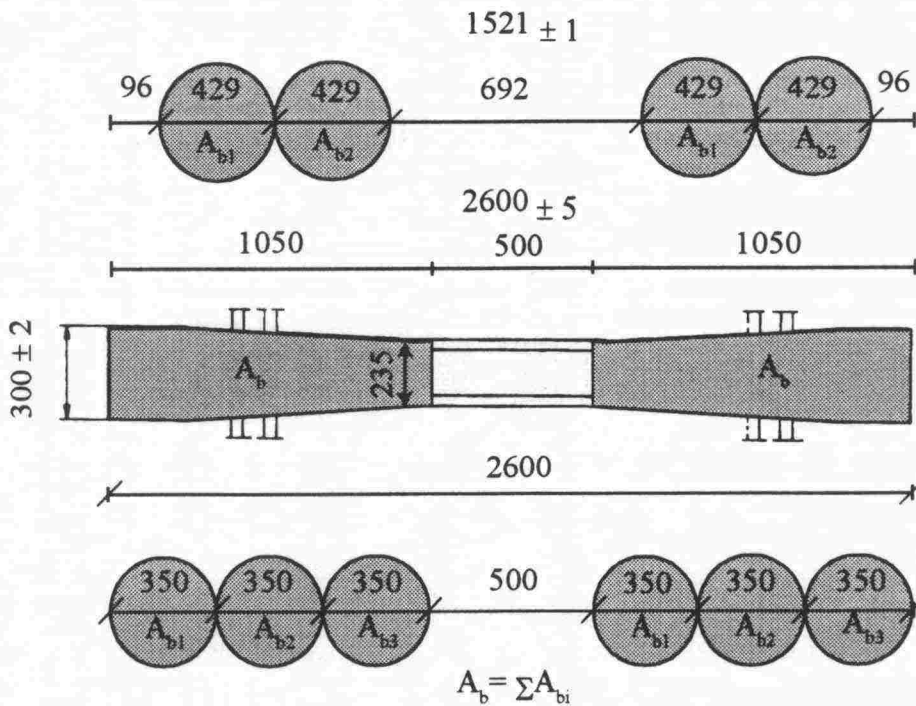
Tämän tutkimuksen yhteydessä mittana m kaavassa 6.4:1 on käytetty 500 mm eli pölkyn todellisesta pinta-alasta on vähennetty pölkyn keskeltä 500 mm pituinen kaista \times

pölkyn leveys. Mitalle m on monissa yhteyksissä käytetty myös arvoa 600 mm, mutta syvemmällä ratapenkereessä vaikuttavien jännitysten ja muodonmuutosten jakautumisen kannalta näiden otaksumien välinen ero on hyvin vähäinen.



Kuva 6.4:1 Ratapölkyn BP 89 tehollinen pinta-ala (Puikkonen 1989 ja Gåsemyr 1996).

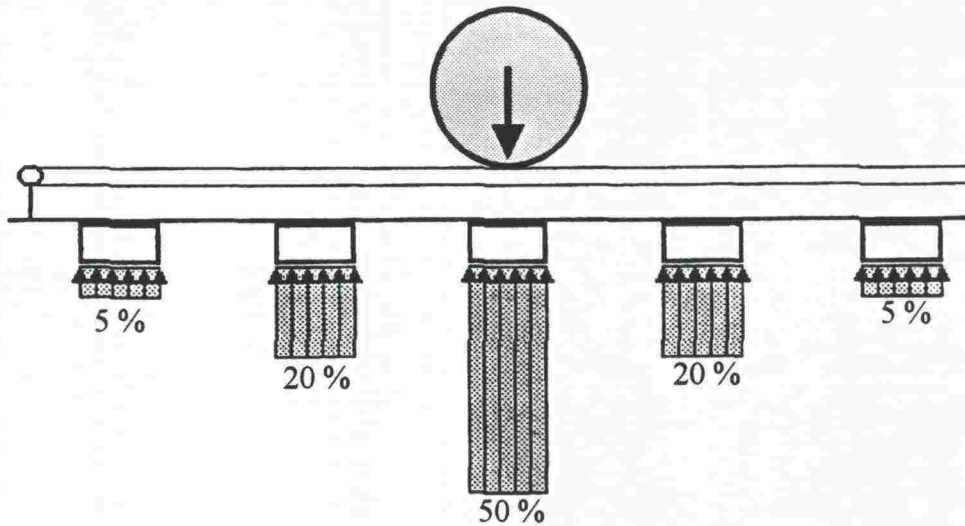
BISAR -ohjelmassa kuormitus annetaan ympyräkuormituksena. Samanaikaisia ympyräkuormituksia on mahdollista antaa maksimissaan 10 kpl. Lineaarinen kimmoteoria mahdollistaa jännitysten ja venymien yhteenlaskemisen. Suurempien ympyräkuormalukumäärien yhteenlasku on täten mahdollista esimerkiksi laskemalla tulokset yhteen taulukkolaskentaohjelmassa. Tässä mallinnustehtävässä päädyttiin käyttämään kahta ympyräkuormitusta vastaamaan pölkyn yhden pään tehokasta pinta-alaa A_b (kuva 6.4:2).



Kuva 6.4:2 Ratapölkyn tehokkaan pinta-alan mallintaminen erilaisilla ympyräkuormilla sekä laskennassa käytetty konfiguraatio (ylimmäinen ympyräkuormakonfiguraatio).

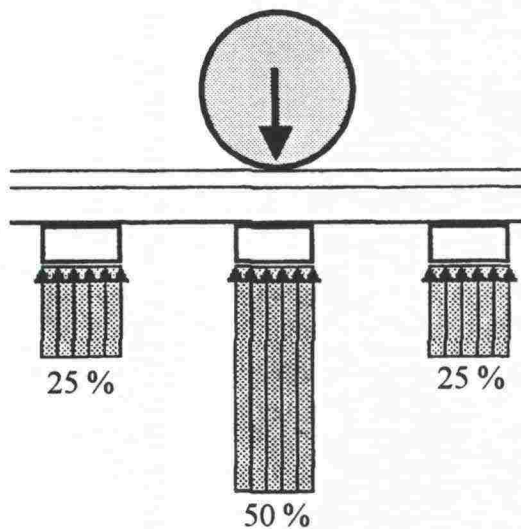
Laskennan alussa varioitiin erilaisia ympyräkuormakonfiguraatioita. Kahden ympyräkuorman antaman tuloksen todettiin käytännössä olevan ensimmäisten venymäantureiden syvyydellä sama kuin kolmen ympyräkuorman antama tulos.

Riessbergerin (1998) mukaan kuormituksen voidaan otaksua jakaantuvan radan pituussuunnassa peräkkäisille pölkyille kuvan 6.4:3 mukaisesti. Kuvassa 6.4:3 pyöräkuorma sijaitsee keskimmäisen pölkyn yläpuolella.



Kuva 6.4:3 Pyöräkuorman otaksuttu jakaantuminen radan pituussuunnassa Riessbergerin (1998) mukaan.

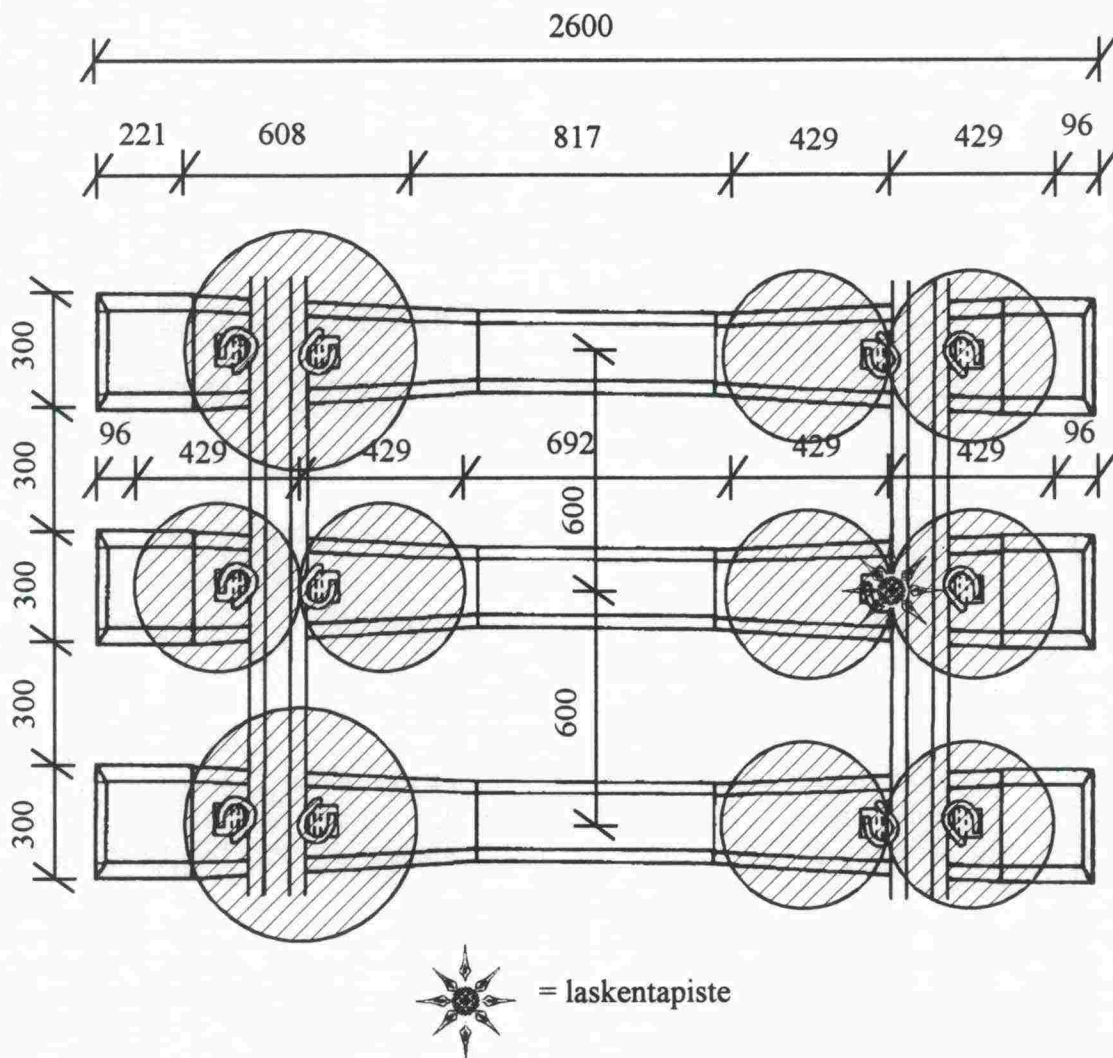
Raymondin (1985) mukaan kiskon pituussuuntainen pyöräkuorman jakaantuminen voidaan yksinkertaistaa kuvan 6.4:4 mukaiseksi. Se, kumpi otaksumista vastaa paremmin todellisuutta, riippuu luonnollisesti kiskon karakteristisesta pituudesta, johon vaikuttavat mm. käytetty pölkkyväli, kiskon taivutusjäykkyys ja alla olevan ratapenkereen jäykkyys.



Kuva 6.4:4 Yksinkertaistettu otaksuma pyöräkuorman jakautumisesta radan pituussuunnassa (Raymond 1985)

Kuvien 6.4:3 ja 6.4:4 mukaisissa otaksumissa pyöräkuorman jakautumisesta ei oteta huomioon peräkkäisten akselin yhteisvaikutusta. Kappaleessa 5.6 esitetyn tarkastelun perusteella otaksuma peräkkäisten akselien erillisestä vaikutuksesta pitäneeikin kohtuullisen hyvin paikkansa instrumentointikohteen ratapenkereen ylä- ja keskiosan osalta, mutta todellisuudessa ratapenkereen alaosassa ja pohjamaassa peräkkäisten akselien vaikutus oletettavasti summautuu jossain määrin.

Edellä esitetyn perusteella BISAR –mallinnuksen lähtökohdaksi otetaan kuvan 6.4:5 mukainen pölkyn alapinnan tasossa vaikuttava ympyräkuormakonfiguraatio. Akselipainon otaksutaan jakautuvan peräkkäisille pölkyille Raymondin esittämällä tavalla (kuva 6.4.4) ja samanaikaisesti laskennassa otetaan huomioon vain yksi akseli. Akselipainona käytetään mitattuja dynaamisia pyörävoimia vastaavaa kvasistaattista akselipainoa. Jännitysten ja venymien laskenta suoritetaan kuvan 6.4:5 osoittamassa pisteessä kiskon alapuolella.



Kuva 6.4:5 Ympyräkuormakonfiguraatio ja laskentapisteen sijainti.

6.5 Laskentakerrosten paksuudet sekä käytetyt moduuliarvot 250 kN akselipainolla

Instrumentoidun ratapenkereen kerrokset voidaan jakaa karkeasti ylhäältä alaspäin seuraavasti:

- Tukikerros (raidesepele)
- Hiekkakerros
- Sorakerros
- Pohjamaa (savi)

Penkereessä esiintyvät kerrosrajat ja -paksuudet eivät ole yksiselitteisiä (vrt kappale 2.2.3 ja 4.2), joten niitä on jouduttu yksinkertaistamaan laskennassa. Kuvassa 6.5:1 esitetään skemaattinen pengeri, missä havaitaan soran otaksuttu painuminen ja mahdollinen sekoittuminen pohjamaahan.



Kuva 6.5:1 Skemaattinen pengeri.

Kuvan 6.5:1 skemaattista pengertä vastaava laskentamalli on esitetty kuvassa 6.5:2. Kuvan 6.5:1 maakerrokset on jaettu ns. alikerrokseen kuvassa 6.5:2. Tämä mahdollistaa kuvan 6.5:1 maakerrosten moduulien tarkemman arvioinnin. Moduulit on arvioitu yhtälöllä 4.2:1. Moduuliarvot on saatu iteroimalla vallitsevaa jännitystilaa. Jännitystilan muuttaminen mahdollistaa uusien moduuliarvojen laskemisen yhtälöllä 4.2:1. Uudet moduuliarvot ovat tämän jälkeen sijoitettu laskentaohjelmaan (BISAR), jonka avulla saadaan laskettua uudet jännitykset. Lopulliset moduuliarvot saadaan silloin, kun BISAR-laskennan perusteella saatujen jännitysten sijoittaminen yhtälöön 4.2:1 ei enää mainittavasti muuta moduuliarvoja. Iterointiin riitti 3 laskentakierrosta eli suppenevuus oli erinomainen. Moduulien laskennassa on otettu huomioon sekä akselikuorma että maakerrosten omapaino. Kiskon ja pölkyjen osuutta on arvioitu moduuliarvojen pyöristyksissä. Moduuliarvot on laskettu kerrosten puolivälissä eli ne edustavat kunkin kerroksen keskimääräistä moduuliarvoa.

Saven moduuliarvoksi (kuva 6.5:2) on arvioitu Resonant Column ja Bender Element mittausten perusteella (kappale 4.3.2) 40 MPa. Jäykkyydeltään alhaisen kerroksen päällä olevan kerroksen moduuliarvo on Sweeren (1990) mukaan 1,5 – 7,5 alla olevan kerroksen moduuliarvo. Laskennassa soran moduuliarvona on käytetty $4 \times E_{\text{savi}}$ eli 160 MPa, vaikka yhtälön 4.2:1 mukaisesti moduuliarvolle saataisiinkin jonkin verran tätä suurempia arvoja. Moduuliarvojen määrittämisessä on käytetty kaikissa kerroksissa

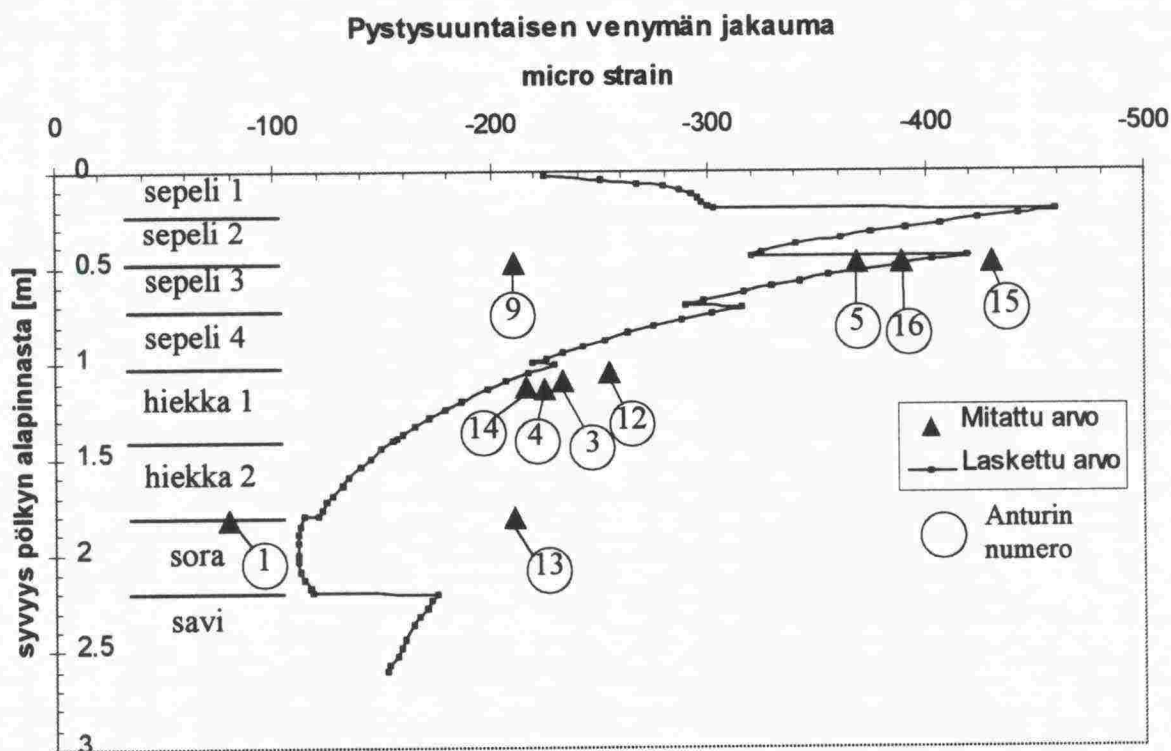
Poissonin luvulle arvoa 0,30, paitsi pohjamaan osalle on käytetty suljetun tilan arvoa 0,5.

sepeli 1	$E = 400 \text{ MPa}$	200
sepeli 2	$E = 250 \text{ MPa}$	250
sepeli 3	$E = 175 \text{ MPa}$	250
sepeli 4	$E = 155 \text{ MPa}$	300
hiekkä 1	$E = 145 \text{ MPa}$	400
hiekkä 2	$E = 145 \text{ MPa}$	400
sora	$E = 160 \text{ MPa}$	400
savi	$E = 40 \text{ MPa}$	

Kuva 6.5:2 Laskentamallin kerrospaksuudet sekä käytetyt moduuliarvot.

6.6 Laskettujen ja mitattujen arvojen vertailu 250 kN akselipainolla

BISAR -ohjelmalla lasketut ja instrumentointikohteesta mitatut pystysuuntaisen venymän arvot on esitetty kuvassa 6.6:1. Kuvan 6.6:1 mukaisessa laskennassa maakerrosten parametreinä on käytetty kuvan 6.5:2 mukaisia moduuliarvoja.



Kuva 6.6:1 Pystysuuntaisen venymän mitatut ja lasketut arvot. Anturin numerot on ympyröity. Laskennassa on käytetty kuvan 6.5:2 parametreja.

Kuvasta 6.6:1 havaitaan mitattujen ja laskettujen arvojen varsin hyvä yhteneväisyys. Anturin nro 9 antama venymäarvo ei kuitenkaan vastaa muiden samassa tasossa olevien antureiden antamia arvoja. Sorassa olevista antureista, anturit nro 1 ja 13, ei tämän tarkastelun perusteella pysty arvioimaan kumman antama tulos on luotettavampi. Antureiden sijainti ratapenkereessä on esitetty kappaleessa 2.2.2.

Ratapölkyn liike BISAR-laskennan laskentapisteessä (kuva 6.4:5) on taulukon 6.6:1 mukainen. Ratapölkyn pystysuuntaisen liikkeen arvot on mitattu pölkyn molemmista päistä sekä keskeltä. Taulukossa 6.6:1 esitetään mitatut maksimi-arvot sekä pölkyn reunan ja keskikohtan arvoista lineaarisesti interpoloitu BISAR-laskentapistettä vastaava arvo.

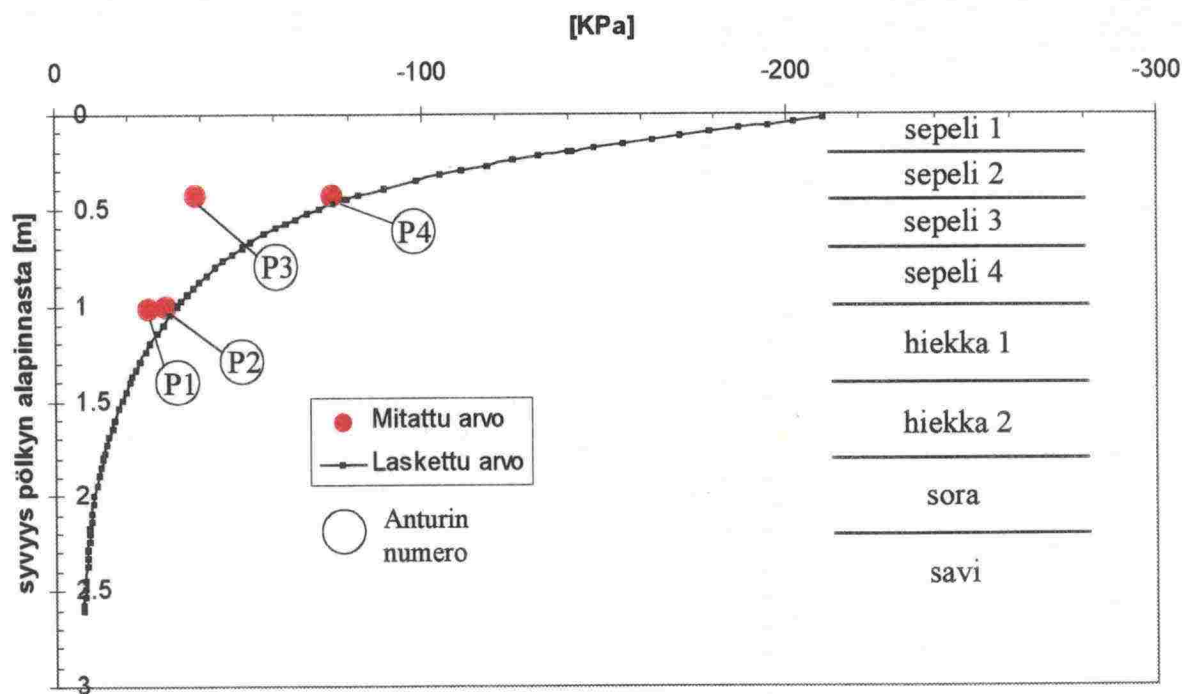
Taulukko 6.6:1 Laskettu ja mitattu pölkyn pystysuuntainen liike.

	Mitattu arvo (maksimi)			Laskettu arvo (maksimi)	
	Pölkyn ulompi pää	Pölkyn keskikohta	Pölkyn sisempi pää	Lineaarinen interpolointi	BISAR-laskenta
Pölkyn pystysuuntainen maksimiliike [mm]	-1,746	-1,489	-1,935	ulompi-keski -1,642 sisempi-keski -1,755	-1,32

Taulukossa 6.6:1 esitettyjen mitattujen ja laskettujen pölkyn pystysuuntaisten liikkeiden erot selittynevät ainakin osittain kuvalla 4.5:8, josta ilmenee pehmeästä pohjamaasta johtuva peräkkäisten akseliylitysten vaikutuksen kumuloituminen mitatussa pölkyn liikkeessä.

Venymien lisäksi BISAR-laskennasta saadaan myös jännitykset eri syvyyksiltä. Kuvassa 6.6:2 esitetään mitattujen ja laskettujen arvojen vertailu eri syvyyksillä. Kuvasta havaitaan laskettujen ja mitattujen arvojen erittäin hyvä yhteneväisyys kaikkien muiden kuin anturin P3 osalta.

Pystysuuntainen jännitysjaakauma junasta



Kuva 6.6:2 Laskettujen ja mitattujen pystysuuntaisten jännitysten vertailu 250 kN akselikuormalla.

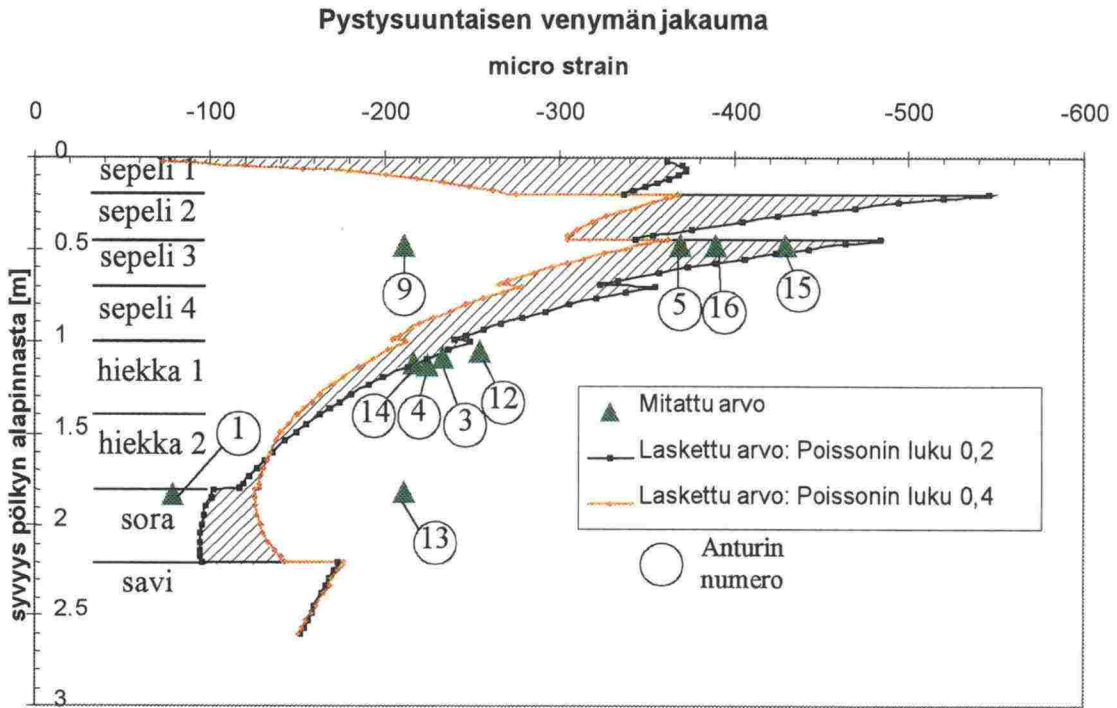
6.7 Laskentatuloksen herkkyys Poissonin luvulle 250 kN akselipainolla

Laskennassa käytettyjen moduuli-arvojen herkkyyttä Poissonin luvun arvioinnissa mahdollisesti tapahtuneelle virheelle tarkastellaan kuvassa 6.7:1. Tällöin Poissonin luvun oletetaan vaihtelevan 0,2 ja 0,4 välillä. Pohjamaan saven Poissonin luvun otaksutaan pysyvän arvossa 0,5. Soralle ja savelle saadaan nyt kuvan 6.5:2 mukaiset moduuli-arvot.

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓		
↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓		
sepeli 1	E = 384 MPa	E = 411 MPa
sepeli 2	E = 234 MPa	E = 261 MPa
sepeli 3	E = 159 MPa	E = 184 MPa
sepeli 4	E = 142 MPa	E = 165 MPa
hiekkä 1	E = 135 MPa	E = 151 MPa
hiekkä 2	E = 135 MPa	E = 154 MPa
sora	E = 160 MPa	E = 160 MPa
savi	E = 40 MPa	E = 40 MPa
	$\nu = 0,2$	$\nu = 0,4$
	paitsi pohjamaa $\nu = 0,5$	paitsi pohjamaa $\nu = 0,5$

Kuva 6.7:1 Poissonin luvun arvoja 0,2 ja 0,4 vastaavat moduuli-arvot.

Kuvan 6.7:1 mukainen moduuliarvojen ja Poissonin luvun vaihtelu aiheuttaa vastaavasti kuvan 6.7:2 mukaisen vaihtelun lasketuissa pystysuuntaisissa venymissä.



Kuva 6.7:2. Pystysuuntaisen venymän vaihtelualue, kun Poissonin luku vaihtelee 0,2 ja 0,4 välillä.

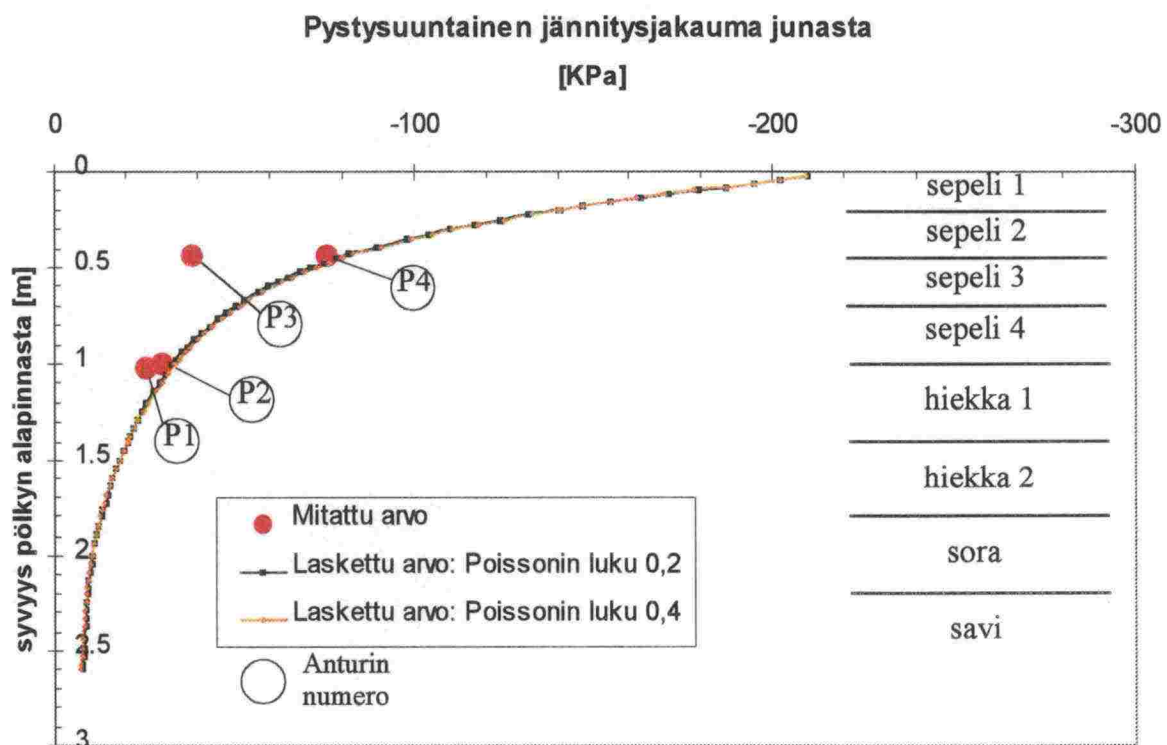
Rakennekerrosten Poissonin luvun vaihtelun vaikutus näyttäisi olevan suurin penkereen ylimmissä kerroksissa. Anturin nro 9 mittaustulosta ei voida selittää kuvalla 6.7:2. Anturien nro 1 ja 13 antamien lukemien oikeellisuus jää myös avoimeksi tällä tarkastelulla.

Ratapölkyn pystysuuntainen liike saa nyt taulukon 6.7:1 mukaisia arvoja.

Taulukko 6.7:1 Laskettu ja mitattu pölkyn pystysuuntainen liike.

	Mitattu arvo (maksimi)			Laskettu arvo (maksimi)		
	Pölkyn ulompi pää	Pölkyn keskikohta	Pölkyn sisempi pää	Lineaarinen interpolointi	BISAR-laskenta	
Pölkyn pystysuuntainen maksimiliike [mm]	-1,746	-1,489	-1,935	ulompi-keski -1,642 sisempi-keski -1,755	$\nu=0,2$ -1,38	$\nu=0,4$ -1,27

Myös kerrosrakennemallin jännitykset riippuvat Poissonin luvusta (yhtälö 6.3:2). Tällöin jännitys jakaumat Poissonin luvuilla 0,2 ja 0,4 voidaan esittää kuvalla 6.7:3.

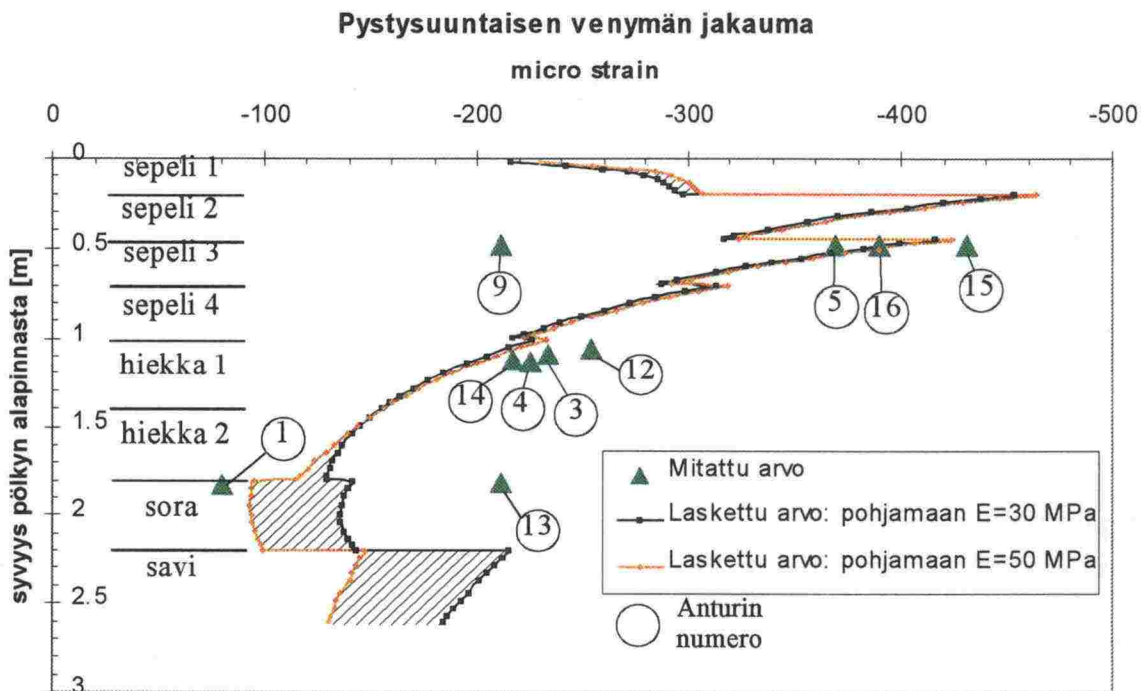


Kuva 6.7:3. Poissonin luvun vaihtelun vaikutus laskettuihin jännityksiin.

Kuvasta 6.7:3 havaitaan Poissonin luvun vähäinen vaikutus jännitys jakaumaan.

6.8 Laskentatuloksen herkkyyden pohjamaan moduularvolle 250 kN akselipainolla

Koetulosten perusteella pohjamaan moduularvon mahdolliseksi vaihtelualueeksi otaksuttiin 30 - 50 MPa. Pohjamaan moduularvon muuttaminen vaikuttaa myös sorakerroksen moduularvoihin ($E_{\text{sora}} = 4 \times E_{\text{savi}}$). Kuvassa 6.8:1 esitetään pohjamaan ja sorakerroksen moduularvojen vaihtelun vaikutus laskettuihin pystysuuntaisiin venymiin. Poissonin luku on kaikilla kerroksilla jälleen 0,3 paitsi pohjamaalla 0,5.



Kuva 6.8:1. Pystysuuntaisen venymän vaihtelualue, kun pohjamaan moduularvo vaihtelee 30 ja 50 MPa välillä.

Kuvasta 6.8:1 havaitaan pohjamaan sekä sorakerroksen moduularvon vaihtelun vaikuttavan lähinnä näihin kerroksiin.

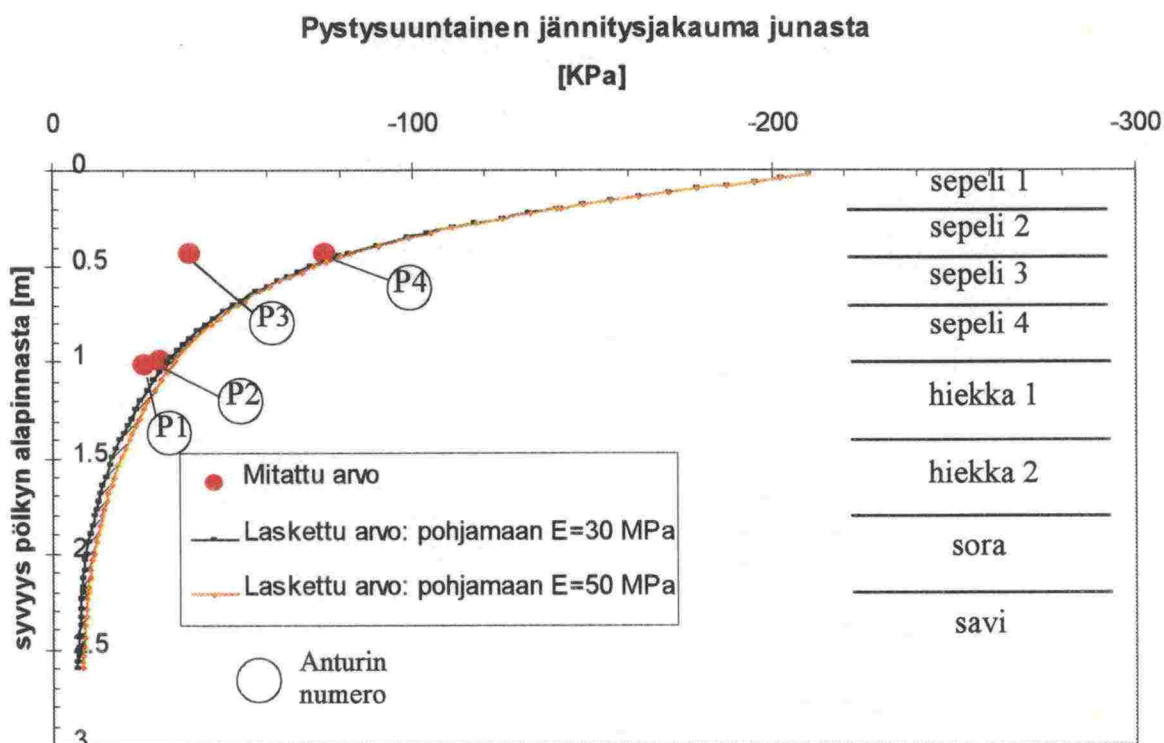
Pohjamaan ja sorakerroksen moduularvojen muuttaminen vaikuttaa taulukon 6.8:1 mukaisesti ratapölkyn pystysuuntaiseen liikkeeseen.

Taulukko 6.8:1 Laskettu ja mitattu pölkyn pystysuuntainen liike.

	Mitattu arvo (maksimi)			Laskettu arvo (maksimi)		
	Pölkyn ulompi pää	Pölkyn keskikohta	Pölkyn sisempi pää	Lineaarinen interpolointi	BISAR-laskenta	
Pölkyn pystysuuntainen maksimiliike [mm]	-1,746	-1,489	-1,935	ulompi-keski -1,642 sisempi-keski -1,755	<u>E=30</u> <u>MPa</u>	<u>E=50</u> <u>MPa</u>
					-1,54	-1,18

Taulukosta 6.8:1 selviää erittäin hyvin, kuinka pohjamaan moduularvon muuttaminen vaikuttaa laskettuun pölkyn liikkeeseen.

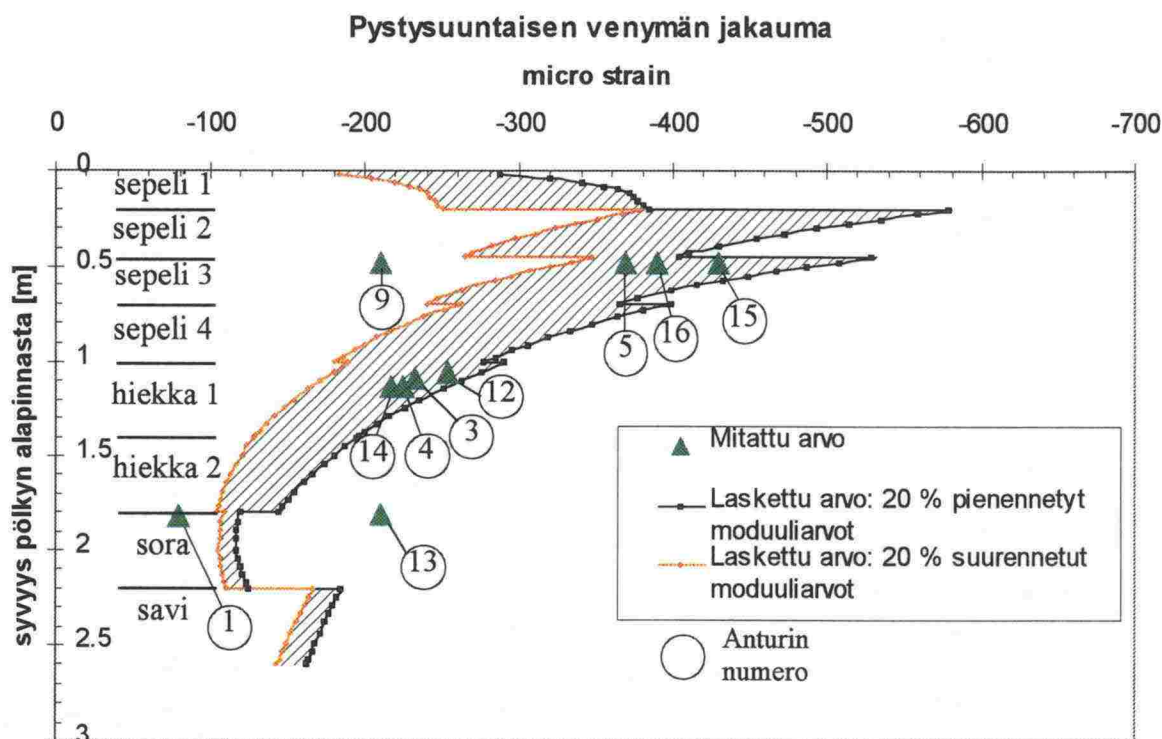
Pohjamaan moduularvojen muuttaminen vaikuttaa vastaavasti laskettuihin jännityksiin kuvan 6.8:2 mukaisesti.



Kuva 6.8:2. Pohjamaan moduularvon vaihtelun vaikutus laskettuihin jännityksiin.

6.9 Laskentatuloksen herkkyys kerrosmateriaalien moduularvoille 250 kN akselipainolla

Laskennan tuloksena saatavien venymäarvojen herkkyyttä kerrosmateriaalien moduularvoille tarkastellaan suurentamalla sekä pienentämällä kuvan 6.5:2 moduularvoja 20 %. Pohjamaan saven moduularvona käytetään 40 MPa ja sorakerrokselle vastaavana arvona käytetään 160 MPa. Poissonin luku on kaikissa tapauksissa 0,3 paitsi pohjamaalle 0,5. Kuvassa 6.9:1 esitetään pystysuuntaisen venymän jakauma syvyyden mukaan erilaisilla kerrosmateriaalien moduularvoilla.



Kuva 6.9:1. Pystysuuntaisen venymän vaihtelualue, kun rakennekerrosten moduularvoja on muutettu -20 % ja + 20 % kaikkien muiden paitsi sorakerroksen osalta.

Kuvasta 6.9:1 havaitaan, kuinka kaikki muut anturit paitsi nrot 1, 9 ja 13 sopivat mallinnetulle alueelle. Ylempien kerrosten moduularvojen muuttaminen ei vaikuta paljoa sora- ja hiekkakerrosten pystysuuntaisiin venymiin.

Rakennekerrosten moduularvojen muuttaminen vaikuttaa laskettuun ratapölkyn liikkeeseen taulukon 6.9:1 mukaisesti.

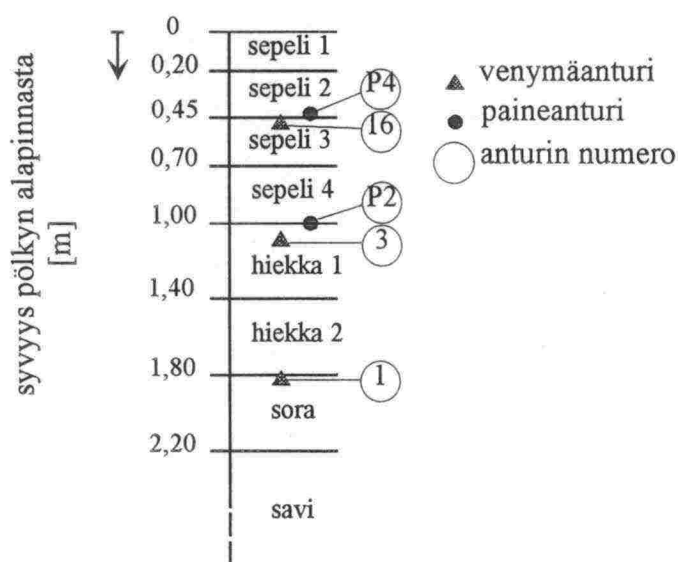
Taulukko 6.9:1 Laskettu ja mitattu pölkyn pystysuuntainen liike.

	Mitattu arvo (maksimi)			Laskettu arvo (maksimi)		
	Pölkyn ulompi pää	Pölkyn keskikohta	Pölkyn sisempi pää	Lineaarinen interpolointi	BISAR-laskenta	
Pölkyn pystysuuntainen maksimiliike [mm]	-1,746	-1,489	-1,935	Ulompi-keski -1,642 sisempi-keski -1,755	<u>E</u> - 20 %	<u>E</u> +20 % -1,21

Perustapaukseen verrattuna moduuliarvojen pienentäminen suurentaa laskettua pölkyn painumaa suhteellisesti enemmän (+12,2 %) kuin moduuliarvojen suurentaminen pienentää laskettua pölkyn painumaa (-8,3 %). Moduuliarvojen muuttaminen vaikuttaa pystysuuntaiseen jännitysjakamaan vain nimellisesti, eikä sitä esitetä tässä yhteydessä graafisesti.

6.10 Akselipainon suuruuden vaikutus penkereen toimintaan

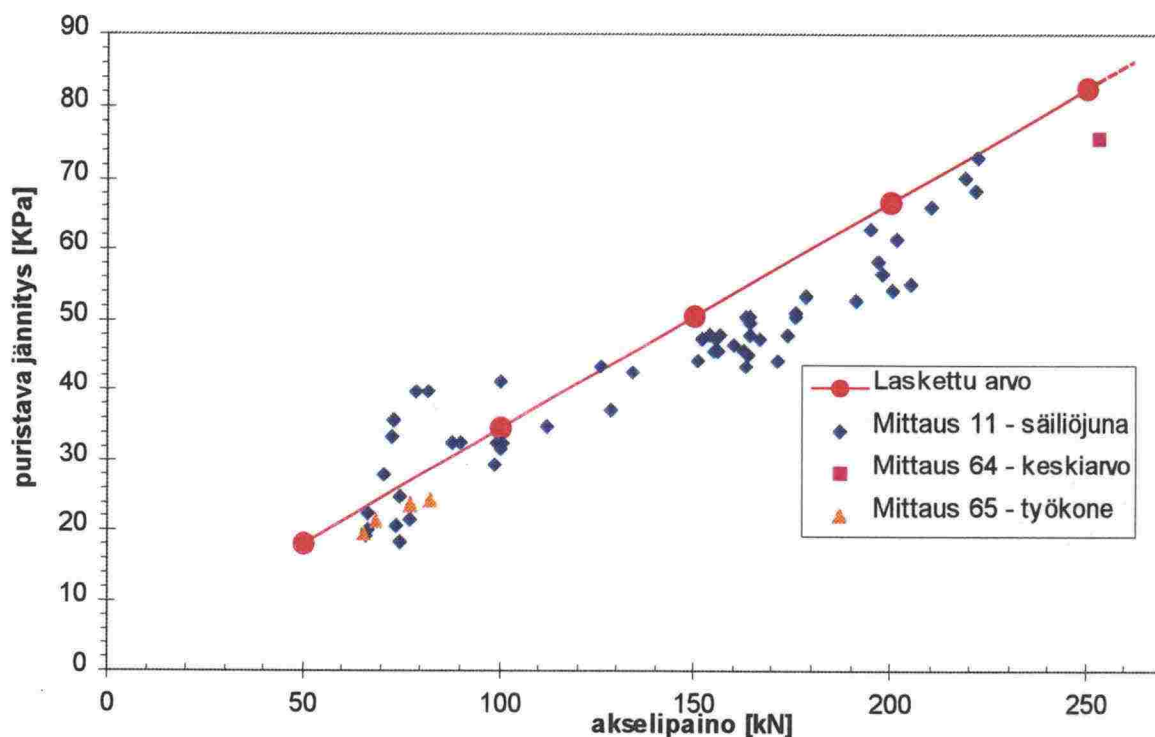
Akselipainon suuruuden vaikutusta penkereen toimintaan voidaan arvioida niin jännitysten kuin venymien perusteella. Tätä vaikutusta tarkastellaan kahden paineanturin osalta, nrot P2 ja P4, ja kolmen pystysuuntaisen venymäanturin osalta, nrot 1, 3 ja 16. Vertailussa tarkastellaan mittauksia nro 11, 64 ja 65. Mittauksessa nro 11 on säiliöjuna, joka omaa laajan skaalan erilaisia akselipainoja. Mittauksessa nro 64 on testijuna, jonka keskiarvoakselipainoksi saadaan 250 kN. Mittauksessa nro 65 on työkone, jolla akselipainot jäävät alle 100 kN. Tarkasteltavien venymä- ja paineantureiden sijainti pölkyn alapinnasta mitattuna esitetään kuvassa 6.10:1.



Kuva 6.10:1 Tarkasteltavien mittaussantureiden sijainti syvyyden mukaan.

Kuvassa 6.10:2 esitetään paineanturilla nro P4 mitattujen jännitysten ja BISAR-ohjelmalla laskettujen jännitysten vertailu erilaisilla akselipainoilla. Akselipainon vaikutuksen ekstrapolointiin pelkällä kimmoteoriaan perustavalla ohjelmalla on syytä suhtautua varovaisesti, sillä maamassa toimii suurilla eli >250 kN akselipainoilla enenevässä määrin kimmoplastisesti. Tämän takia akselipainon vaikutusta ei ole laskennallisestikaan haluttu arvioida 300 kN akselipainoon asti.

Anturi nro P4

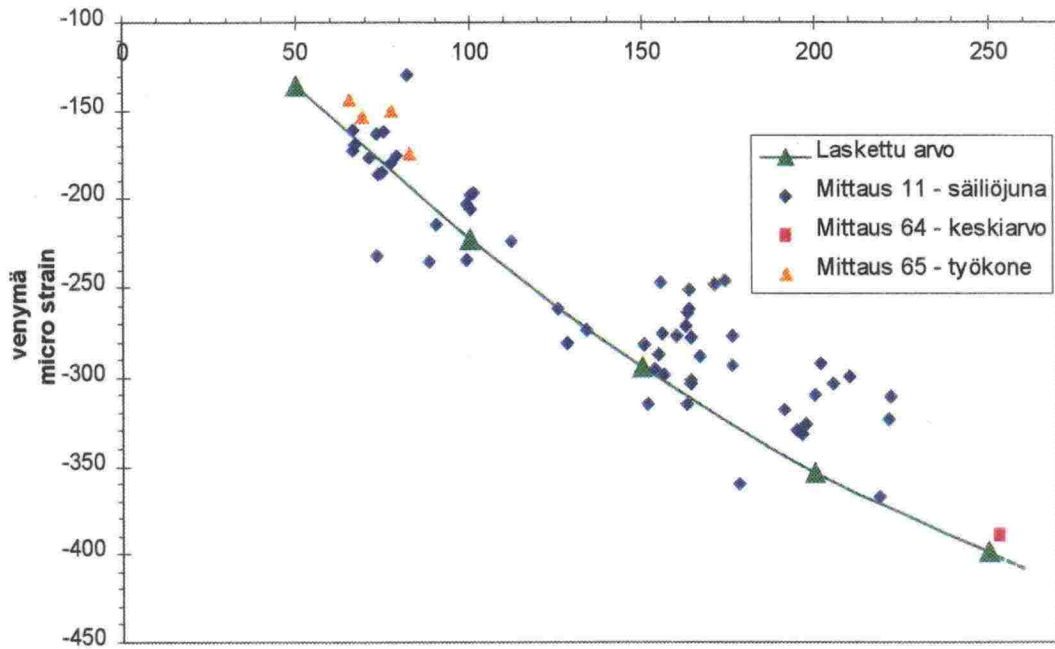


Kuva 6.10:2. Paineanturilla nro P4 mitattujen ja laskettujen jännitysten vertailu.

Kuvan 6.10:2 mitatut ja lasketut arvot näyttäisivät olevan varsin yhteneväiset. 250 kN ylimentävän akselipainon ja puristavan jännityksen suhdetta on merkitty katkoviivalla. Tämä katkoviiva on saatu ekstrapoloimalla 200 ja 250 kN akselipainojen välistä viivaa, eikä se ole muuta kuin suuntaa-antava.

Venymäanturi nro 16 sijaitsee paineanturin nro P4 kanssa lähes samalla syvyydellä (kuva 6.10:1). Venymäanturilla nro 16 mitattujen ja samalla syvyydellä laskettujen venymäarvojen vertailu on esitetty kuvassa 6.10:3.

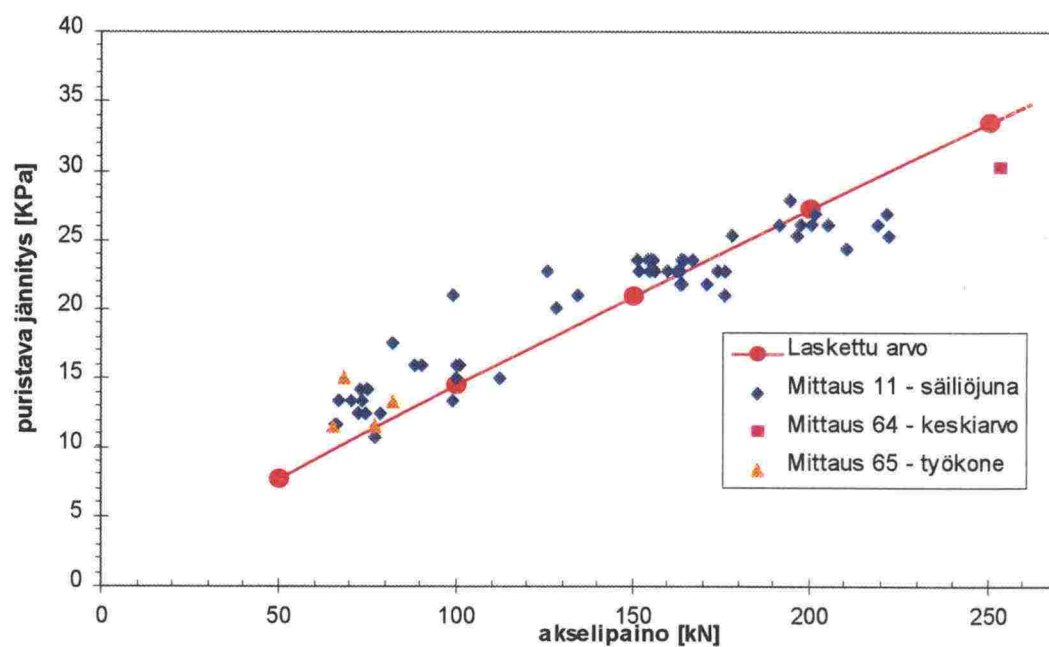
Anturi nro 16
akselipaino [kN]



Kuva 6.10:3. Venymäanturilla nro 16 mitattujen ja samalla syvyydellä laskettujen pystysuuntaisten venymien vertailu.

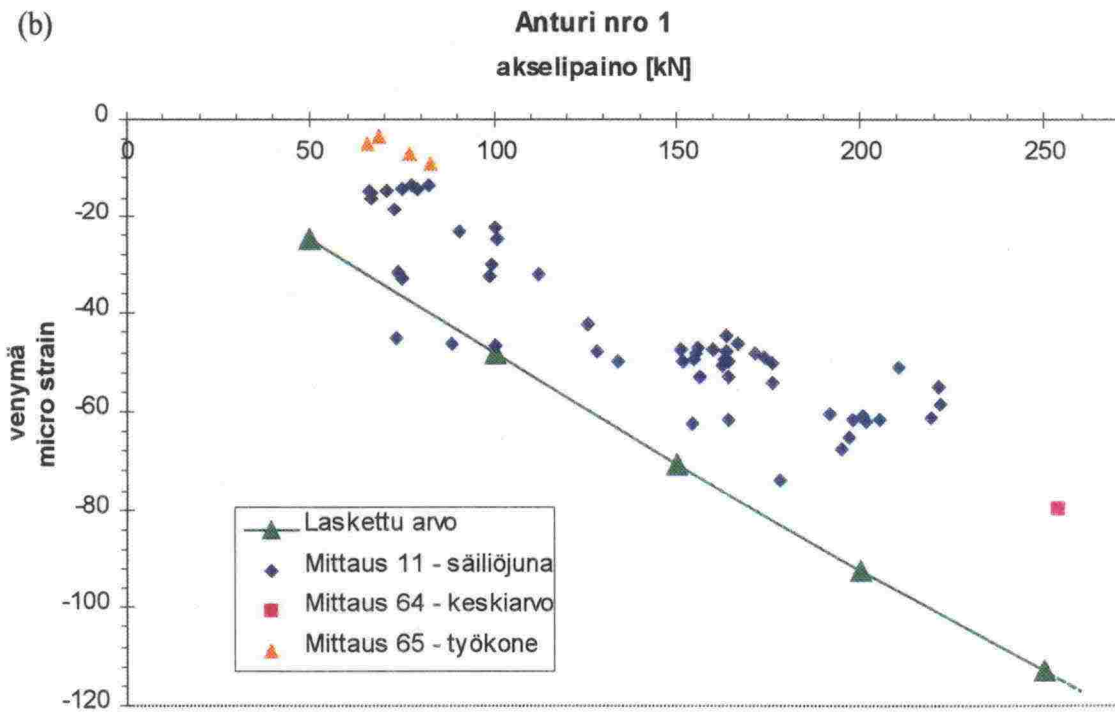
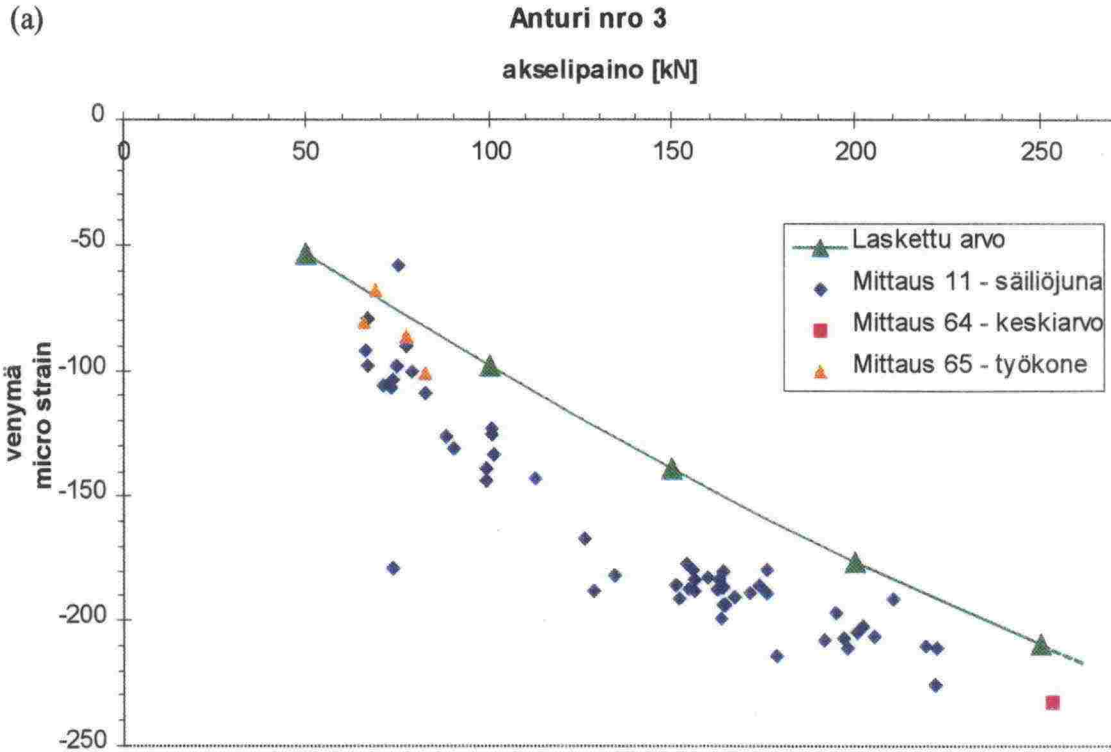
Kuvan 6.10:3 mitatut ja lasketut arvot vastaavat erittäin hyvin toisiaan. Kuvassa 6.10:4 vertaillaan keskimmaisella anturitasolla olevalla paineanturilla P2 mitattuja ja samalta syvyydeltä laskettuja jännityksen arvoja erilaisilla akselipainoilla.

Anturi nro P2



Kuva 6.10:4. Paineanturilla nro P2 mitattujen ja samalla syvyydellä laskettujen venymien vertailu

Paineanturi nro P2 mitatut ja samalta syvyydeltä lasketut arvot näyttäisivät olevan edelleen varsin yhtenevät. Keskimmáisellä antureiden asennustasolla sijaitsevan venymäanturin nro 3 ja alimmalla anturitasolla olevan venymäanturin nro 1 mitattujen ja samoilta syvyyksiltä laskettujen venymien vertailu esitetään kuvissa 6.10:5 a ja b.



Kuva 6.10:5. Venymäanturin 3 (kuva a) ja 1 (kuva b) mitattujen ja samoilla syvyyksillä laskettujen venymäarvojen vertailu.

Kuvista 6.10:5 a ja b havaitaan laskettujen ja mitattujen arvojen samansuuntaisuus. Keskimmaisella anturitasolla olevan venymäanturin, nro 3, lasketut arvot ovat kuitenkin jonkin verran mitattuja arvoja pienempiä. Alimmalla anturitasolla olevan venymäanturin, nro 1, mitatut arvot ovat vastaavasti jonkin verran pienempiä kuin lasketut arvot.

6.11 Kerrosrakennemallinnuksen ja alustaluvun yhteys

Raidealustaluku C määritellään tässä yhteydessä pölkyn alapinnan tasolla tukikerrokseen vaikuttavan paineen p ja pölkyn painuman suhteena yhtälön 6.11:1 mukaisesti.

$$C = \frac{p}{z} \quad (6.11:1)$$

missä

C = raidealustaluku

p = pölkyn alapinnassa vaikuttava paine

z = pölkyn painuma

Raidealustaluvun yksikkö on kaavan 6.11:1 mukaisesti muotoa N/mm^3 . BISAR-ohjelmalla tehtyä kerrosrakennemallinnusta vastaava raidealustaluku voidaan määrittää ratapölkyn tehokkaalle pinta-alalle tasaisesti jaetun pintapaineen ja tätä vastaavan rakennemallin yläpinnan painuman suhteena. Graafisesti raidealustaluku ilmenee tällöin kuvan 6.11:1 mukaisessa koordinaatistossa kyseessä olevaa akselipainoa vastaavan laskentapisteen ja origon välille piirretyin suoran kulmakertoimena.

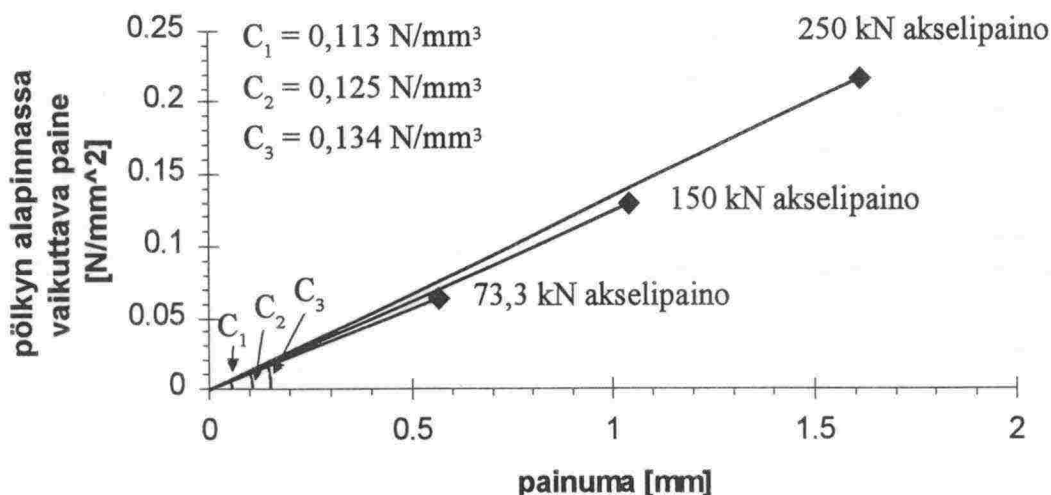
BISAR-laskennassa käytetyt otaksunan kuormituksen jakautumisesta ovat olleet kappaleessa 6.4 esitetyn mukaiset ja painuman havaintopiste on sijainnut toisen kiskon alapuolella kuvaa 6.4:5 vastaavasti. Kappaleen 6.5 mukaiseen peruslaskentatapaukseen verrattuna pohjamaan moduuliarvoa on kuitenkin muutettu BISAR-laskennassa siten, että 73,3 kN akselipainoa vastaava painuma on saatu vastaamaan mittauksen numero 65 mitattuja todellisia painuma-arvoja. Tätä uutta pohjamaan moduuliarvoa on sen jälkeen käytetty myös 150 ja 250 kN akselipainoja vastaavissa kerrosrakennelaskennoissa.

Kuvasta 6.11:1 havaitaan, että raidealustaluku C ei ole vakio vaan sen arvo kasvaa akselipainon funktiona. Syynä tähän on pengermateriaaleille ominainen jännitystason suhteen epälineaarinen käyttäytyminen, mistä johtuen kerrosrakennemateriaalien moduuliarvot ja näin ollen myös koko rakenteen jäykkyys kasvaa akselipainon kasvaessa.

Kappaleessa 5.5 esitetty ratarakenteen redusoitu alustaluku $C_R = 0,075 \text{ N}/\text{mm}^3$ on johdettu mittauksen numero 65 tuloksista. Koska mitattujen akselipainojen keskiarvo on tällöin ollut 73,3 kN, tätä voidaan verrata kuvassa 6.11:1 esitettyyn BISAR-laskennalla saatuun 73,3 kN akselipainoa vastaavaan raidealustalukuun $C_1 = 0,11 \text{ N}/\text{mm}^3$. Alustalukuarvojen ero selittyy pääosin kappaleen 5.5 mukaisessa alustalukuarvossa

mukana olevan välilevyn vaikutuksesta. Tämän lisäksi eroa aiheuttaa ainakin erot tässä kappaleessa tehtyjen ja kappaleen 5.5 mukaisten tarkastelujen kuormitusjakautumiin liittyvissä idealisoinneissa.

Raidealustaluvun C määrittäminen erilaisilla akselipainoilla



Kuva 6.11:1. Raidealustaluvun määrittäminen erilaisilla akselipainoilla.

6.12 Johtopäätökset

Lineaarinen kerrosrakennepohja mahdollistaa ratapenkereen pystysuuntaisen toiminnan mallintamisen penkereen mitattua käyttäytymistä vastaavasti ainakin 250 kN akselikuormaan asti. Pelkkään kimmoteoriaan perustuvan laskennan ulottaminen 300 kN akselikuormalle ei kuitenkaan ole perusteltua ilman referenssimittauksia, sillä maa käyttäytyy korkeilla kuormituksilla yhä enenevässä määrin kimmoplastisesti.

Mitattujen ja laskettujen arvojen vertailun perusteella ylimmällä mittaustasolla olevan venymäanturin nro 9 antamien tulosten voidaan arvioida olevan epäluotettavia. Alimmalla tasolla sijaitsevien venymäantureiden antamista tuloksista ei sen sijaan voida vetää suoraviivaisesti johtopäätöstä kummankaan venymäanturin, nrot 1 ja 13, toimimattomuudesta. Venymäanturin nro 1 antamat tulokset ovat kuitenkin lähempänä laskettuja tuloksia. Paineanturien osalta kaikki muut anturit paitsi anturi nro P3 näyttäisivät antavan laskennan kanssa yhteneviä tuloksia (kuvat 6.7:1-6.9:1).

Laskentatulosten herkkyytarkastelu osoittaa, että rakennekerros materiaalien moduuliarvojen vaihtelu vaikuttaa suoraviivaisesti rakennekerrosten venymäarvoihin, mutta vain vähän rakennekerrosten jännitysjakautumaan. Pohjamaan moduuliarvon vaihtelun vaikutus on vastaavasti merkittävin pölkyn pystysuuntaisen liikkeen suuruuteen. Poissonin luvun vaihtelun vaikutus sekä rakennekerrosten venymiin että penkereen jännitysjakautumaan on varsin vähäinen.

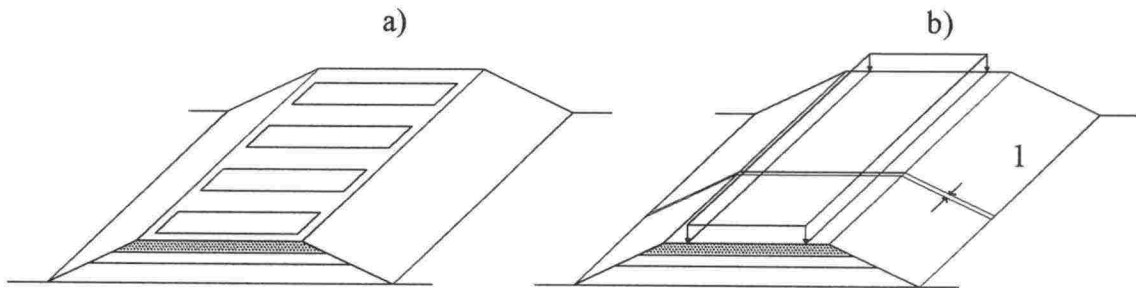
7 PINGERLEVEYDEN VAIKUTUKSEEN LIITTYVÄT TARKASTELUT

7.1 Johdanto

Pengerleveyden huomioon ottaminen laskelmissa ei onnistu puoliäärettömään maamassaan (kuva 6.1:1) perustuvilla laskentaohjelmilla. Tämä rajaa laskentamenetelmiä huomattavasti. Numeeriset laskentamenetelmät osoittautuvat käytännössä ainoaksi tavaksi lähestyä ongelmaa. Geotekniikassa yleisimmin käytettyjä numeerisia laskentamenetelmiä ovat numeerinen integrointi, differenssimenetelmä, reunaintegraali- ja reunaelementtimenetelmä sekä elementtimenetelmä. Elementtimenetelmä (FEM) on yleisin käytetyistä numeerisista laskentamenetelmistä. Tässä tutkimuksessa pengerleveyttä on tukittu ainoastaan elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmä mahdollistaa mallien luomisen 1-, 2- ja 3-ulotteisesti. Tässä tutkimuksessa pengerleveyden vaikutusta on tutkittu 2-ulotteista elementtimallia käyttäen

7.2 Mallinnustapa

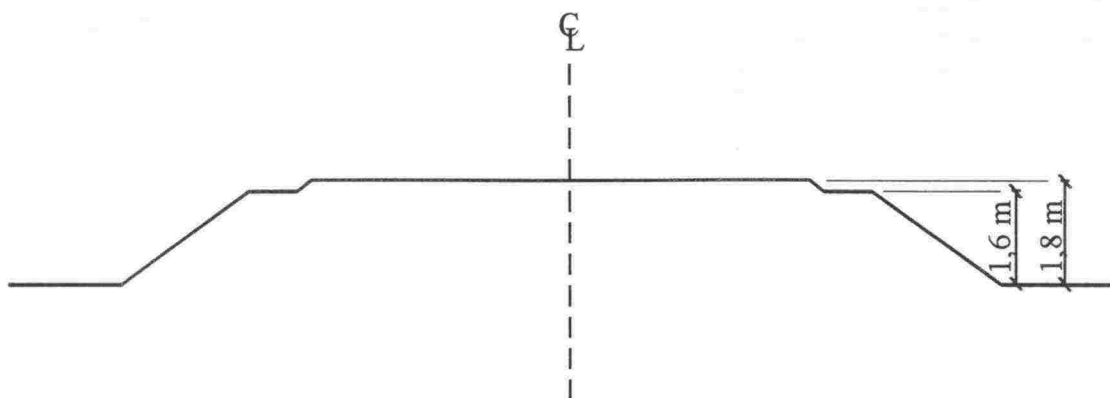
Pengerleveyden vaikutuksen alustavaan arvioimiseen voidaan käyttää 2-ulotteista tasomuodonmuutos (plane strain) -mallia. Tällöin ratapenger otaksutaan pituussuunnassa kauttaaltaan samanlaiseksi (kuva 7.2:1). Tällaisessa mallissa kuormitus pitää muuttua myös jatkuvaksi. Jatkuvaksi muutetusta penkereestä tutkitaan kaistaa, jonka paksuus on yhden laskentayksikön suuruinen.



Kuva 7.2:1 a) Skemaattinen penger ja b) penkereen muuntaminen FEM laskennan tasomuodonmuutostapaukseksi sekä laskennassa tarkasteltava kaista penkereestä.

Ratapenkereen tapauksessa 2-ulotteinen tasomuodonmuutostarkastelu antaa vain suuntaa-antavia arvioita ratapenkereen käyttäytymisestä, sillä pölkyt eivät ole jatkuvia radan pituussuunnassa. Näin ollen myös kuormitus vaihtelee radan pituussuunnassa. Kaksiulotteisella mallilla kuvattua ratapenkereen käyttäytymistä ei täten voi suoranaisesti verrata myöskään 3-ulotteiseen BISAR-laskentaan.

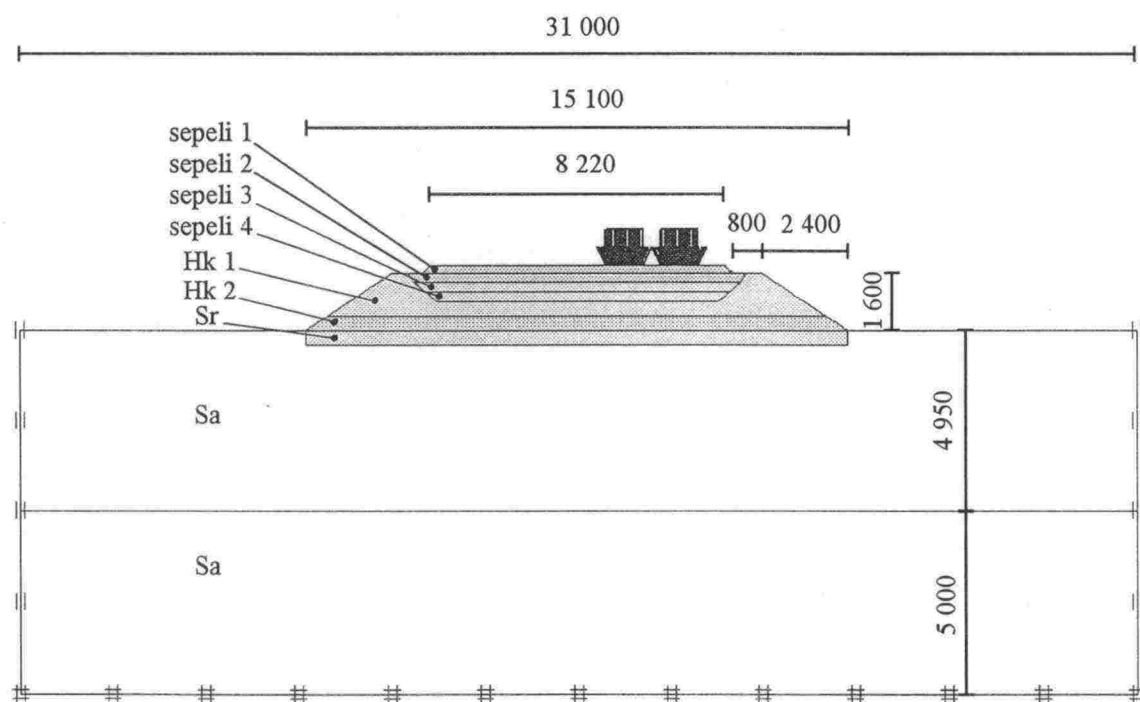
Perustapauksia 2-ulotteisessa elementtimallinnuksessa ovat toisaalta BISAR-mallinnusta lähinnä vastaava puoliääretön maamassa (kuva 6.1:1) ja toisaalta geometrisesti lähempänä oikeata oleva penkereen muodon huomioiva laskentatapaus (kuva 7.2:2).



Kuva 7.2:2 Skemaattinen esitys FEM-laskentaan soveltuvasta penkereen muodon huomioon ottavasta laskentamallista sekä mallin symmetria-akseli.

FEM-laskennassa pyritään tarkkuudeltaan riittävään, mutta samalla mahdollisimman yksinkertaiseen geometriseen malliin. Geometrian puolesta kuvan 7.2:2 mukaisessa mallissa voitaisiin käyttää hyväksi symmetriaa. Tällöin kuvasta 7.2:2 riittäisi toisen puoliskon mallintaminen. Symmetrian hyväksikäyttö edellyttäisi kuitenkin samanlaista kuormitusta molemmille raiteille. Koska tilanne kesällä 1999 tehdyissä mittauksissa ei ollut tämä, ei myöskään symmetrian hyväksikäyttö nyt ole mahdollista.

Kuvassa 7.2:3 esitetään elementtimallinnuksessa käytetty ratapenkereen laskentamalli kuormituksineen, reunaehtoineen ja tärkeimpine mittoineen.



Kuva 7.2:3 Ratapenkereen laskentamalli kuormituksineen, reunaehtoineen ja tärkeimpine mittoineen.

Kuvan 7.2:3 laskentamallissa rakennekerrosten paksuudet ovat kuvan 6.5:2 mukaiset. Pohjavedenpinta sijaitsee kuvassa 7.2:3 sorakerroksen alapinnan tasolla eli 400 mm alkuperäisen maanpinnan tasosta. Kuvan 7.2:3 reunaehdot ovat: 1. Alareunassa siirtymät ovat estetty niin vertikaalisessa kuin horisontaalisessakin suunnassa. 2. Reunoilla vertikaalinen liike on vapaa kun taasen sivusiirtymät ovat estetty.

MAAPARAMETRIT

Kuvan 7.2:3 mukaisen laskentamallin tärkeimmät maaparametrit esitetään taulukossa 7.2:1.

Taulukko 7.2:1. Ratapenkereen FEM-laskennan tärkeimmät maaparametrit.

Kerroksen nimi	Tyyppi	γ	γ_{sat}	k	ν'	E	ϕ'	c'	ψ
		[kN/m ³]	[kN/m ³]	[m/s]		[MPa]	[°]	[kPa]	[°]
Sepeli 1	avoin	22	24	0	0,3	400	40	0,1	0
Sepeli 2	avoin	22	24	0	0,3	250	40	0,1	0
Sepeli 3	avoin	22	24	0	0,3	175	40	0,1	0
Sepeli 4	avoin	22	24	0	0,3	155	40	0,1	0
Hiekka 1	avoin	18	19	0	0,3	145	33	0,1	0
Hiekka 2	avoin	18	19	0	0,3	145	33	0,1	0
Sora	avoin	20	21	0	0,3	160	35	0,1	0
Savi	suljettu	16	16	0	0,3	40	20	10	0

Taulukon 7.2:1 parametriarvot ovat lujuusparametrien osalta osittain melko varovaisia arvioita ja tilavuuspainojenkin osalta ehkä osittain epätarkkoja, mutta soveltunevat kuitenkin ratapenkereen alustavaan mallinnustarkasteluun. FEM-laskenta suoritetaan avoimen tilan parametreilla. Suljettu tila huomioidaan automaattisesti lisäämällä huokosvedelle tilavuusmoduuli K_w . $K_w \gg nK$, missä n tarkoittaa huokoisuutta ja K raerungon tilavuusmoduulia.

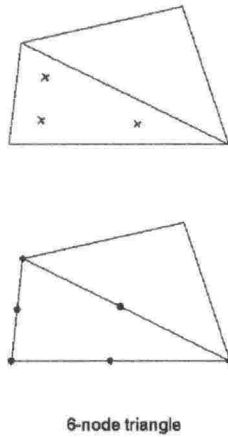
KUORMITUS

Kuormitukseksi valitaan BISAR -mallinnuksen tapainen kuormitusjakauma. Akselikuorma jaetaan ensiksi kahdella, josta saadaan pyöräkuorma. Tämän jälkeen pyöräkuorma jaetaan kolmelle pölkylle, josta saadaan yhden akselin kuormittaman ratapenkereen osan pituus. Kun kuormitetun alueen leveytenä käytetään pölkyn toisen pään tehokasta pituutta ja pölkkyväliksi otaksutaan 600 mm, kuormitukseksi pinta-alaksi saadaan edellä mainittujen idealisointien perusteella $1800 \times 1050 \text{ mm}^2$. Kuvan 7.2:3

mukaisen pystysuuntaisen kuormituksen keskimääräiseksi arvoksi saadaan tällöin vastaavasti 66,1 kPa.

ELEMENTEISTÄ

Kuvan 7.2:3 mukainen geometriamalli on mallinnettu 6-solmuisilla kolmioelementeillä, jonka numeerinen integrointi suoritettiin Gaussin kolmen pisteen integrointikaavalla (yhtälö 7.2:1 ja taulukko 7.2:2).



Kuva 7.2:4 Kuusisolmuisen kolmioelementin solmujen (alempi kuva) ja integrointipisteiden (ylempi kuva) sijainti (PLAXIS 7.1 käyttöohjekirja).

Gaussin numeerinen integrointikvadratuuri on muotoa:

$$\iint F(\xi, \eta) d\xi d\eta \approx \sum_{i=1}^k F(\xi_i, \eta_i) w_i \quad (7.2:1)$$

Taulukko 7.2:2 Kuusisolmuisen kolmioelementin kolmen pisteen integrointi-parametrit (PLAXIS 7.1 käyttöohjekirja).

Piste	ξ_i	η_i	ζ_i	w_i
1, 2 & 3	1/6	1/6	2/3	1/3

MAAN MATERIAALIMALLEISTA

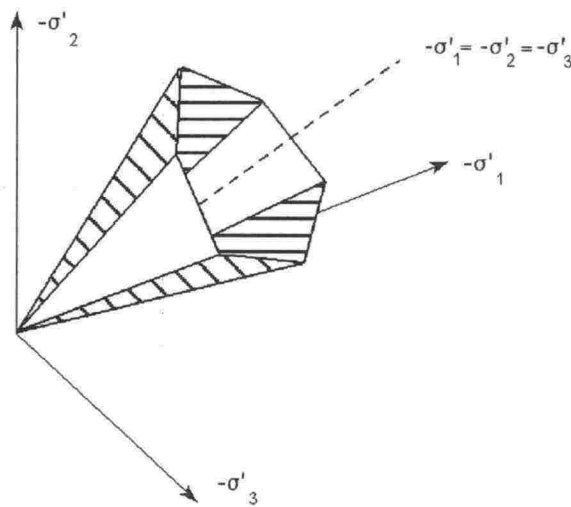
Maa käyttäytyy todellisessa kuormitustilanteessa aluksi epälineaarisen kimmoisasti ja tämän jälkeen kimmoplastisesti ja lopuksi täysin plastisesti. Riittävällä toistokuormitusmäärillä maa voidaan olettaa käyttäytyvän kimmoisasti. Tämän takia ratapenkereen FEM-mallinnuksen yhtenä vaihtoehtona käytetään kimmoista maamallia. Vertailun vuoksi pengeri on mallinnettu Mohr-Coulomb ideaaliplastista myötöehtoa käyttäen, joka mahdollistaa vetojännitysten poissulkemisen penkereestä. Mohr-Coulombin myötöehto voidaan lausua yhtälöiden 7.2:2 a-c avulla:

$$f_1 = \frac{1}{2}|\sigma_2' - \sigma_3'| + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3')\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \quad (7.2:2 \text{ a})$$

$$f_2 = \frac{1}{2}|\sigma_3' - \sigma_1'| + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_1')\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \quad (7.2:2 \text{ b})$$

$$f_3 = \frac{1}{2}|\sigma_1' - \sigma_2'| + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2')\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \quad (7.2:2 \text{ c})$$

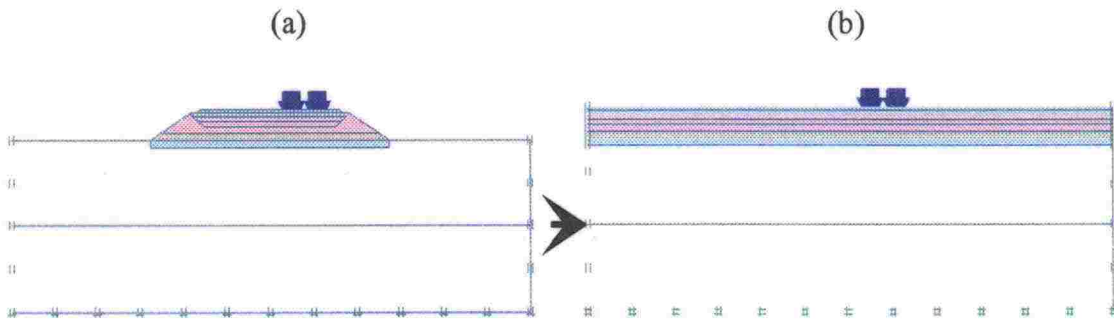
missä σ_i' merkitsee kyseisen pääjännityssuunnan mukaista tehokasta jännitystä, φ kitkakulmaa ja c koheesiota. Mohr-Coulombin myötöehto voidaan esittää pääjännitysavaruudessa kuvan 7.2:5 mukaisesti.



Kuva 7.2:5 Mohr-Coulombin myötöehto pääjännitysavaruudessa ($c=0$) (PLAXIS 7.1 käyttöohjekirja).

7.3 Penkereen toiminta 250 kN akselipainolla

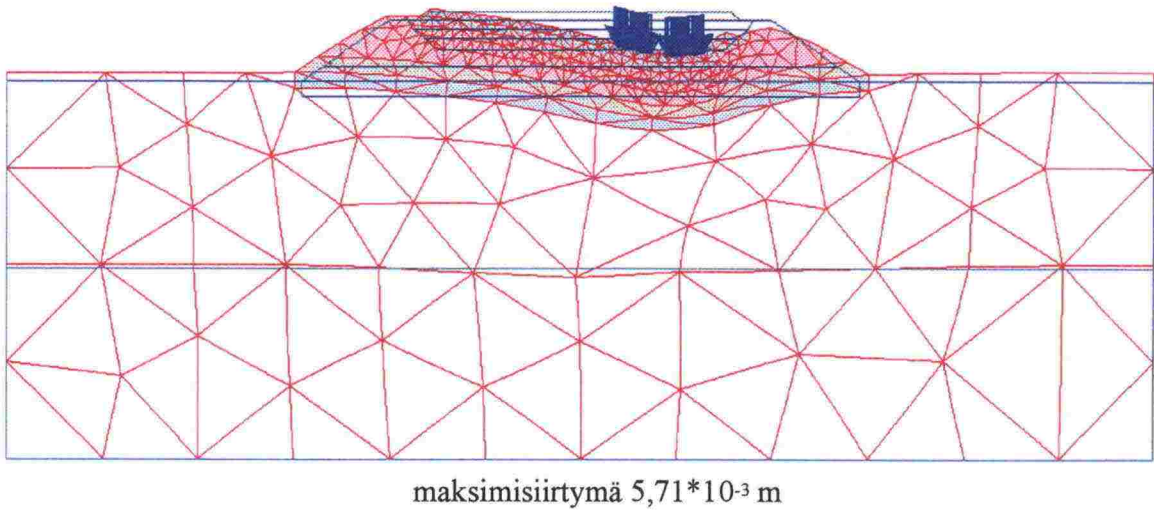
FEM-laskennan perustapauksena voidaan pitää kuvan 7.2:3 mukaista geometrista mallia, jolla on taulukon 7.2:1 maaparametrit. Penkereen leveyden vaikutusta voidaan parhaiten arvioida painumilla ja sivusiirtymillä. Laskennassa on vertailtu erilaisia jätkänpolun leveyksiä ja niiden vaikutusta vertikaali- ja horisontaalisuuntaisiin siirtymiin. Penkereen leveyden arvioiminen tapahtuu perustapausta kapeammilla (kuva 7.3:1 a) ja leveämmillä (kuva 7.3:1 b) jätkänpolun leveyksillä. Tutkittavat jätkänpolun leveydet ovat 0,35, 0,50, 0,65, 0,80 (perustapaus), 1,00, 1,20, 1,40, 1,60, 1,80, 2,00, 3,00, 4,00, 5,00 m sekä ns. puoliäärettömyys. Jätkänpolun leveyden nollakohta sijaitsee laskentamallissa 2,30 m etäisyydellä raiteen keskilinjasta eli 1,00 m etäisyydellä ratapölkyn ulommasta päästä. Kaikki eri jätkänpolku-leveydet on laskettu sekä kimmoisella että Mohr-Coulombin maamallilla.



Kuva 7.3:1 a) FEM-laskennan kapein tapaus ja b) levein mahdollinen tapaus eli ns. puoliääretön maamalli.

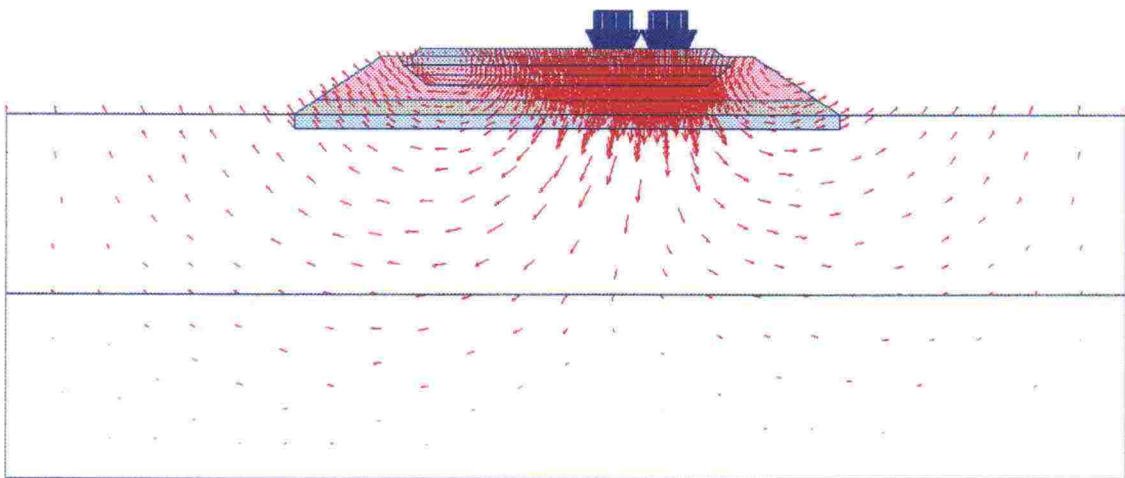
PERUSTAPAAUS

Perustapauksen 6-solmuisilla elementeillä mallinnettu elementtimalli esitetään kuvassa 7.3:2. Vakiokuormituksella saadaan maan materiaalimallista riippuen erilaisia siirtymiä. Kuvassa 7.3:2 esitetään penkereen siirtymät pelkästä junakuormasta, kun maan materiaalimallina on Mohr-Coulomb.



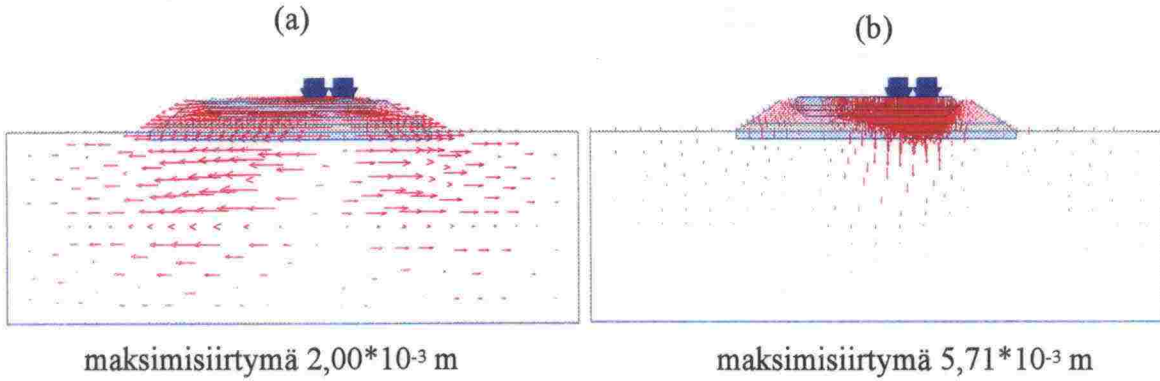
Kuva 7.3:2 Perustapauksen elementtimalli ja elementtimallin deformoitunut muoto.

Kuvan 7.3:2 deformoitunutta muotoa on vahvistettu 200-kertaiseksi. Deformoituneen penkereen siirtymät voidaan esittää havainnollisesti vektoriesityksenä. Kuvassa 7.3:3 esitetään kuvan 7.3:2 mukaisen deformoituneen penkereen kokonaissiirtymävektorit.



Kuva 7.3:3 Perustapauksen kokonaissiirtymävektorit.

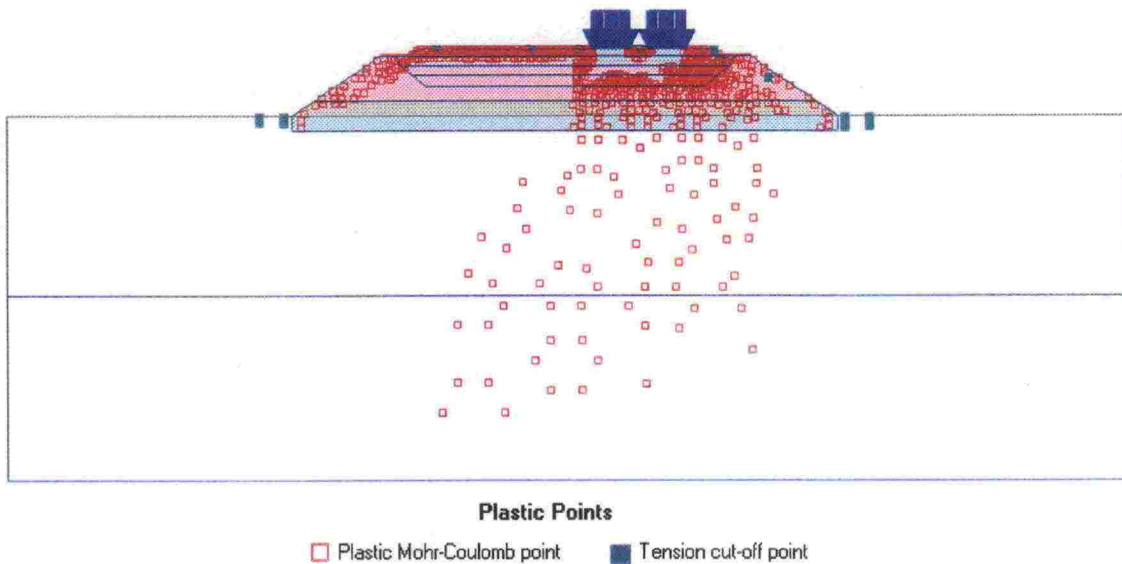
Kuvasta 7.3:3 havaitaan jokaisen solmun lopullinen siirtymäarvo nuolen suunnan ja suuruuden mukaan. Kuvan 7.3:3 kokonaissiirtymävektorien maksimiarvo on sama kuin kuvan 7.3:2 maksimiarvo eli 5,71 mm. Kokonaissiirtymävektorit voidaan hajottaa x- ja y-akseleiden suuntaisiin komponentteihin. Nämä komponentit esitetään kuvissa 7.3:4 a ja b.



Kuva 7.3:4 Perustapauksen (a) vaakasuuntaiset ja (b) pystysuuntaiset siirtymävektorit.

Kuvan 7.3:4 b maksimisiirtymävektori on sama kuin deformoituneen muodon (kuva 7.3:2) maksimisiirtymävektori. Tällöin deformoituneen muodon suurimmalla siirtymäarvolla ei ole horisontaalista komponenttia ollenkaan. Suurimmat pohjamaan vaakasiirtymävektorit havaitaan noin 1 m syvyydellä maanpinnasta (kuva 7.3:4 a). Vastaavat penkereen maksimi-arvot sijoittuvat hiekkakerroksen alaosaan (kuva 7.3:4 b).

Integroimispisteiden jännitykset ylittävät myötöjännityksen arvon, eli maa plastisoituu, 250 kN kuormituksen alaisena kuvan 7.3:5 mukaisesti. Kuvasta selviää myös vetojännityksen alaisuuteen joutuneet integroimispisteet.

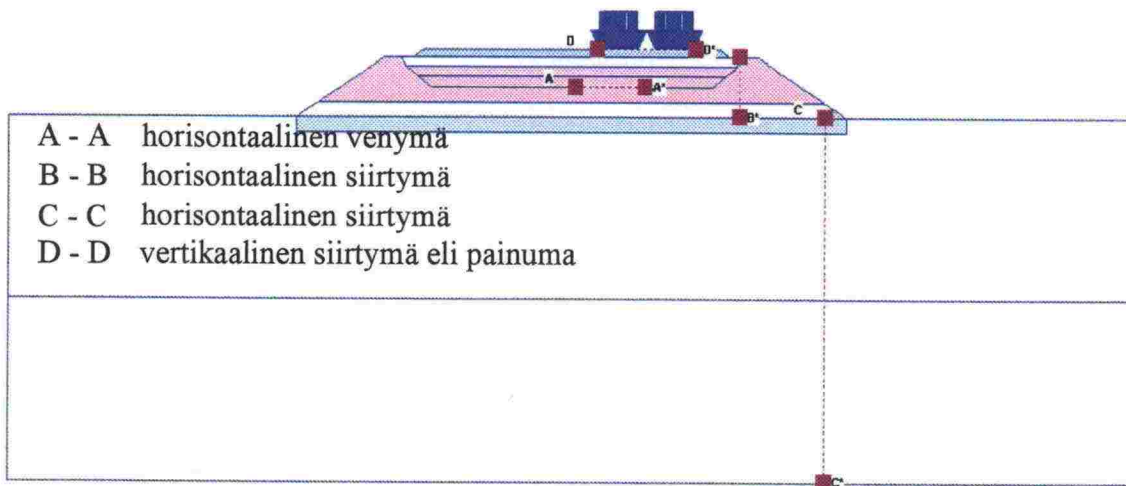


Kuva 7.3:5 Perustapauksen plastisoituneet ja vetojännityksen alaisuuteen joutuneet integrointipisteet.

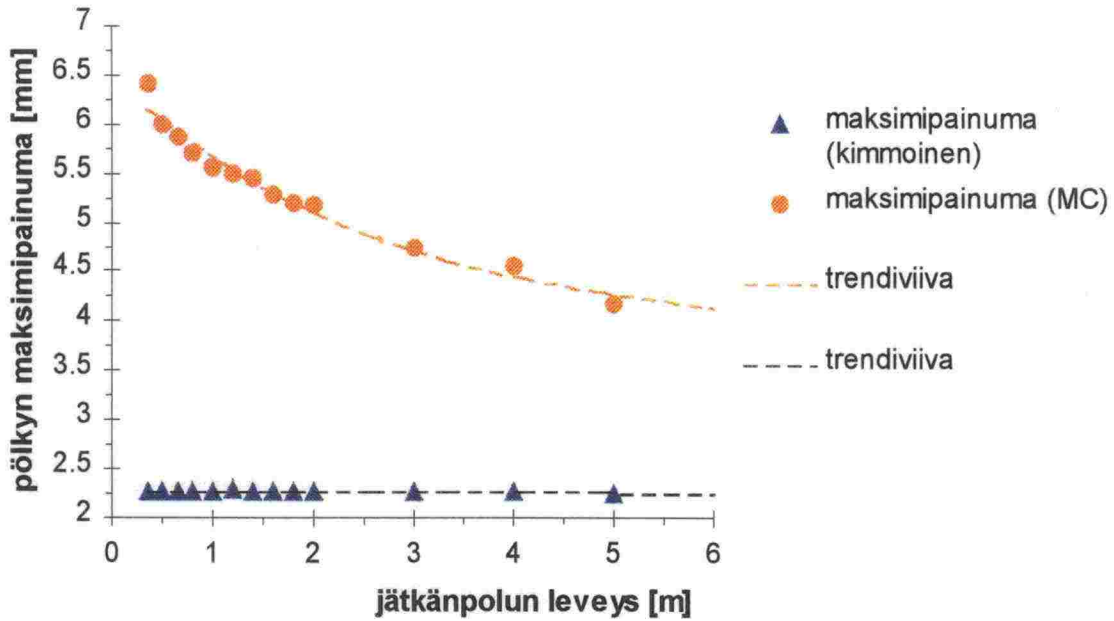
Kuvasta 7.3:5 havaitaan kaikki plastisoitumisen alaisuuteen joutuneet jännityspisteet, joiden perusteella ei kuitenkaan ole suoranaisesti havaittavissa selvän liukupinnan muodostumista. Vetojännityspisteet sijoittuvat kuvassa 7.3:5 penkereen yläosaan sekä pohjamaan ja penkereen yhtymäkohtaan.

Ratapenkereen toimintaa 250 kN akselikuorman alaisuudessa erilaisilla pengerleveyksillä arvioidaan tässä yhteydessä penkereen ja pohjamaan sivusiirtymien, painumien ja horisontaalisten venymien avulla. Kuvassa 7.3:6 esitetään alueet, joiden kohdilla niitä penkereessä ja pohjamaassa tarkastellaan.

Kuvassa 7.3:7 esitetään leikkauksessa D – D (kuva 7.3:6) tapahtuva suurin vertikaalinen siirtymä eli painuma erilaisilla jätkänpolun leveyksillä, kun akselikuormituksen on 250 kN.



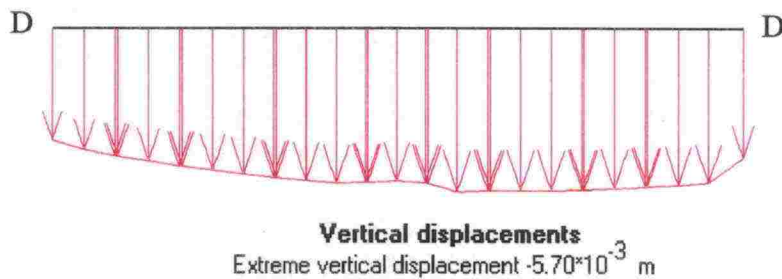
Kuva 7.3:6 Penkereestä tarkasteltavat suureet ja näitä vastaavien tarkastelualueiden sijainti.



Kuva 7.3:7 Pölkyn alapinnan suurimman painuman ja pengerialueiden suhde.

Kuvasta 7.3:7 havaitaan painumien hyvin jyrkkä kasvu alle 1,00 m jätkänpolun leveyksillä ja eritoten välillä 0,35 – 0,50 m, kun maan materiaalimallina on Mohr-Coulomb. Jätkänpolun leveydellä näyttäisi olevan erittäin vähän vaikutusta pölkyn painumaan, kun materiaalimallina käytetään lineaarisesti kimmoista materiaalimallia.

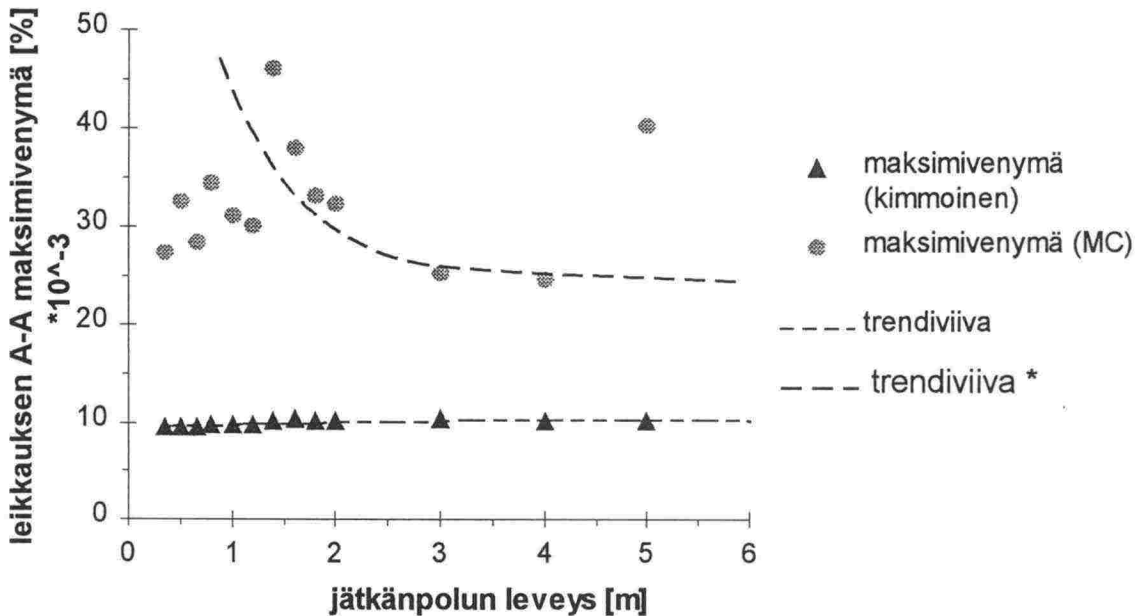
Perustapauksen painumat käyttäytyvät leikkauksessa D – D kuvan 7.3:8 tavoin.



Kuva 7.3:8 Perustauksen painumajakauma leikkauksessa D – D (kuva 7.3:6).

Kuvan 7.3:8 mukainen painumajakauma on saatu paineesta, joka on annettu pölkyn alapinnan tasossa, eikä pölkyn jäykkyuden vaikutus siinä näin ollen tule näkyviin.

Kuvan 7.3:6 leikkauksessa A – A mitattujen venymien ja jätkänpolun leveyden suhdetta pyritään kuvaamaan kuvassa 7.3:9. Leikkaus A – A sijaitsee jätkänpolun leveydestä riippumatta 1,025 m pölkyn alapinnan alapuolella (kuva 7.3:6).

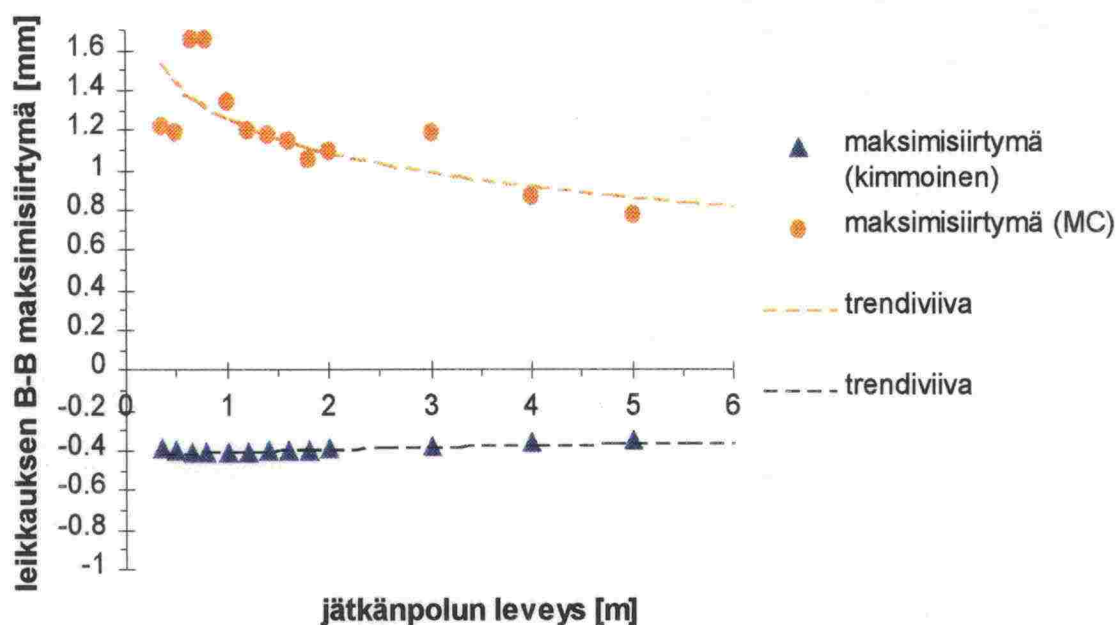


Kuva 7.3:9. Jätkänpolun ja leikkauksessa A – A vaikuttavan maksimivenymän (horisontaalisuunta) yhteys.

Kuvasta 7.3:9 ei saada yksikäsitteistä kuvaa venymien arvoista leikkauksessa A – A, mutta periaatteellinen ero kahden erilaisen maamallin välillä siitä kuitenkin käy ilmi. Trendiviiva* ei perustu mihinkään matemaattiseen sovitukseen, vaan se on lisätty kuvaan silmämääräistä sovitusta käyttäen. Tämän kuvan perusteella jätkänpolun leveyden vaikutuksesta venymien suuruuteen ei voida tehdä kuin karkeita oletuksia. Tarkkojen venymäarvojen laskeminen vaatisi huomattavasti tiheämpää elementtiverkkoa sekä korkeampiasteisia elementtejä. Ongelmaksi muodostuu tässä tapauksessa laskenta-aika sekä mahdollisesti käytössä olleen FEM-ohjelman rajallisuus sen kyvyssä käsitellä tarvittavaa vapausastelukumäärää (DOF).

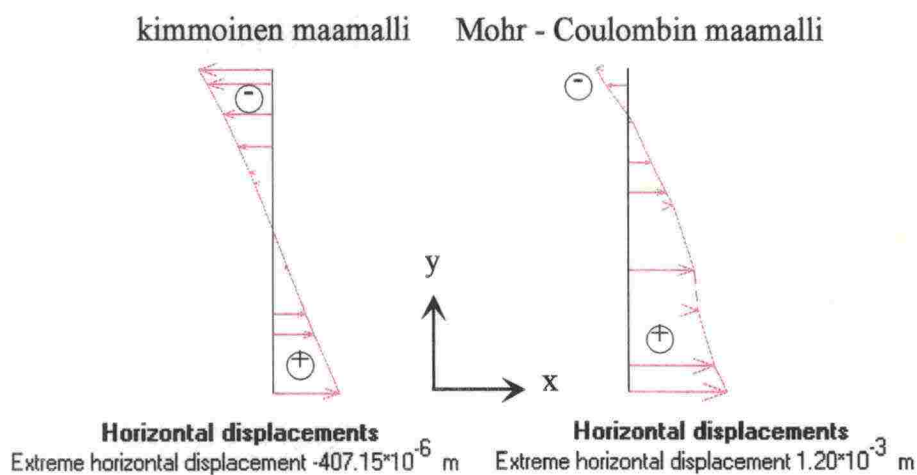
Tässä kappaleessa esitetyt laskentatulokset on saatu elementtimallilla (kuva 7.3:2), jossa on 571 elementtiä, 1234 solmupistettä ja 1713 integroimispistettä. Elementtinä on käytetty 6-solmuista kolmioelementtiä (kuva 7.2:4). Elementtimallin vapausasteiden suurentaminen kasvattaa laskenta-aikaa eksponentiaalisesti.

Penkereen sivusiirtymän ja jätkänpolun leveyden suhdetta pyritään kuvaamaan kuvassa 7.3:10. Sivusiirtymän laskentapaikka eli leikkaus B – B sijaitsee aina 1,3 m etäisyydellä pölkyn ulommasta reunasta (kuva 7.3:6).



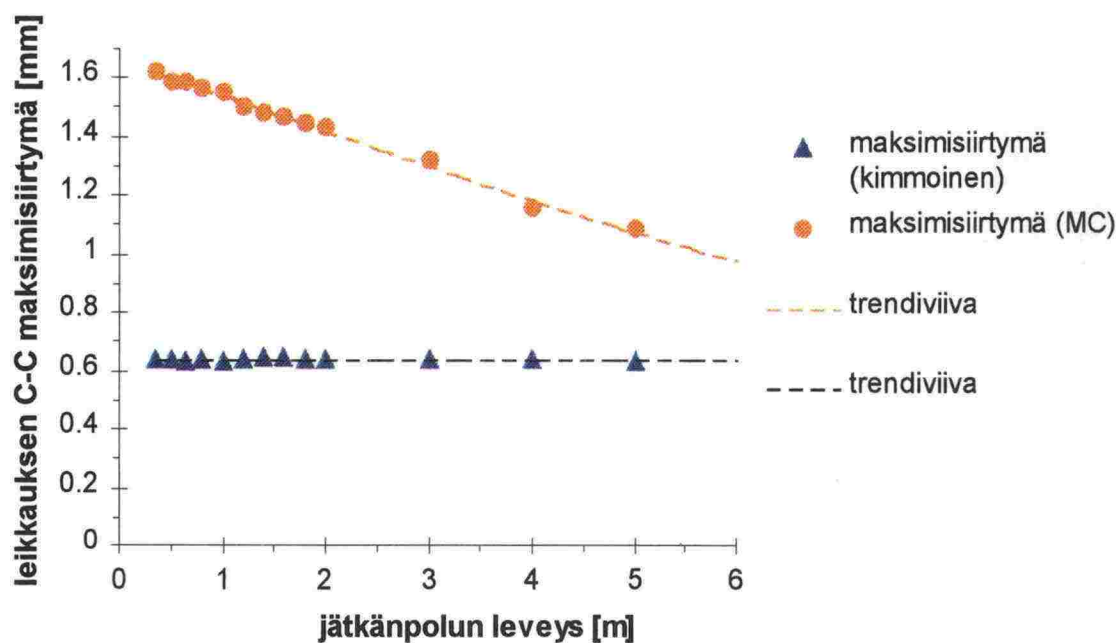
Kuva 7.3:10 Penkereen maksimisivusiirtymän, leikkauksessa B – B (kuva 7.3:6), ja jätkänpolun leveyden välinen suhde.

Suurin ero sivusiirtymissä löytyy siirtymien merkeissä eri materiaalimalleilla. Kimmoisella materiaalilla maksimisivusiirtymä tapahtuu penkerettä kohti, kun taas Mohr-Coulombin materiaalimallilla maksimisivusiirtymä tapahtuu penkereestä ulospäin (kuva 7.3:11). Maksimisivusiirtymän ja jätkänpolun leveyden välille on mahdollista löytää yhteys, mutta tarkkuus on melko huono kummallakin käytetyllä materiaalimallilla. Mohr-Coulombin materiaalimallilla sivusiirtymät näyttäisivät kasvavan huomattavasti 1,00 m pienemmillä jätkänpolun leveyksillä. Jätkänpolun leveyksillä 0,35 ja 0,50 m penkereen sivusiirtymän maksimikohta muuttuu leikkauksen B – B ulkopuolelle, joten kuva 7.3:10 (MC) on tältä osin harhaan johtava.



Kuva 7.3:11 Penkereen sivusiirtymien merkisääntö sekä perustapauksen sivusiirtymät leikkauksessa B – B (kuva 7.3:6).

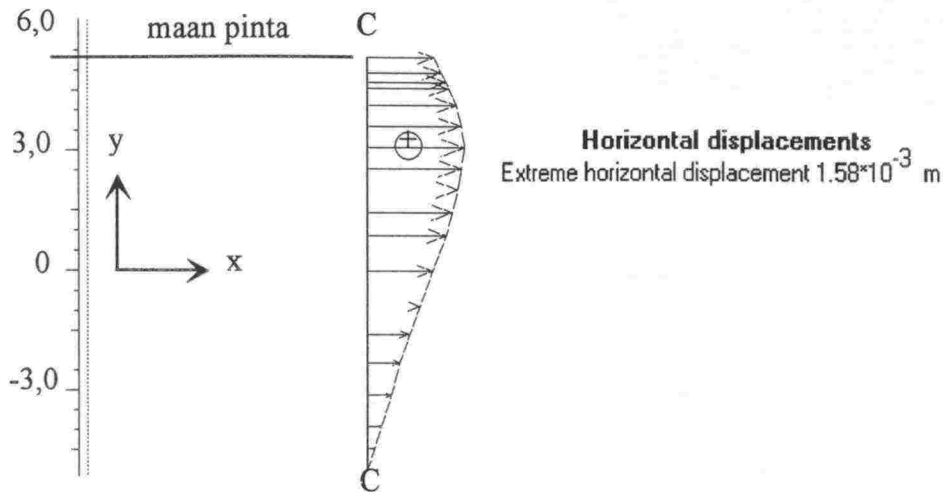
Pohjamaan sivusiirtymän maksimiarvon ja jätkänpolun leveyden suhdetta leikkauksessa C – C (kuva 7.3:6) tarkastellaan kuvassa 7.3:12. Leikkaus C – C sijaitsee jokaisella jätkänpolun leveydellä 3,65 m etäisyydellä oikealle pölkyn ulommasta reunasta.



Kuva 7.3:12 Pohjamaan maksimisivusiirtymän, leikkauksessa C – C (kuva 7.3:6), ja jätkänpolun leveyden välinen yhteys.

Kuvan 7.3:12 molemmat maamallit antavat melko lineaarisen trendiviivan sivusiirtymän ja jätkänpolun leveyden suhteessa. Kimmoisella maamallilla jätkänpolun leveydellä ei näyttäisi olevan vaikutusta, kun taas Mohr-Coulombin maamallissa jätkänpolun leveyden kasvattaminen näyttäisi selvästi pienentävän sivusiirtymiä.

Pohjamaan maksimisivusiirtymä sijaitsee noin 1,5 m syvyydessä maan pinnasta (kuva 7.3:13).

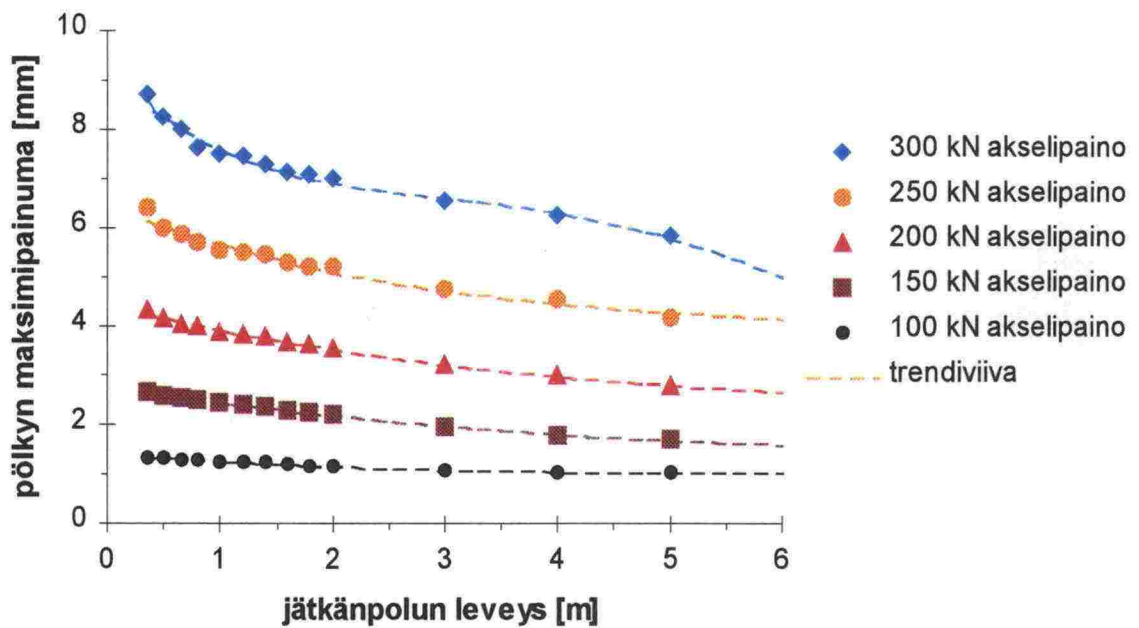


Kuva 7.3:13 Leikkaus C – C perustapauksessa ja globaali koordinaatisto.

7.4 Jätkänpolun leveyden vaikutus painumiin ja sivusiirtymiin erilaisilla akselipainoilla.

Jätkänpolun leveyden vaikutusta erilaisilla akselipainoilla on tutkittu pölkyn painumien, penkereen sivusiirtymien ja pohjamaan sivusiirtymien osalta leikkauksissa D – D, B – B ja C – C (kuva 7.3:6). Kuormittavat akselipainot ovat olleet 100, 150, 200, 250 ja 300 kN. Kuormituksesta aiheutuva paine pölkyn alapinnan tasoissa on laskettu samalla tavalla kuin 250 kN akselipainon kuormitusta vastaava paine kappaleessa 7.2. Maan materiaalmallina on vertailussa tyydytty käyttämään ainoastaan ideaaliplastista Mohr-Coulombin materiaalmallia.

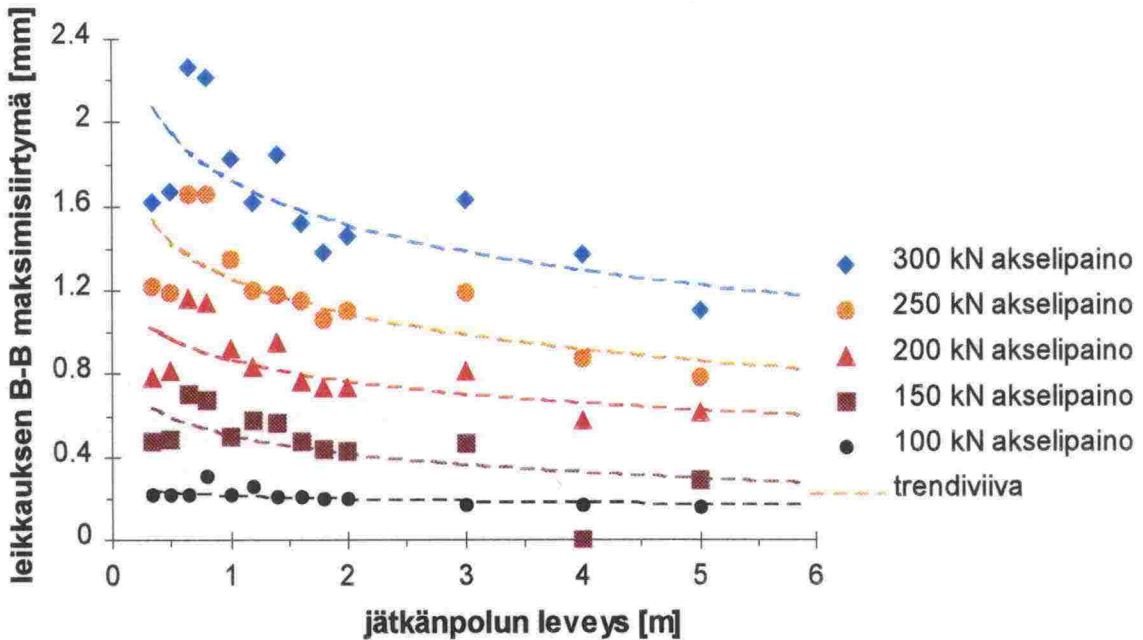
Jätkänpolun leveyden ja erilaisten akselipainojen vaikutus pölkyn maksimipainumaan esitetään kuvassa 7.4:1.



Kuva 7.4:1 Jätkänpolun leveys vs. pölkyn maksimipainuma erilaisilla akselipainoilla.

Kuvasta 7.4:1 selviää hyvin, kuinka suuremmat akselipainot aiheuttavat kasvavaa epälineaarisuutta pölkyn painumaan varsinkin kapeilla jätkänpolun leveyksillä. Kuvasta voisi päätellä, että painumat käyttäytyvät lähes lineaarisesti aina 250 kN akselikuormiin asti. 300 kN akselikuormilla epälineaarisuutta ei pitäisi sivuttaa laskelmissa.

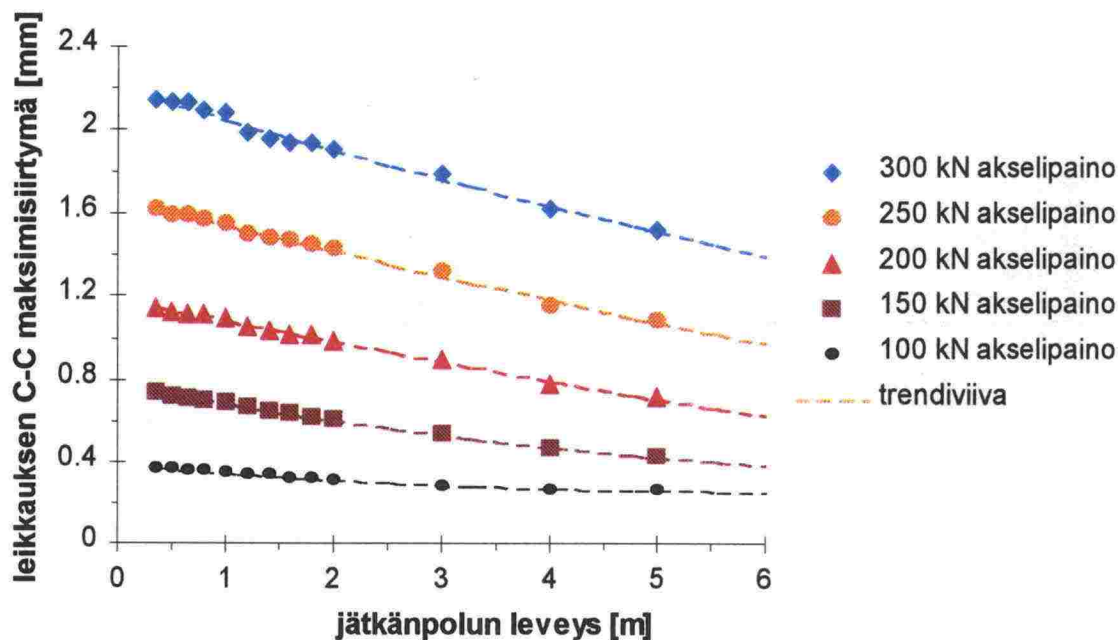
Penkereen maksimisivusiirtymät leikkauksessa B –B (kuva 7.3:6) käyttäytyvät kuvan 7.4:2 mukaisesti erilaisilla akselikuormilla ja jätkänpolun leveyksillä.



Kuva 7.4:2. Jätänpolun leveys vs. penkereen maksimisiirtymä leikkauksessa B – B (kuva 7.3:6) erilaisilla akselipainoilla.

Kuvasta 7.4:2 voidaan havaita akselipainojen ja jätänpolun leveyden suuntaa antava vaikutus penkereen maksimisiirtymään poikkileikkauksessa B – B (kuva 7.3:6). Laskentatulosten suuri hajonta johtuu käytössä olleen FEM-ohjelman automaattisesta verkon generoinnista, joka muuttaa elementtien ja erityisesti integroimispisteiden sijaintia eri jätänpolun leveyksillä huomattavasti juuri leikkauksen B – B kohdalla. Kahden kapeimman jätänpolun, 0,35 ja 0,50 m, kohdalla penkereen toiminta muuttuu radikaalisesti poikkileikkauksessa B – B, joten näiden leveyksien antamia tuloksia ei ole syytä verrata suoranaisesti muiden jätänpolun leveyksien antamiin tuloksiin. Kuvan 7.4:2 trendiviivoissa olisi havaittavissa jyrkkenemistä, jos jätetään 0,35 ja 0,50 m jätänpolun leveyksiä vastaavat maksimisiirtymät pois trendiviivoista. Laskentatulosten epälineaarisuus kasvaa penkereen siirtymienkin osalta korkeilla akselipainoilla ja kapeilla jätänpolun leveyksillä.

Pohjamaan maksimisiirtymät leikkauksessa C – C (kuva 7.3:6) käyttäytyvät kuvan 7.4:3 mukaisesti erilaisilla akselikuormilla ja jätänpolun leveyksillä.

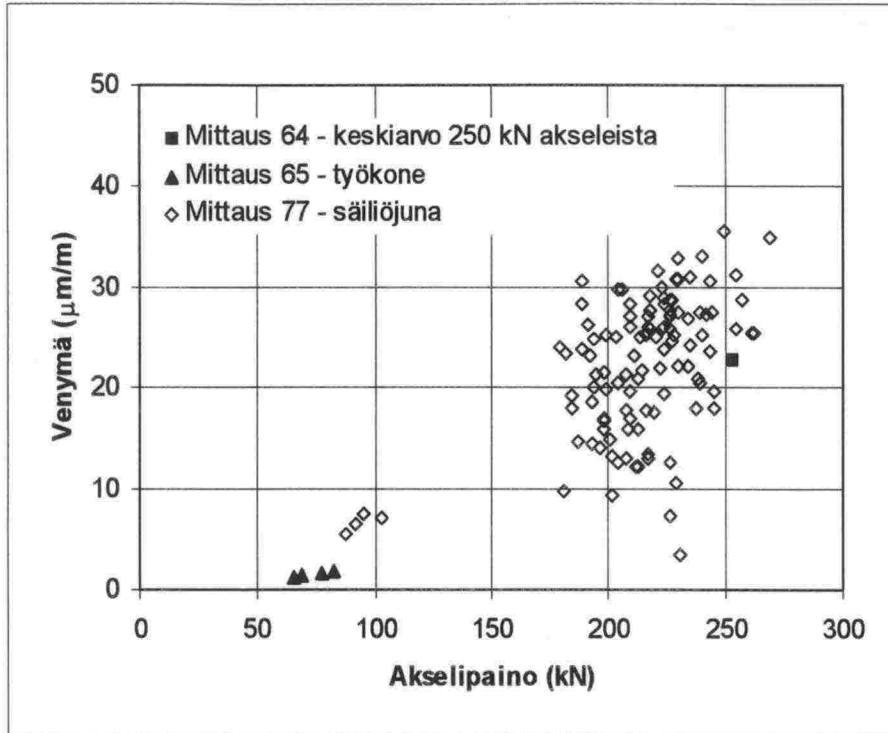


Kuva 7.4:3. Jätkänpolun leveys vs. pohjamaan maksimisivusiirtymä leikkauksessa C – C (kuva 7.3:6) erilaisilla akselipainoilla.

Kuvasta 7.4:3 käy hyvin ilmi kauempana kuormituksesta sijaitsevan leikkauksen C – C (kuva 7.3:6) lähes lineaariset tulokset jopa 300 kN akselipainoihin asti. Pohjamaan sivusiirtymissä saattaa kuitenkin esiintyä epälineaarisuutta poikkileikkauksen sijaitessa lähempänä pengertä.

7.5 Pengerleveyden vaikutukseen liittyvät havainnot mittaustuloksissa

Koska instrumentointikohteen mittausjärjestelyt oli ratapenkereestä tehtävien mittausten osalta ensisijaisesti suunniteltu ratapenkereen pystysuuntaista toimintaa kuvaavia mallinnustarkasteluja palveleviksi, eivät mittaustulokset anna kovin vankkaa pohjaa pengerleveyden vaikutukseen liittyvien havaintojen ja päätelmien tekemiseen. Leveysvaikutuksen kannalta selvästi mielenkiintoisimmat mittaustulokset on saatu sisäkiskon puolelle syvyystasolle Kv – 1,3 m vaakasuuntaan asennetulla venymäanturilla numero 7. Tällä anturilla mitattujen vaakavenymien arvoja akselipainon funktiona on esitetty kuvassa 7.5:1.



Kuva 7.5:1 Anturilla numero 7 mitattuja vaakavenymiä akselipainon funktiona.

Vaikka mittaustulosten hajonta kuvassa 7.5:1 onkin melko suuri, näyttäisivät penkereen vaakasuuntaiset vetomuodonmuutokset pienillä, alle 100 kN akselipainoilla pysyvän varsin pieninä. Yli 150 kN akselipainoilla muodonmuutokset näyttäisivät kuitenkin kasvavan varsin nopeasti akselipainon kasvun myötä. Koska pengermateriaalit periaatteessa ovat vetoa kestävämpiä, liittyy vetojännitysten esiintymiseen ilmeinen riski myös palautumattomien muodonmuutosten kehittymisestä ratapenkereeseen. Näin ollen venymäanturin numero 7 antamaa tulosta voidaan pitää siinä määrin hälyttävänä, että pengerveveyden vaikutusta olisi mitä ilmeisimmin syytä selvittää tarkemmin ennen kuin lopullisia päätöksiä korotettujen akselipainojen käyttöön otosta tehdään.

Kuten kappaleessa 4.5.2 edellä jo todettiin, ei anturin numero 7 rinnakkaisanturilla – anturi numero 18 – valitettavasti saatu mittaustuloksia lainkaan, koska anturi oli mittaussajankohtaan mennessä kulkeutunut mittaussalueensa ulkopuolelle. Liikkeen suunta oli tällöinkin kuitenkin ollut sama kuin anturilla 7 kuormituspulssien aikana mitatulla liikkeellä eli anturin numero 18 kulkeutumisen mittaussalueensa ulkopuolelle olisi periaatteessa voinut aiheuttaa toistuvien vetomuodonmuutossyklien yhteydessä kumuloitunut palautumaton muodonmuutos.

Koska instrumentointikohteen ratapengertä kavennettiin mittausten kestäessä, pitäisi kaventamisen vaikutuksen periaatteessa olla todettavissa myös ratapenkereestä tehtyjen mittausten tuloksissa. Mittaustulosten tarkkuus ja hajonta huomioon ottaen systemaattisia eroja ennen kaventamista ja kaventamisen jälkeen tehtyjen mittausten välillä ei kuitenkaan ole tähänastisissa mittaustulosten analysoinneissa pystytty toteamaan. Rajallisen mittaustarkkuuden ohella eräs tähän vaikuttava tekijä saattaa olla kavennetun kohdan lyhyys – noin 10 m, mistä johtuen kavennettu penger ei ehkä käyttäydy täysin samalla tavoin, kuin jos penger olisi ollut kauttaaltaan kapeampi.

7.6 Johtopäätökset

Kaksiulotteisella tasomuodonmuutostilan FEM-laskennalla voidaan selvittää suuntaantavasti ratapenkereen käyttäytymistä erilaisten akselikuormien alaisuudessa. Akselikuormien todenmukainen jakaminen penkereelle tällaisessa FEM-laskennassa on erittäin vaikeata, käytännössä mahdotonta. Penkereen yksinkertaistaminen, niin geometrisessä kuin materiaaliparametrien mielessä, tuo myös osansa laskennan epätarkkuuteen. Näin ollen edellä esitetyt laskentatulokset ovat nimenomaan suuntaantavia, mutta eivät missään tapauksessa absoluuttiarvoiltaan välttämättä oikeita. Itse asiassa mallinnustarkastelussa käytetyt penger materiaalien lujuusparametrit onkin mitä ilmeisimmin valittu todelliseen tilanteeseen nähden liian varovaisesti, koska esimerkiksi FEM-mallilla lasketut pölkyn painumat ovat kauttaaltaan vastaavia instrumentointikohteesta mitattuja arvoja suurempia.

Laskennan tuloksiin on vaikuttanut suuresti käytössä olleen FEM-ohjelman (PLAXIS ver. 7.11) automaattinen verkon generointi, joka on aikaansaanut suurta vaihtelua varsinkin penkereen sivusiirtymien tuloksissa. Esimerkiksi vasemman kiskon alapuolelta mitatuissa vaakasuuntaisissa venymissä, leikkaus A – A (kuva 7.3:6), havaitaan selvästi FEM-ohjelman laskennan riittämätön tarkkuus. Laskentatulosten epätarkkuutta voidaan havaita myös muissa tuloksissa. Tämä ongelma on havaittavissa kaikissa numeerisissa laskentamenetelmissä ja -ohjelmissa, mutta korostuu näin yksinkertaisella mallilla tehtävässä laskennassa.

FEM-ohjelmien antamia laskentatuloksien tarkkuuksia voidaan parantaa käytännössä kahdella tavalla. Ns. h-menetelmässä tihennetään elementtiverkkoa halutulta kohdalta. P-menetelmässä nostetaan elementin interpolaatiofunktion astetta. Näiden kahden menetelmän yhdistämistä kutsutaan hp-menetelmäksi. Eri menetelmien suorituskyvyn vertaaminen on vaikeaa, sillä yhteismitallisten argumenttien löytäminen on hankalaa (Kouhia & Tuomala 1997).

Jätäkänpolun leveyden ja akselipainon periaatteellinen vaikutus ratapenkereen siirtymiin ja muodonmuutoksiin on pystytty osoittamaan ainakin jossain määrin. Akselipainon kasvattaminen ja jätäkänpolun leveyden kaventaminen aiheuttavat niin painumissa kuin penkereen sivusiirtymissäkin kasvavaa epälineaarisuutta. Tämä luo pohjan olettaa, että akselipainojen korottamisen ja erilaisten pengerleveyksien yhteisvaikutuksen tarkempi tutkiminen vaatii nyt käytössä olleita laskentaohjelmia kehittyneempien mallinnustyökalujen käyttöä.

8 TÄRINÄ- JA RAITEENMITTAUSTULOKSIA KORIALTA

8.1 Tärinätuloksia Korian mittauksista

8.1.1 Yleistä

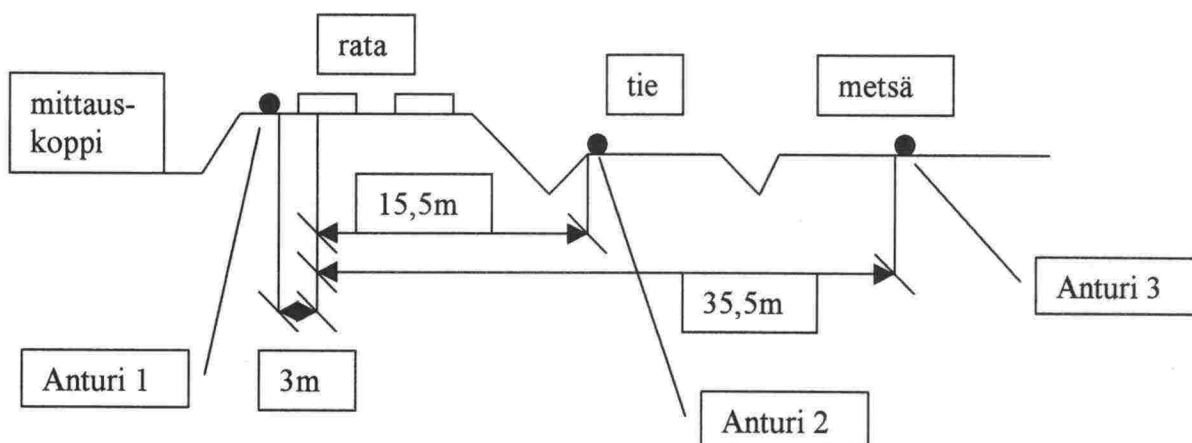
Tämä muistio tärinämittauksista on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia, joka aloitettiin kesällä 1998. Mittaukset toteutettiin Koriolla 7.-9. heinäkuuta 1999. Mittauksista vastasivat yhteistyössä Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulun yrityspalvelu ja Teknillisen korkeakoulun tielaboratorio (TKK/TIE). Raportin valmisteli TKK/TIE.



Kuva 8.1:1 Nopeuden mittaus instrumentointikohteen ylittävästä junasta.

8.1.2 Mittausjärjestelyt

Mittauksissa käytettiin kolmea pystysuuntaista geofonia. Geofonit asennettiin kuvassa 8.1:2 näkyvällä tavalla. Mittausdatan keräämiseen käytettiin mittarin lisäksi kannettavaa tietokonetta. Tallennus suoritettiin mittauskopissa, johon oli vedetty johto jokaisesta geofonista. Maaperäolosuhteista saa lisätietoja tämän raportin muista kappaleista.



Kuva 8.1:2 Mittausjärjestelyt

8.1.3 Mittaustulokset

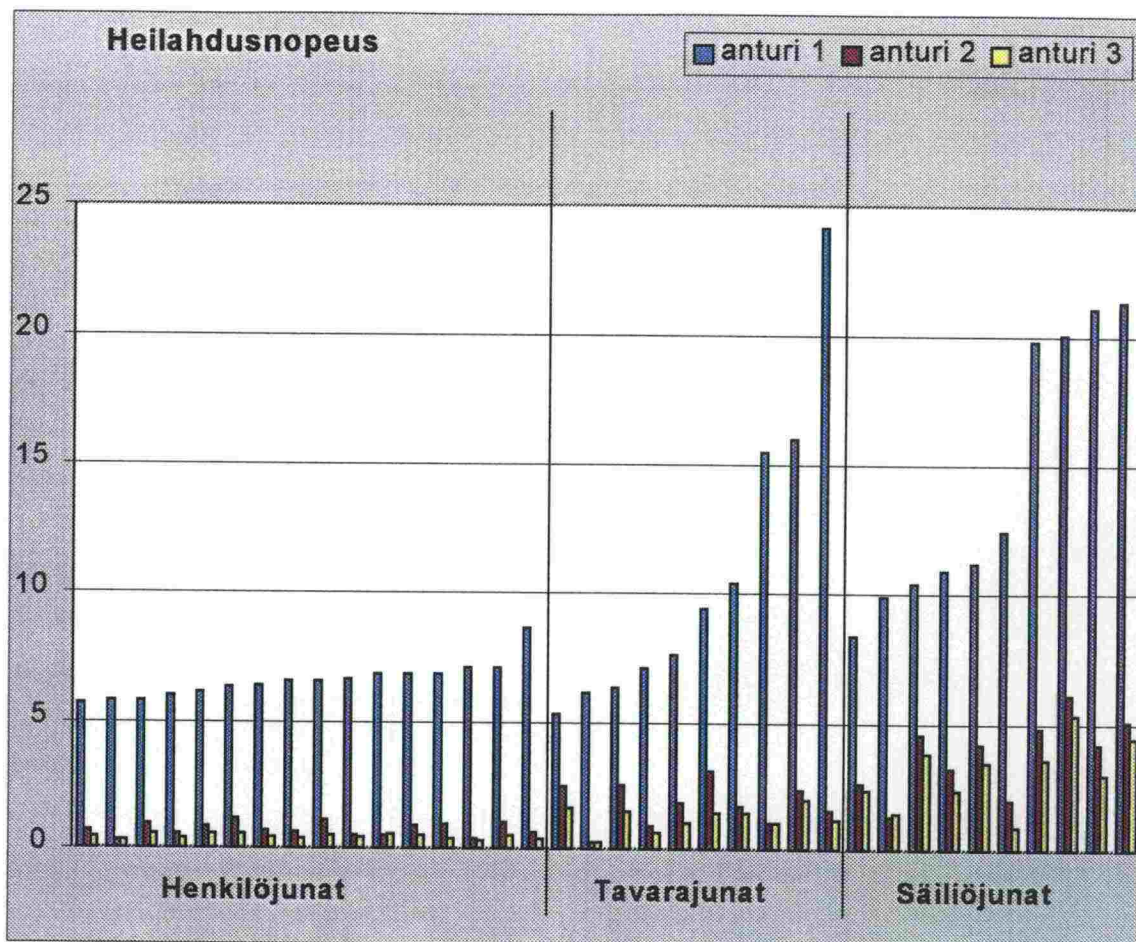
Mittaustuloksina esitetään tässä kaikki junien aiheuttamat heilahdusnopeudet (kuva 8.1:4) ja heilahdusnopeuden vaimeneminen sekä normaalilla asteikolla (kuva 8.1:5) että logaritmisesti (kuva 8.1:6). Heilahdusnopeuden vaimenemiskuvissa käytetyt arvot on saatu laskemalla keskiarvot junatyypeittäin. Lisäksi esitetään eriteltyinä henkilöjunien (kuvat 8.1:7-10), tavarajunien (kuvat 8.1:11-14) ja säiliöjunien (kuvat 8.1:15-18) heilahdusnopeudet jaoteltuina junien massan, pituuden, metripainon ja nopeuden mukaan. Kaikki mittauskynnyksen ylittäneet junat on otettu näissä taulukoissa huomioon lukuun ottamatta lähes tyhjinä ajaneita kahta säiliöjunaa, jotka on jätetty selkeyden vuoksi pois kuvista 8.1:15-18. Lähtötiedot tässä esitetyille taulukoille annetaan liitteessä 5.



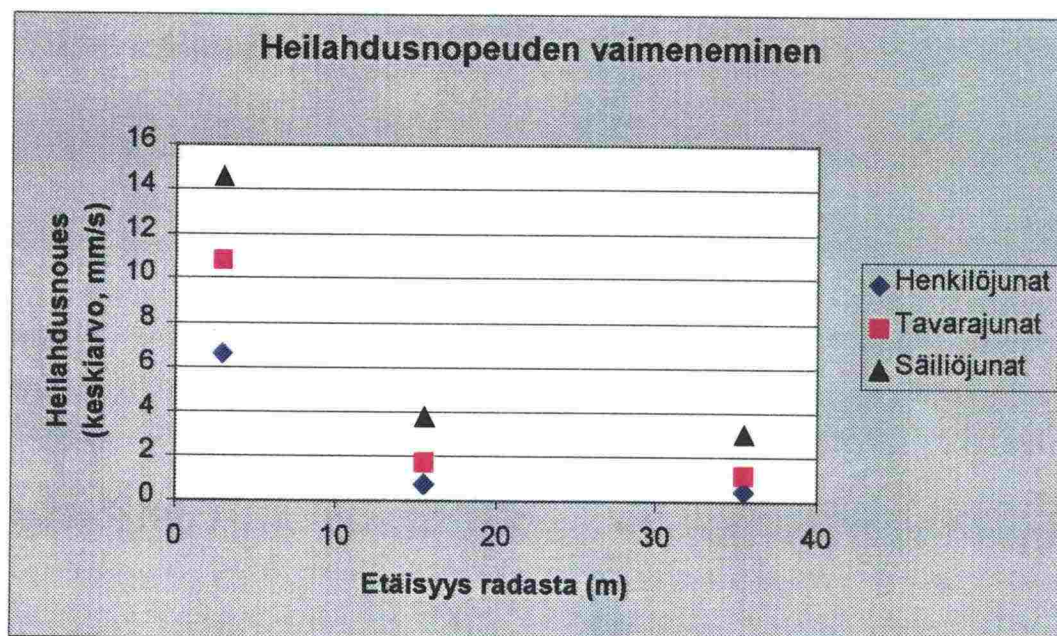
Kuva 8.1:3 Koejuna

Käytössä ollut koejuna (kuva 8.1:3) ei ylittänyt mittauskynnystä. Mittauskynnys oli 5 mm/s. Koejunassa oli vain yksi 100 tonnin vaunu, eli akselipaino oli 250 kN. Koejunan lisäksi ainoastaan lähijunien heilahdusnopeudet eivät ylittäneet mittauskynnystä. Tämä viittaisi siihen, että junan pituudella on oleellinen merkitys tärinän synnyssä.

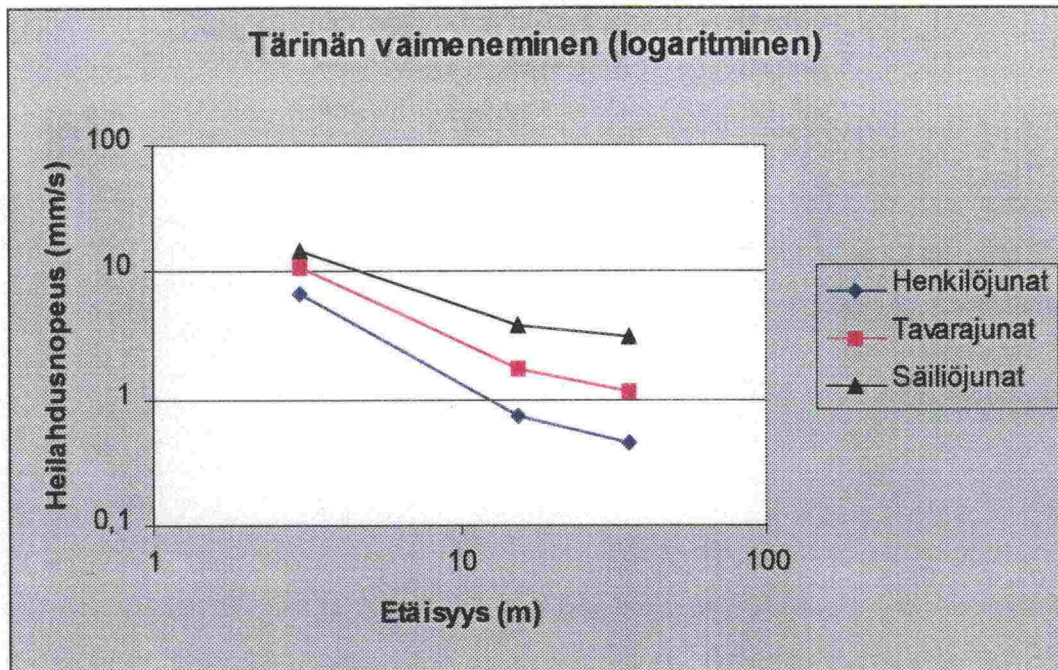
Mittauksiin käytetyt anturit asennettiin ratapenkereen reunalle, tien pientareelle ja metsään, siten että anturin 1 etäisyys radasta oli 3m, anturin 2 etäisyys 15,5m ja anturin 3 etäisyys 35,5m.



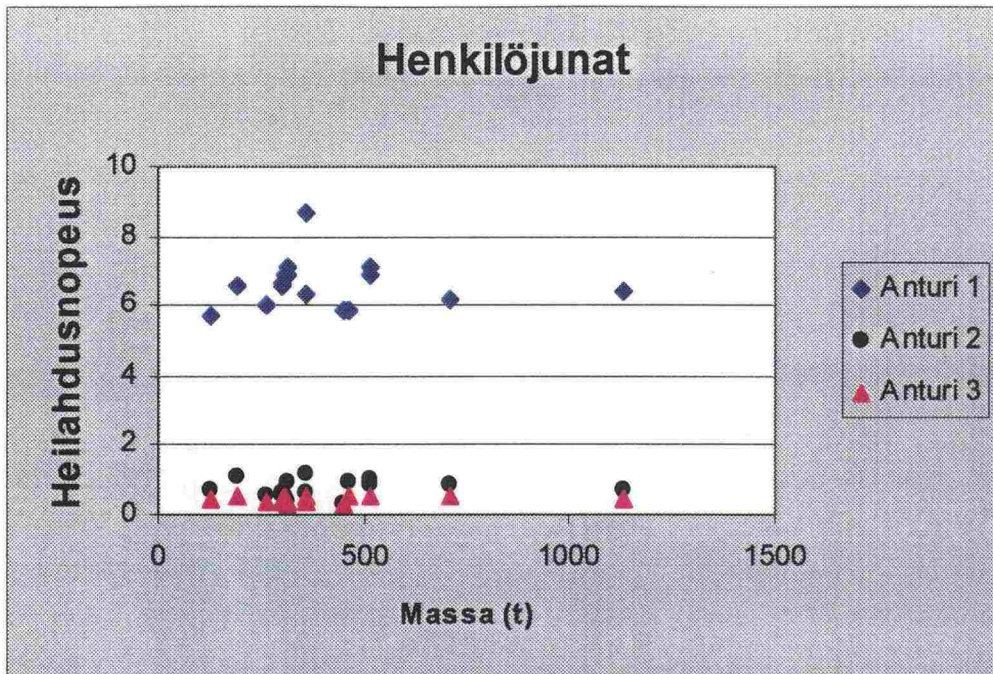
Kuva 8.1:4 Kaikki junat



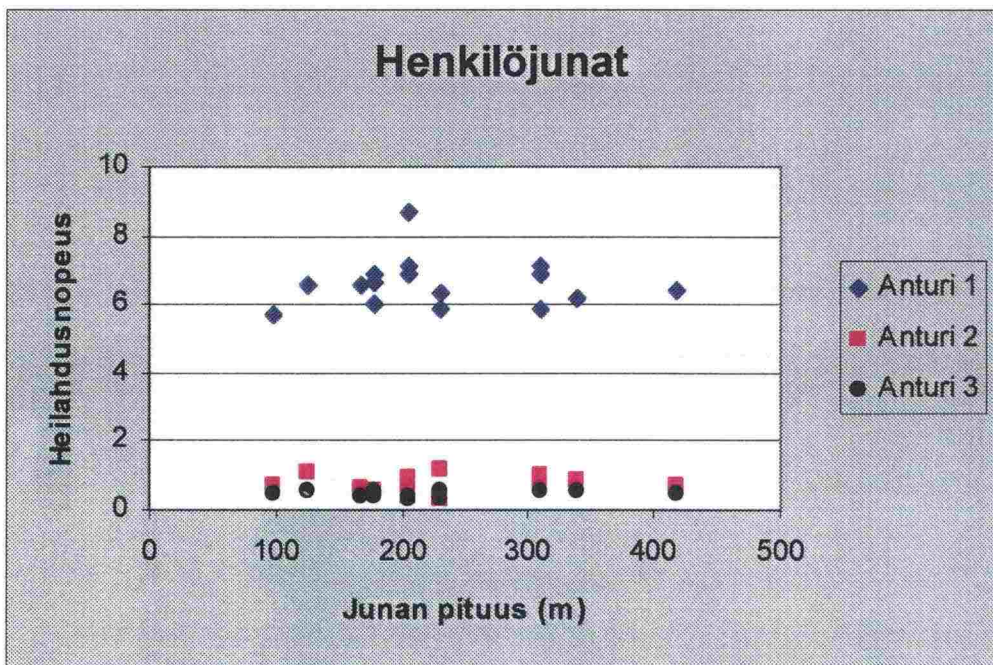
Kuva 8.1:5 Heilahdusnopeuksien vaimeneminen eri junatyypeillä



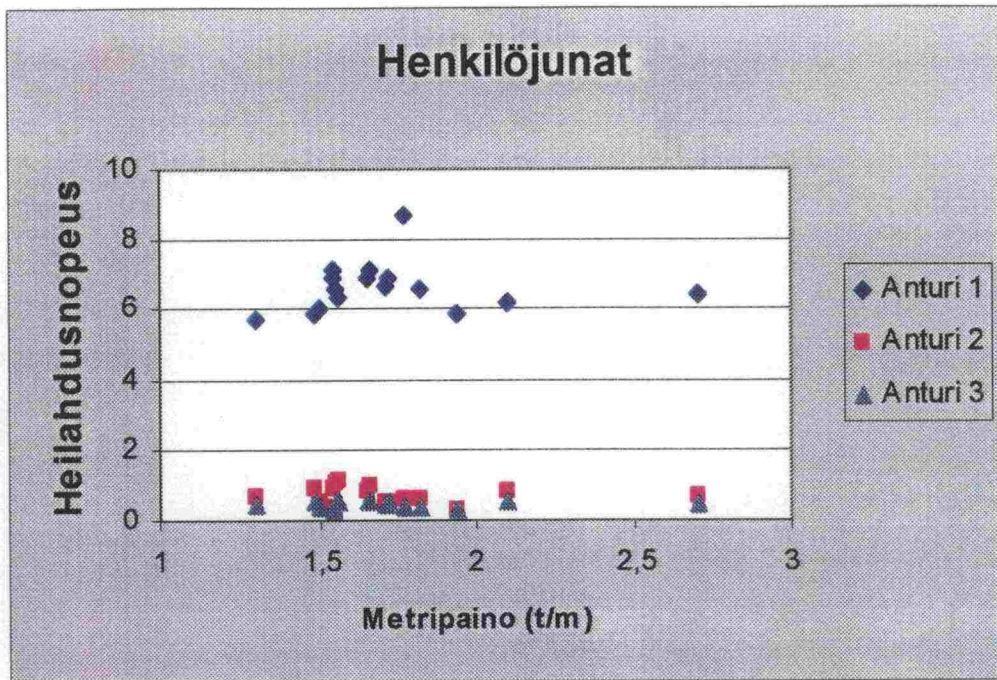
Kuva 8.1:6 Heilahdusnopeuksien vaimeneminen eri junatyypeillä (logaritmisesti)



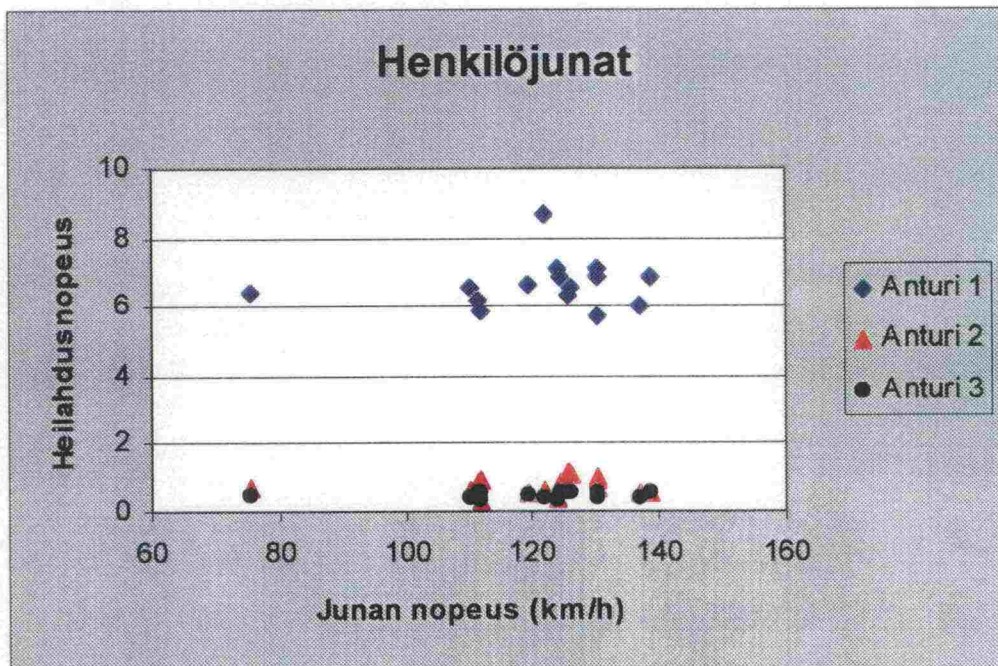
Kuva 8.1:7 Heilahdusnopeus massan suhteen



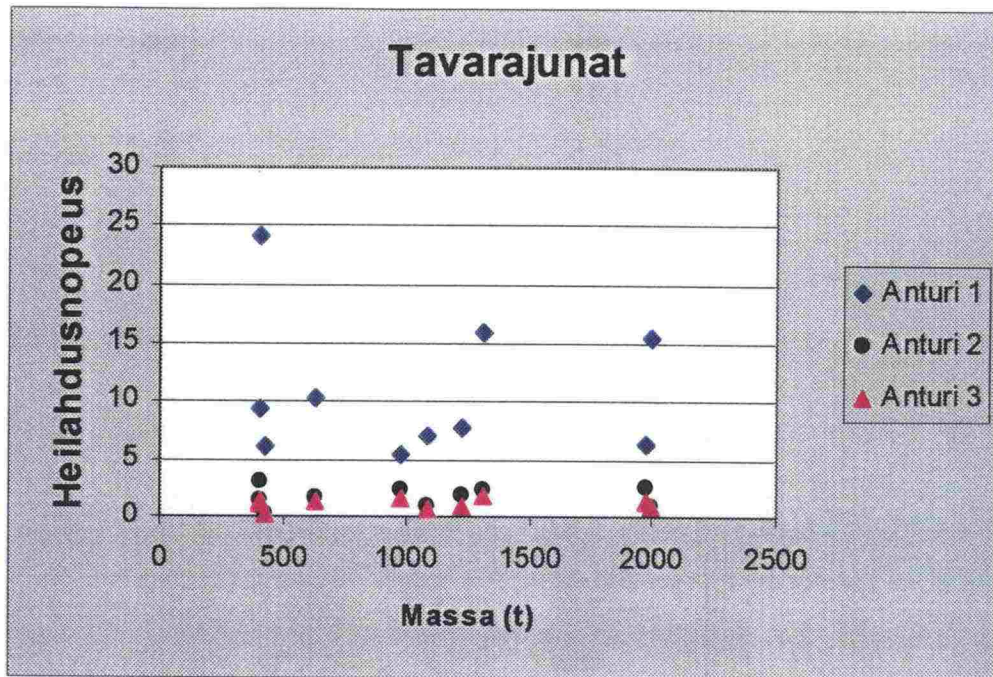
Kuva 8.1:8 Heilahdusnopeus junan pituuden suhteen



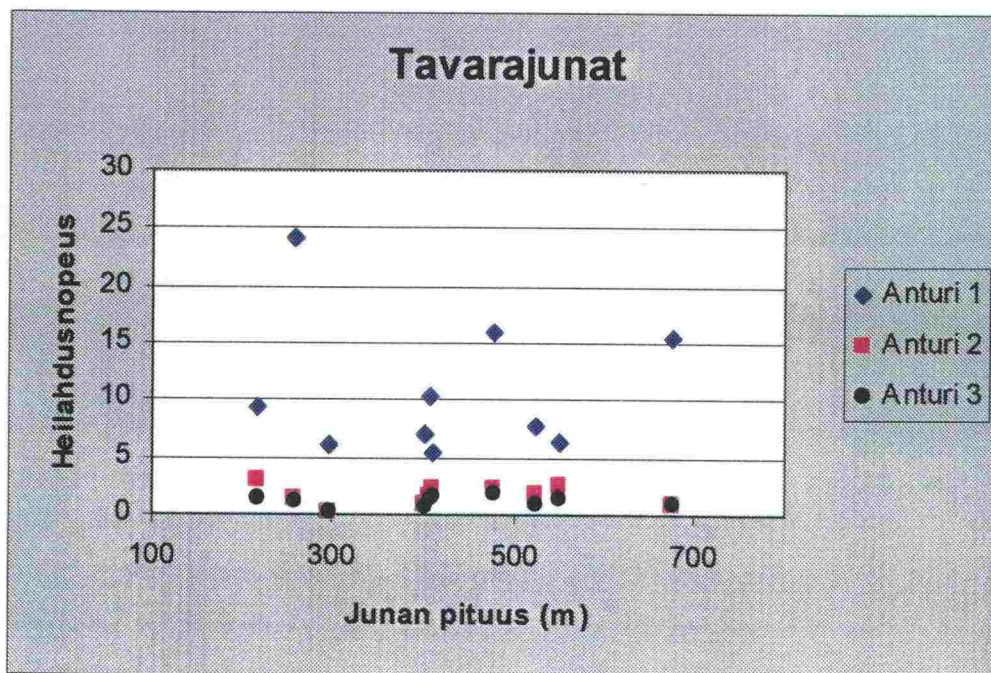
Kuva 8.1:9 Heilahdusnopeus metripainon suhteen



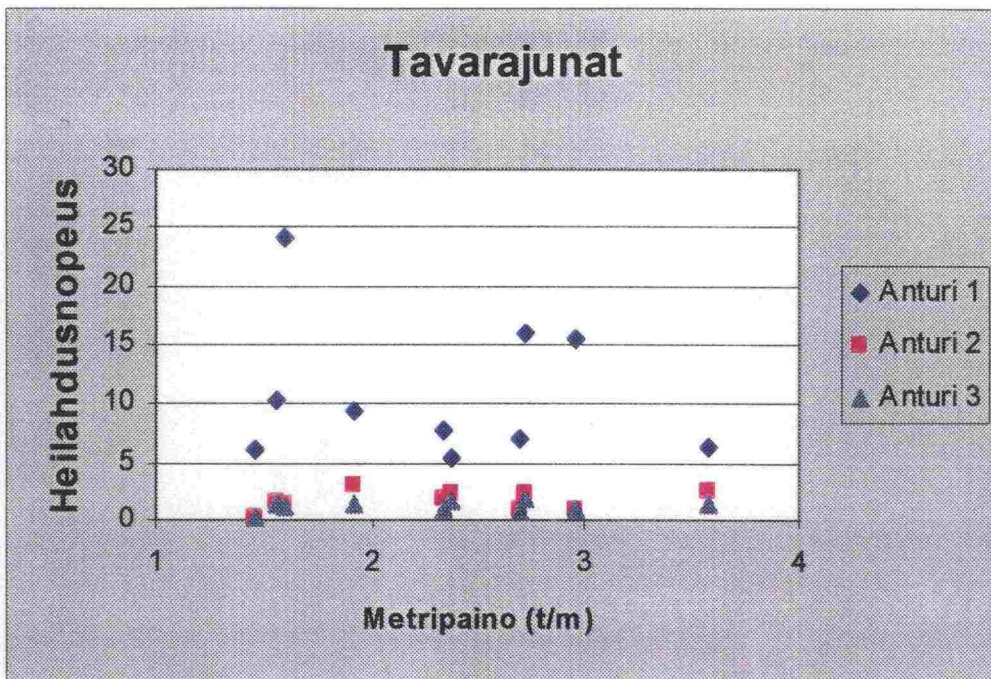
Kuva 8.1:10 Heilahdusnopeus junan nopeuden suhteen



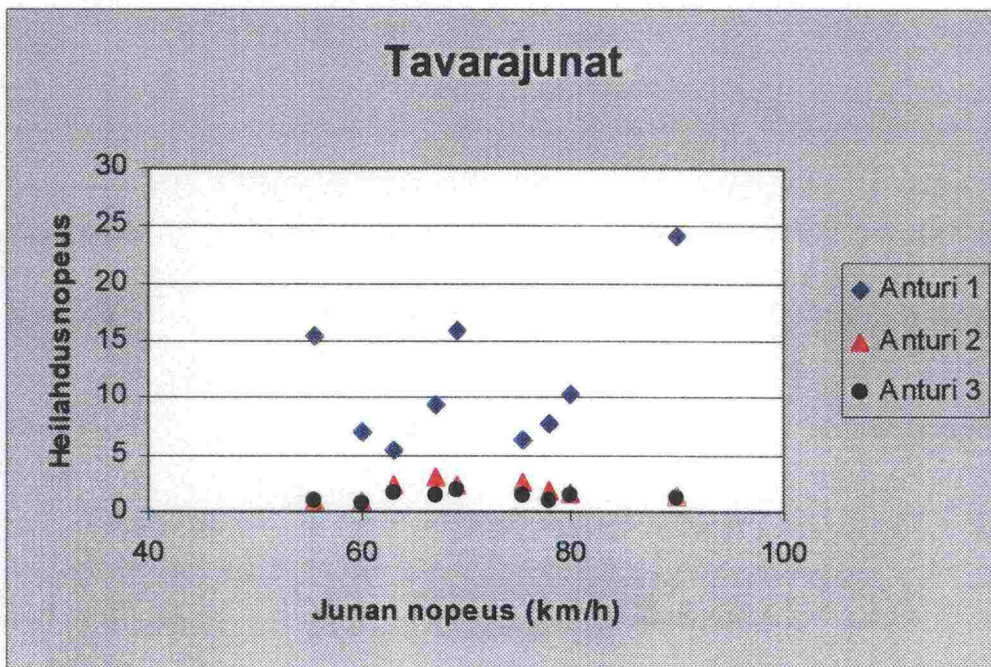
Kuva 8.1:11 Heilahdusnopeus massan suhteen



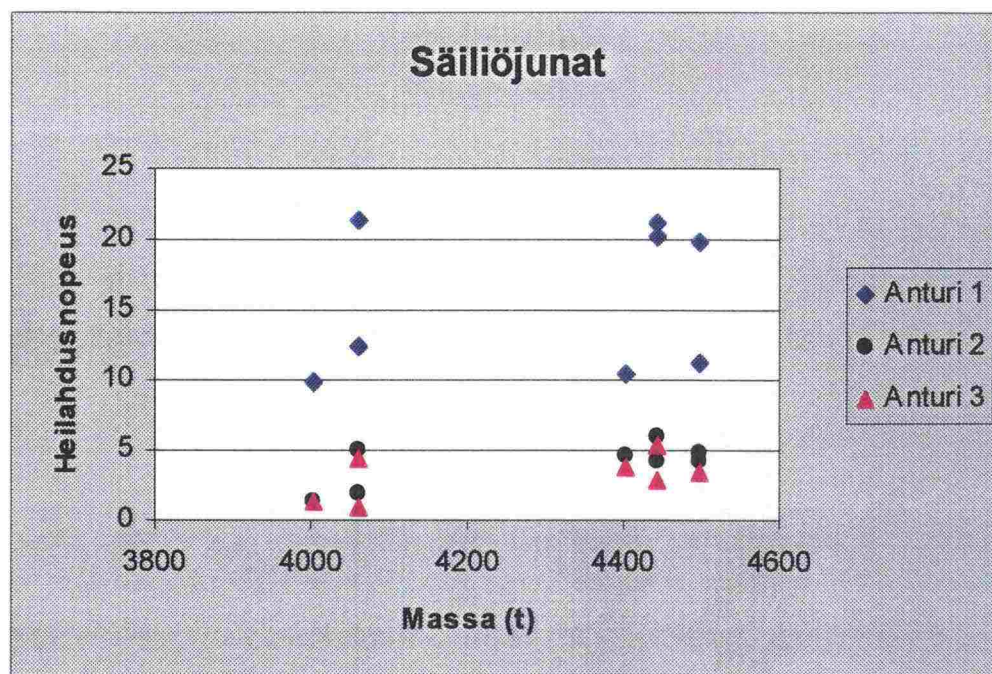
Kuva 8.1:12 Heilahdusnopeus junan pituuden suhteen



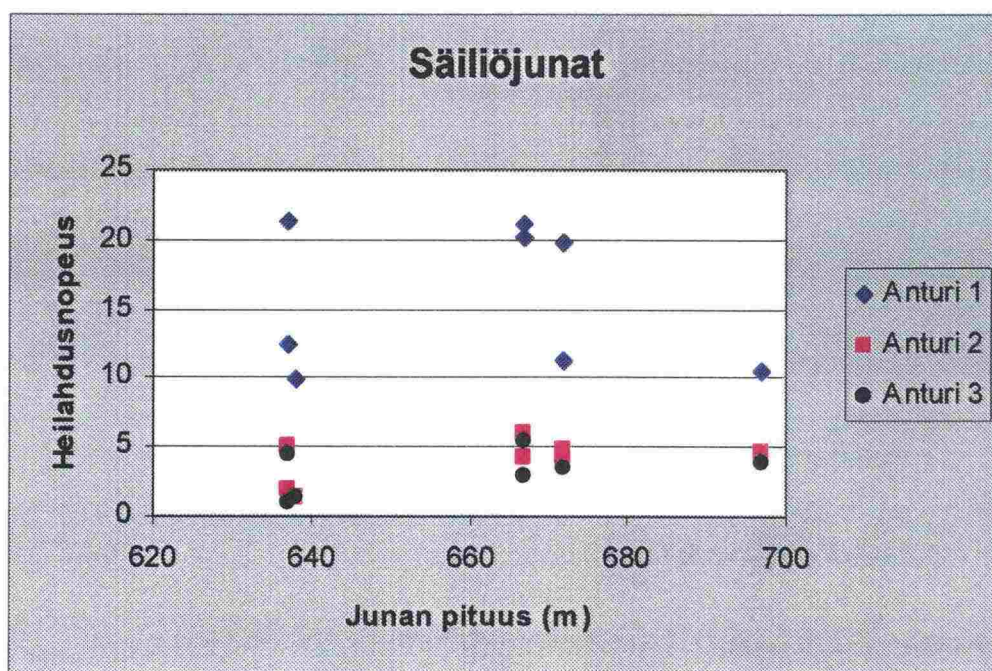
Kuva 8.1:13 Heilahdusnopeus metripainon suhteen



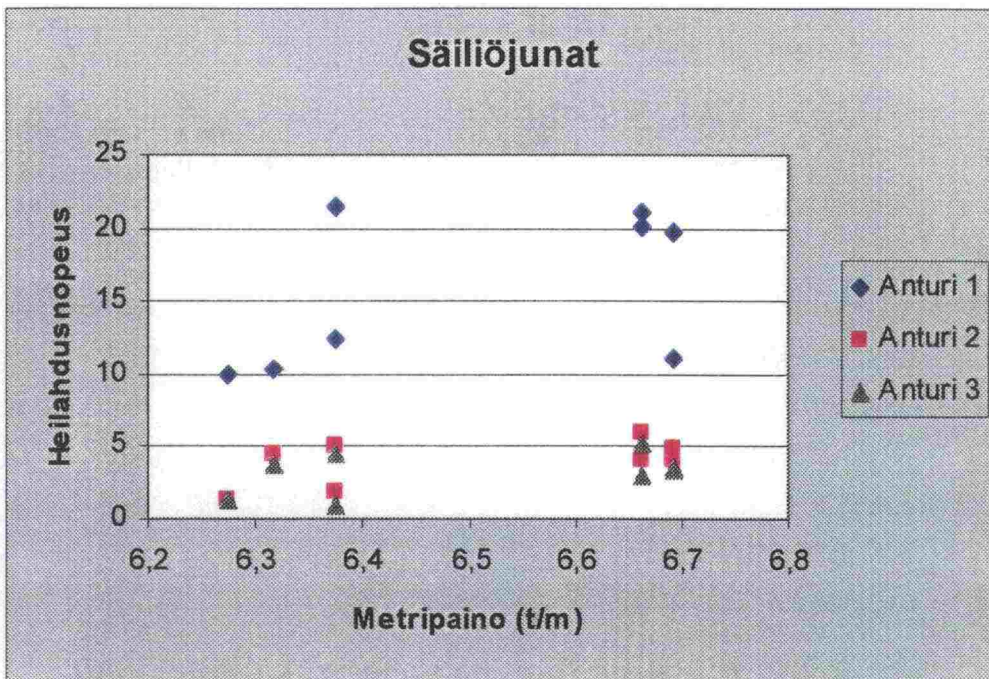
Kuva 8.1:14 Heilahdusnopeus junan nopeuden suhteen



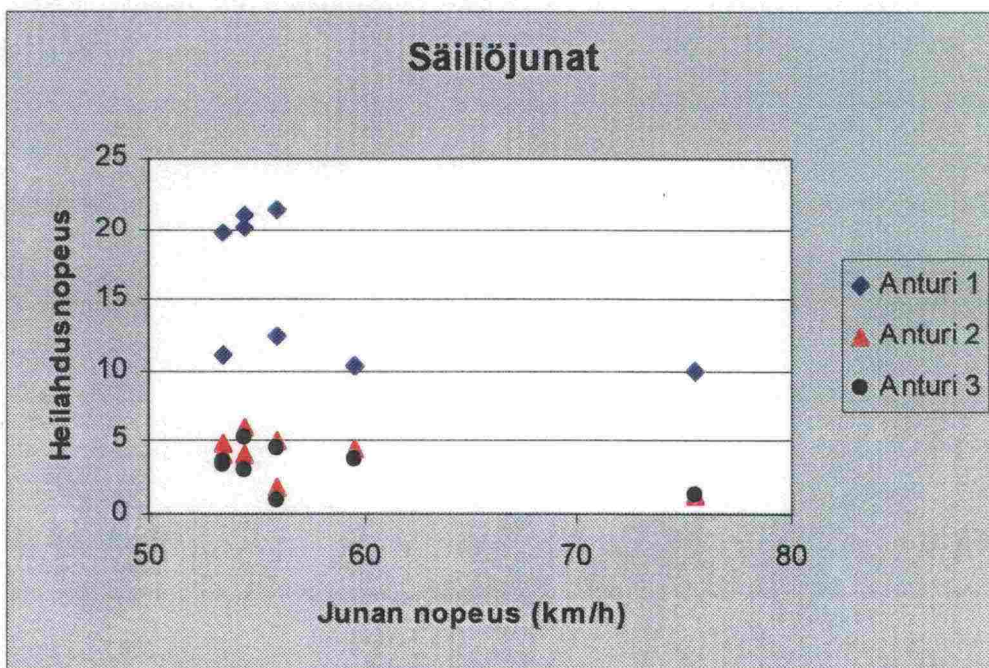
Kuva 8.1:15 Heilahdusnopeus massan suhteen



Kuva 8.1:16 Heilahdusnopeus junan pituuden suhteen



Kuva 8.1:17 Heilahdusnopeus metripainon suhteen



Kuva 8.1:18 Heilahdusnopeus junan nopeuden suhteen

8.1.4 Tulosten arviointia

Tulokset vahvistavat käsityksen säiliöjunien korkeista tärinäarvoista (kuva 8.1:4). Yleisesti voidaan todeta, että tulokset eivät kuitenkaan kerro selkeästi esimerkiksi nopeuden, massan tai junan pituuden vaikutuksesta tärinän synnyssä. Esimerkiksi säiliöjunien korkeat heilahdusnopeuksien arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia henkilöjunien arvojen kanssa, koska kalusto on erilaista. Merkillepantava ilmiö on säiliöjunien aiheuttaman tärinän hidas vaimeneminen (kuvat 8.1:5-6).

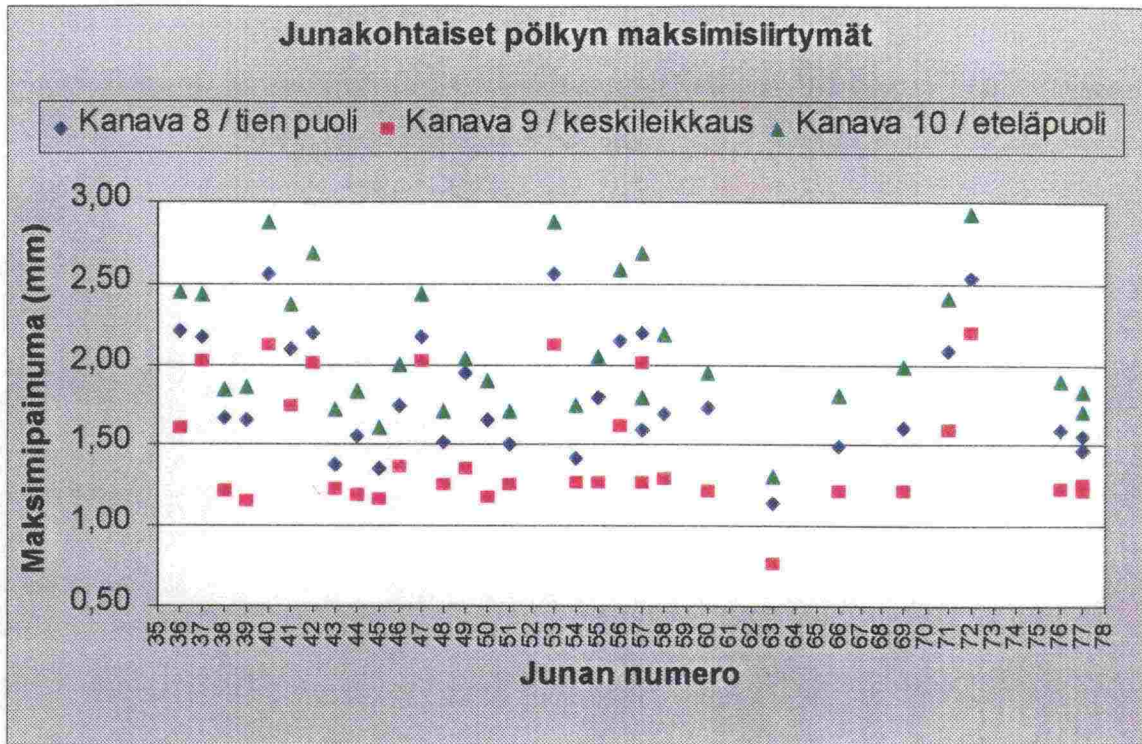
8.2 Tärinän vertaaminen pölkyn liikkeeseen

8.2.1 Yleistä

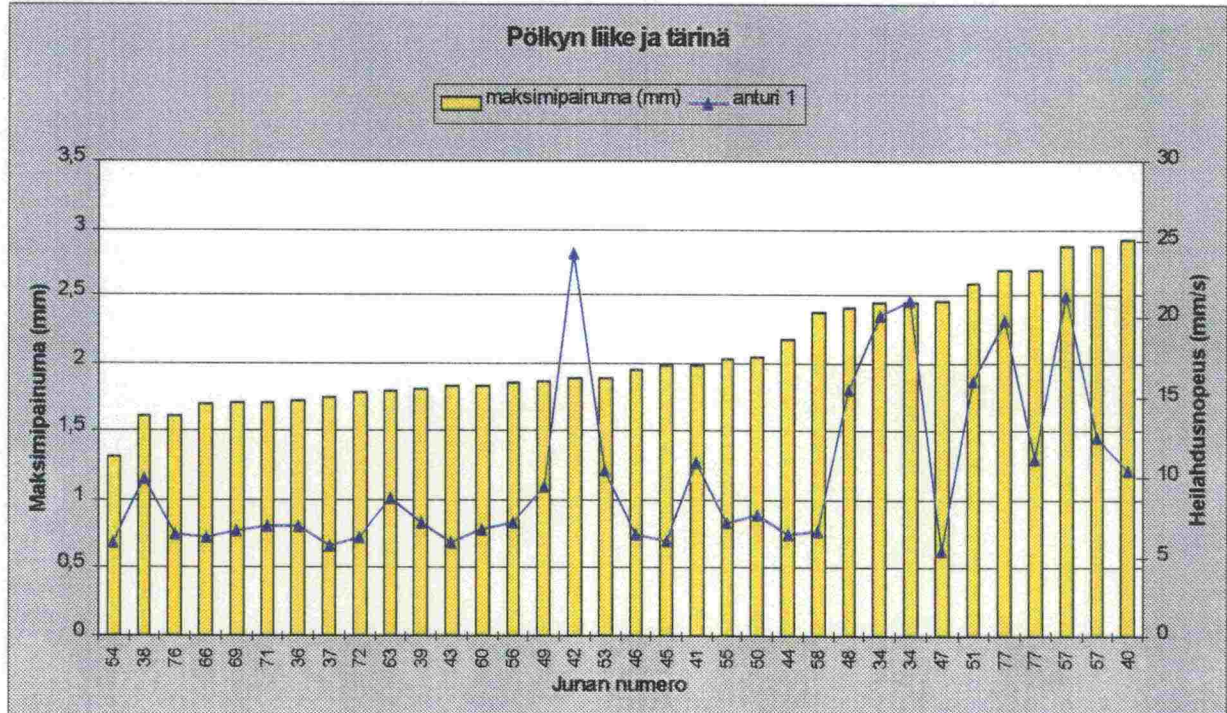
Koriolla tehtiin tärinämittausten ohella myös paljon muita mittauksia, joista kerrotaan toisaalla tässä raportissa tarkemmin. Koriolla tehtyjen pölkyn siirtymämittausten tuloksia päätettiin kuitenkin käyttää hyväksi tässäkin tutkimuksessa. Seuraavissa kuvissa esitetään lyhyesti ensin pölkyn junakohtaisia maksimisiirtymiä ja sitten verrataan näitä arvoja tärinään eli heilahdusnopeuksien maksimiarvoihin. Vertailut tehdään erikseen kaikkien anturien tulosten ja painumien välillä.

8.2.2 Pölkyn siirtymät ja tärinä

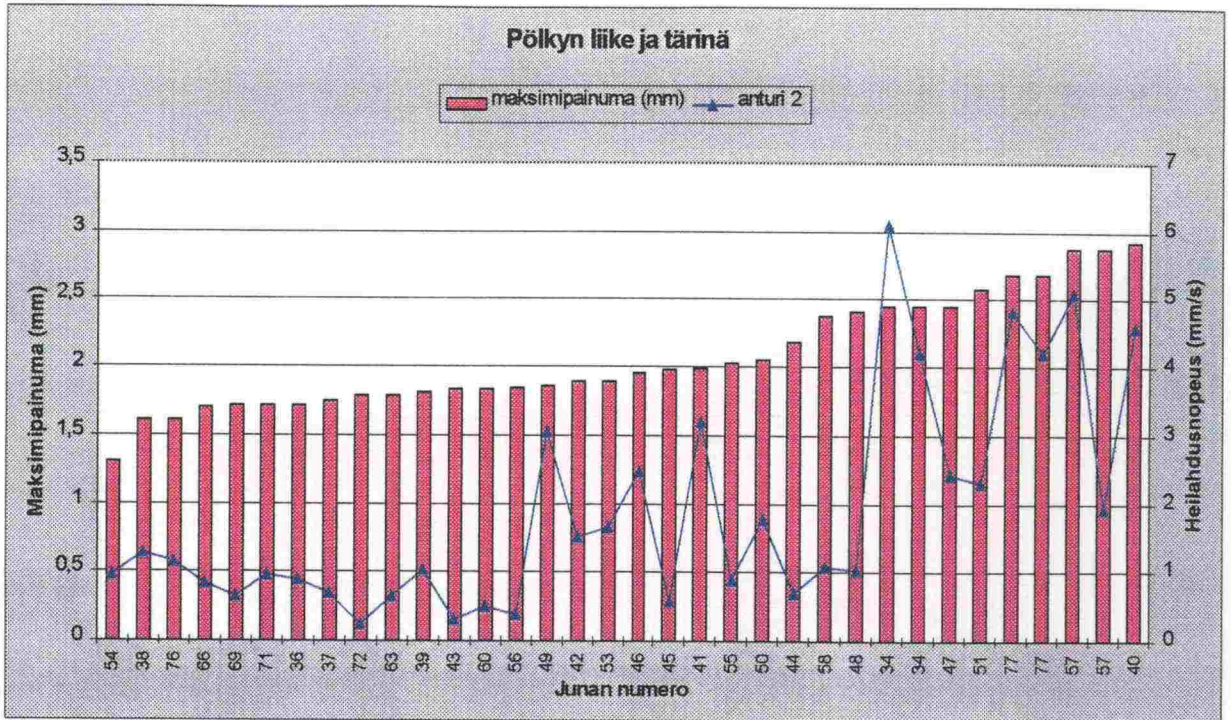
Kuvasta 8.2:1 nähdään pölkkyyn aiheutuneet junakohtaiset painuman maksimiarvot. Pölkyn keskikohta näyttää siirtyvän selkeästi vähemmän kuin päädyt. Seuraavissa vertailukuvissa (kuvat 8.2:2-4) tarkastellaan tärinäarvoja pölkyn eteläpään (kuvassa 8.2:1 kanava 10) painumiin.



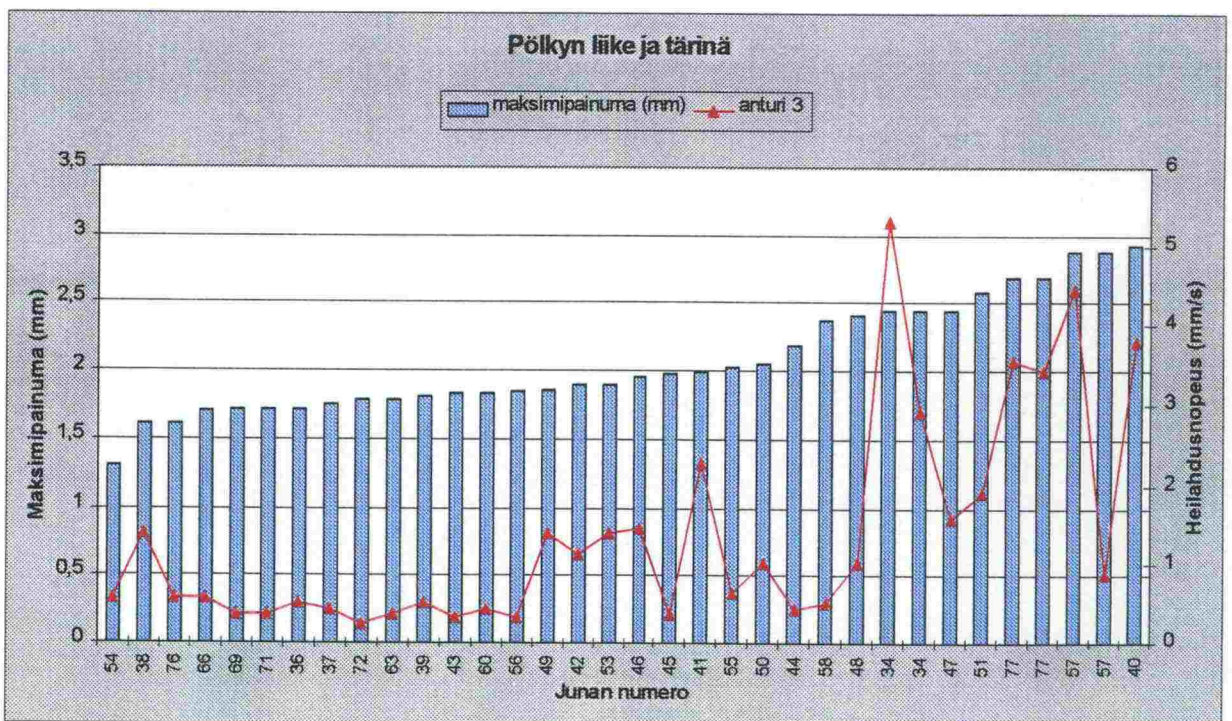
Kuva 8.2:1 Junakohtaiset pölkyn maksimipainumat



Kuva 8.2:2 Pölkyn liike ja värinä (anturi 1)



Kuva 8.2:3 Pölkyn liike ja värinä (anturi 2)



Kuva 8.2:4 Pölkyn liike ja värinä (anturi 3)

Lähtötiedot tässä esitetyille kuville annetaan liitteessä 5. Kuvissa 8.2:2-4 esitetään siis pölkyn maksimipainuma ja heilahdusnopeus toistensa suhteen. Pölkyn siirtymätiedot

ovat samat kaikissa kuvissa. Muuttujana on käytetty värinäantureista saatua heilahdusnopeutta, jonka asteikko on kuvion oikeassa laidassa. On huomattava, että kuvioissa heilahdusnopeuden skaalaus vaihtelee. Näiden tietojen perusteella on myös laskettu korrelaatiot pölkyn maksimipainuman ja eri heilahdusnopeusarvojen välille. Nämä tiedot esitetään taulukoissa 8.2:1-3. Sekä kuvista että korrelaatiotuloksista voidaan havaita, että korrelaatio ei ole kovin voimakas. Kuitenkin kauempana radasta korrelaatio vahvistuu selvästi.

Taulukko 8.2:1 Regressiotunnuslukuja (maksimipainumat ja anturin 1 heilahdusnopeudet, kts. myös kuva 8.2:2)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Kerroin R	0,5585108
Korrelaatiokerroin	0,3119344
Tarkistettu korrelaatiokerroin	0,2904323
Keskivirhe	0,3547745
Havainnot	34

Taulukko 8.2:2 Regressiotunnuslukuja (maksimipainumat ja anturin 2 heilahdusnopeudet, kts. myös kuva 8.2:3)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Kerroin R	0,7004016
Korrelaatiokerroin	0,4905624
Tarkistettu korrelaatiokerroin	0,4746425
Keskivirhe	0,3052691
Havainnot	34

Taulukko 8.2:3 Regressiotunnuslukuja (maksimipainumat ja anturin 3 heilahdusnopeudet, kts. myös kuva 8.2:4)

<i>Regressiotunnusluvut</i>	
Kerroin R	0,6948018
Korrelaatiokerroin	0,4827496
Tarkistettu korrelaatiokerroin	0,4665855
Keskivirhe	0,3076011
Havainnot	34

8.2.3 Päätelmät

Näiden tulosten perusteella voidaan arvioida, että pölkyn junakohtaisen maksimiliikkeen ja tärinän välillä ei ole suoraviivaista yhteyttä. Kauempana radasta korrelaatio on kuitenkin selkeästi olemassa. Laajemmasta havaintoaineistosta voitaisiin saada lisätietoa pölkyn liikkeiden ja tärinän välisen yhteyden selvittämiseen.

8.3 Raiteenmittaustuloksia

8.3.1 Mittausohjelma

Korian akselipainokokeiden raidemittaukset tehtiin raidelevyden osalta kahtena eri mittauskertana: ensimmäinen mittaus ennen kokeiden aloitusta 6. heinäkuuta ja toisen kerran kokeiluajanjakson jälkeen. Mittausten tavoitteena oli selvittää muutokset raidelevydessä koejakson aikana. Kiskon jalan ja selän leveydet sekä ulommaisten sivueristimien välinen ns. outer-to-outer -etäisyys ovat mitattu kiskon ja pölkkyjen mittatarkkuuden toteamiseksi.

Raidelevydet on mitattu 40:n peräkkäisen pölkyn kohdalta, joista puolet on instrumentoidun pölkyn eteläpuolella (Koria) ja loput pohjoispuolella (Kouvola). Mitatut pölkkyt merkittiin ennen mittauksia. Pölkky numero 10 on instrumentoitu pölkky.

Kiskon jalan ja hamaran leveys sekä ulommaisten sivueristimien välinen etäisyys on mitattu joka viidennen pölkyn kohdalta.

8.3.2 Mittausvälineet

Raideleveys: manuaalinen raideleveysmittari merkkiä Sola Superelevation, joka on varustettu digitaalisella Mitutoyo IDU25 – mitalla

Jalan leveys: Mitutoyo CDN-P30 –työntömitta

Hamaran leveys: Mitutoyo CD-15CP –työntömitta, joka on modifioitu hamaran leveyden määrittämistä varten

Outer-to-Outer: Alumiininen erikoismitta. Mittalaitteena Mitutoyo CDN-P30

Kaikkien Mitutoyo –mittalaitteiden lukematarkkuus on 0,01 mm.

8.3.3 Mittaustulokset

Raidelevyden mittaustulokset on esitetty taulukossa 8.3:1. Erotussarakkeessa on ilmoitettu leveyden muutos ennen ja jälkeen koejakson. Erotuksen keskiarvo on 0,01 mm vaihteluvälin ollessa $-0,23...+0,25$ mm. Tulokset osoittavat raidelevyden säilyneen käytännössä muuttumattomana.

Taulukko 8.3:1: Raidелеvydet ja leveyden muutos

Pölkyn numero	Mittaus 6.7. raideleveys	Mittaus 8.7. raideleveys	Erotus +lev. kasv. / - lev. pien.
1E	1525,45	1525,69	0,25
2E	1525,11	1525,20	0,09
3E	1524,78	1524,97	0,19
4E	1524,61	1524,78	0,17
5E	1524,50	1524,65	0,15
6E	1524,78	1524,86	0,08
7E	1524,97	1525,24	0,26
8E	1525,18	1525,33	0,14
9E	1525,58	1525,50	-0,08
10E	1525,64	1525,64	-0,01
1	1525,70	1525,57	-0,13
2	1525,84	1525,77	-0,07
3	1525,87	1525,82	-0,05
4	1525,87	1525,98	0,11
5	1525,32	1525,55	0,23
6	1525,07	1525,22	0,14
7	1524,38	1524,66	0,28
8	1524,02	1524,15	0,13
9	1523,91	1523,84	-0,07
10	1523,86	1523,76	-0,10
11	1523,88	1523,68	-0,19
12	1524,08	1524,09	0,01
13	1524,62	1524,52	-0,10
14	1525,19	1525,26	0,07
15	1525,48	1525,49	0,01
16	1525,33	1525,34	0,01
17	1524,98	1525,03	0,05
18	1524,81	1524,64	-0,17
19	1525,04	1525,15	0,12
20	1525,67	1525,54	-0,13
1P	1525,74	1525,70	-0,04
2P	1525,47	1525,35	-0,13
3P	1525,79	1525,71	-0,08
4P	1525,69	1525,82	0,13
5P	1525,83	1525,70	-0,13
6P	1525,42	1525,43	0,02
7P	1525,07	1524,94	-0,13
8P	1524,32	1524,23	-0,09
9P	1524,15	1524,03	-0,12
10P	1524,31	1524,08	-0,23

Taulukossa 8.3:2 on ilmoitettu muut mittaustulokset. Tulokset osoittavat kiskojen olevan laadultaan tasaiset ja täyttävän kiskoille asetut toleranssivaatimukset: hamaran leveys 71,5...72,5 mm ja jalan leveys 148,9...151,0 mm. Ulommaisten sivueristimien etäisyys poikkeaa standardimitasta 1772 alle 2 mm yhtä pölkkyä lukuun ottamatta. Keskiarvo O-to-O -mitalle on 1771 mm.

Kiskojen valmistusmerkinnät olivat: Thyssen UIC60 99, teräslaatu oli 260 (UIC 900A), pölkkyjen valmistaja oli Parma Betonila ja tyyppi BP 89, valmistusvuosi 1999.

Taulukko 8.3:2. Raiteen kallistus, Outer-to-Outer, kiskon jalan ja hamaran leveydet

Pölkyn numero	Raiteen kallistus		Outer-to-Outer	Kiskon jalan leveys		Kiskon hamaran leveys	
	mittaus 6.7.	mittaus 8.7.		vasen	oikea	vasen	oikea
1E	-1,2	-1,2	1771,54	150,60	150,58	71,84	71,86
5E	0,2	0,8	1771,14	150,61	150,56	71,85	71,86
1	1,7	0,4	1771,54	150,64	150,52	71,86	71,89
5	1,2	0,2	1771,06	150,64	150,53	71,81	71,78
10	0	-0,5	1770,83	150,63	150,60	71,79	71,78
15	1,0	0,8	1770,09	150,69	150,43	71,84	71,78
20	2,0	1,7	1770,71	150,69	150,49	71,88	71,81
5P	2,2	2,2	1772,51	150,64	150,60	71,81	71,89
10P	1,5	1,7	1769,33	150,65	150,46	71,79	71,80

9 YHTEENVETO

9.1 Johtopäätökset instrumentoinnista ja mittauksista

Korian ja Kouvolan välisellä rataosalla sijainneessa instrumentointikohteessa kesällä 1999 tehtyjen mittausten valmistelusta ja käytännön toteutuksesta voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Yleisesti ottaen mittaukset onnistuivat sekä raiteesta että ratapenkereestä tehtyjen mittausten osalta vähintäänkin ennako-odotuksia vastaavasti ellei jopa näitäkin paremmin. Raiteen osalta mittaustulokset jäivät lievästi epämääräisiksi ainoastaan kiskoon vaikuttavan vaakavoiman osalta, mihin siihenkään ei ollut syynä instrumentoinnin toimimattomuus, vaan itse mitattavan suureen pienet absoluuttiarvot ja jossain määrin satunnainen vaihtelu, mikä on tyypillistä suoralle raiteelle. Ratapenkereen osalta mittaustulokset jäivät vastaavasti vajavaisimmiksi vaakasuuntaisten venymien osalta, joiden mittaamiseksi instrumentointikohteissa tehtyjä järjestelyjä tosin alun alkaenkin pidettiin jossain määrin kokeiluluonteisina.
- Erittäin tärkeänä tekijänä mittausten onnistumisen kannalta voidaan pitää instrumentoinnin huolellista ennakkosuunnittelua, jonka mahdollisti tilaajatahon realistinen näkemys tehtävien toimenpiteiden perusteellisen valmistelun tarpeellisuudesta ja hyödyllisyydestä.
- Ratapenkereen sisään sijoitettujen mittausinstrumenttien asennuksen osalta on syytä todeta, että kestoaltaan muutaman tunnin pituiseksi rajoittunut asennuskatko teki asennustyöstä hyvin paineenalaista. Koska mittausinstrumenttien asennus tulisi luotettavien mittaustulosten varmistamiseksi kuitenkin pystyä tekemään äärimmäisen huolellisesti, pitäisi mahdollisten tulevien instrumentointikohteiden työaikataulussa ehdottomasti pyrkiä pidemmän asennusajan varaamiseen. Joiltain osin nyt toteutetusta kohteesta saadut kokemukset tosin mahdollistavat myös asennustyön nopeamman suorituksen tulevissa kohteissa.
- Ennako-odotusten vastaisesti myös tukikerroksen sisältä saatiin järkeviä mittaustuloksia, vaikkakin tulosten hajonta oli tällöin suurempaa kuin mitä se oli hienorakeisempaan materiaaliin asennettujen mittausinstrumenttien kyseessä ollen.
- Ratapenkereen sisään asennetut mittausinstrumentit kestivät asennuksen jälkeen tehdyistä täyttötöistä ja raiteen tukemisesta aiheutuneet rasitukset hyvin. Mittausten toteutusajankohtaan mennessä ainoastaan yksi venymäanturi oli tullut käyttökelvottomaksi, mutta siihenkin oli ilmeisesti syynä anturin joutuminen mittaualueensa ulkopuolelle eikä niinkään anturin varsinainen vaurioituminen.
- Itse mittausten toteutus sujui ennakkosuunnitelmien mukaisesti, eikä mainittavia ongelmia tai häiriöitä esiintynyt. Käytännön havaintona mittauspaikalla kuitenkin oli, että jos näkyvyys junien tulosuuntaan on merkittävästi nyt toteutetussa instrumentointikohteessa vallinneita olosuhteita huonompi, tulee mittausten käynnistys automatisoida.

- Kaiken kaikkiaan yhteistyö instrumentointikohteen alueella meneillään olleen perusparannustyömaan toteutusorganisaation kanssa sujui kiitettävällä tavalla. Samaa voidaan toki sanoa myös instrumentoinnin ja mittausten toteutukseen osallistuneiden organisaatioiden välisestä yhteistyöstä.

9.2 Johtopäätökset raiteen toiminnan mallintamisesta

Mittaustulosten ja niille toistaiseksi tehtyjen tarkastelujen ja analysointien perusteella voidaan raiteen osalta todeta seuraavaa:

- Mikäli päästään tilanteeseen, että ratapenkereen ja perusmaan ominaisuudet tuntemalla pystytään mallinnuksen avulla määrittämään alustaluvun arvo tietyllä rataosuudella (vertaa kappaleet 6.11 ja 9.3), voidaan kiskon taivutusrasitukset määrittää käyttäen klassillista 'jatkuva-palkki-joustavalla-alustalla'-teoriaa. Alustaluvun sekä raiderakenne- ja kalustotietojen perusteella voidaan määrittää laskennallisesti raiteen karakteristinen pituus, minkä jälkeen voidaan laskea kysymykseen tulevien erilaisten akselikombinaatioiden kiskoon aiheuttamat taivutusmomentit ja staattiset taivutusjännitykset. Mittaustulosten tueksi tarvitaan kirjallisuudesta löytyviä kertoimia kuormitusten dynaamisen luonteen, olosuhteiden yms. tekijöiden aiheuttamien lisärasitusten huomioon ottamiseksi. Kosketusjännitykset ja lovipyörän iskumaiset rasitukset tarvitsevat oman tarkastelunsa.
- Tehdyissä mittauksissa saatiin tietoa kiskon kiinnityskomponentteihin kohdistuvien rasitusten suuruudesta hyväkuntoisella suoralla rataosuudella. Välilevyn ominaisuuksilla ja toiminnalla on merkittävä rooli samoin kuin kiskojen ja pyörien kuluneisuudella. Kaluston kulkuominaisuudet vaikuttavat dynaamisten pyöräkuormien suuruuteen. Kuormitusten suunnan ja suuruuden ollessa tunnettu voidaan kiinnityselinten rasituksia arvioida mallintamalla kisko joustavilla tuilla olevaksi palkiksi. Kuitenkin esimerkiksi itse välilevyn kestävyyttä on vaikea arvioida ilman laboratorioissa tehtäviä kuormituskokeita.
- Pölkylle voidaan luonnollisesti tarvittaessa kehittää FE-malli rasitusten arvioimiseksi. Tällöin voitaisiin mm. tarkastella tuennan vaikutusta pölkyn taivutusrasitukseen sekä verrata niitä radalla mitattuihin. Viimeksi mainittuja voitaisiin verrata myös pölkkyjen rasitukseen ohjeistetuissa laboratoriokokeissa. Esimerkiksi pölkyn keskiosalle tehty yksittäinen staattinen taivutuskoe dynaamisessa kokeessa vaaditulla kuormalla ja tuennalla antoi laboratorioissa venymäksi 200 - 300% radalla mitatusta maksimitasosta.
- Yhdestä akselista aiheutuvan kuorman jakautumista peräkkäisille ratapölkkyille on tarkasteltu kappaleessa 5.6. Saatujen mittaustulosten perusteella näyttäisi siltä, että instrumentointikohteen olosuhteissa kappaleessa 6.4 esitetyistä kuormituksen jakautumaotaksumista kuvan 6.4:3 mukainen jakautuma on lähempänä todellisuutta kuin kuvan 6.4:4 mukainen jakautuma. Jakautuman tarkempi analysointi edellyttäisi kuitenkin muun muassa instrumentointikohteen raiteessa käytettyjen välilevyjen joustokäyrän mittaamista.

9.3 Johtopäätökset ratapenkereen toiminnan mallintamisesta

Kaiken kaikkiaan instrumentointikohteesta tehtyjen mittausten tulosten ja niiden tähänastisten analysointien voidaan katsoa vahvistavat akselipainoprojektin yhteydessä aiemmin tehdyn tukikerrosta ja alusrakennetta käsitelleen kirjallisuusselvityksen (Kolisaja et al. 1999) yhteydessä tehtyjä johtopäätöksiä. Niinpä mittausten ja mittaustulosten alustavan mallinnuksen perusteella voidaan todeta, että:

- Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuva kvasistaattinen ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden mallinnus vastaa hyvin instrumentointikohteessa mitattua todellisen ratapenkereen käyttäytymistä. Rakennekerrosten materiaalien ja pohjamaan mekaaninen käyttäytyminen tulee tällöin kuvata jännitys- ja muodonmuutostason vaikutuksen huomioon ottavilla materiaalmalleilla, joiden parametrit on hyvään tarkkuuteen pyrittäessä kuitenkin määritettävä todellista kuormitus-tilannetta vastaavalla jännitys- ja muodonmuutostasolla tehtyjen laboratorio-määritysten perusteella.
- Laboratoriomäärittäisiin perustuvat, kerrosrakennemallinnuksen yhteydessä suuruusluokaltaan oikeiksi todetut pohjamaan kimmomoduuliarvot ovat jonkin verran korkeampia kuin mitä niiden instrumentointikohteen pohjamaan kaltaisissa olosuhteissa tavallisesti otaksutaan olevan esimerkiksi tierakenteiden kuormituskestävyyteen liittyvien mitoitustarkastelujen yhteydessä (Kolisaja et al. 1999). Syynä tähän on mitä ilmeisimmin se, että näissä tarkasteluissa pohjamaan moduuliarvot edustavat lähinnä roudan sulamisvaiheen aikaista pohjamaan kuormituskestävyyden kannalta epäedullisinta tilannetta. Koska ratarakenne suuremmasta routimattomien kerrosten paksuudesta johtuen yleensä tarjoaa pohjamaalle selvästi tierakenteita paremman routasuojauksen, ei ratarakenteen alla olevan pohjamaan ominaisuuksissa myöskään ole tarpeen ottaa huomioon samanlaista vuodenaikaisvaihtelua, vaan kimmomoduuliarvona voidaan käyttää todellista mittaustuloksiin perustuvaa arvoa vuodenaikasta riippumatta.
- Erisuuruisia akselipainoja vastaavan, pitkäaikaisessa toistokuormituksessa stabiliteetiltään riittävän pingerleveyden määrittäminen on vaikeusasteeltaan ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden mallintamista selvästi vaativampi tehtävä. Instrumentointikohteesta yksittäisten junaylitysten yhteydessä saatujen mittaustulosten ja tähän mennessä tehtyjen alustavien mallinnustarkastelujen perusteella ongelmaan ei olekaan esitettävissä suoraa vastausta sen paremmin 250 kN kuin tätä korkeampien akselipainojenkaan osalta. Instrumentointikohteesta saadut mittaustulokset antavat kuitenkin selvää viitettä siitä, että suurilla akselipainoilla tiettyihin osiin ratapengertä kehittyi vaakasuuntaisia syklisiä vetomuodonmuutoksia. Mitä suurempina nämä vetomuodonmuutokset toistuvat sitä suurempi osa niistä väistämättä myös jää palautumattomiksi, mikä koko ratapenkereen tasolla näkyy sen vähittäisenä latistumisena. Näin ollen pienimmillä pingerleveyksillä ratapenkereen stabiliteetti pitkäaikaisen toistokuormituksen alaisena voi muodostua akselipainojen korotusmahdollisuuksia rajoittavaksi tekijäksi.

9.4 Ehdotukset jatkotoimenpiteiksi

Tähän mennessä tehtyjen ratapenkereen mekaanista toimintaa kuvaavien alustavien mallinnustarkastelujen soveltamiskohteista ja näihin liittyvistä jatkotutkimustarpeista voidaan vastaavasti todeta seuraavaa:

- Täydennyksenä Korian instrumentointikohteessa kesällä 1999 tehtyihin mittauksiin kohteessa olisi mahdollista toteuttaa toinen mittausjakso talviolosuhteissa. Mittausajankohtana ratapenkereen tulisi olla pääosin jäässä, jolloin tulosten perusteella olisi mahdollista arvioida muun muassa radan rakennekerrosten jäätymisestä aiheutuvan jäykkyyden kasvun vaikutusta raiteen rakenneosiin kohdistuviin rasituksiin ja radan ympäristöön leviävän tärinän voimakkuuteen. Edelleen talvimittaukset antaisivat luotettavamman perustan erotella pohjamaassa tapahtuvien muodonmuutosten osuutta kesän 1999 mittauksissa havaituista ratapenkereen kokonaisuudonmuutoksista. Edellytyksinä uuden mittausjakson toteuttamiselle on luonnollisesti se, että ratapenger on kunnolla jäässä ja että penkereen sisään asennetut mittausinstrumentit ovat säilyneet toimintakuntoisina kaavaillun uuden mittausjakson toteutusajankohtaan asti. Raiteen osalta instrumentointi on mahdollista uutta mittausjaksoa varten rakennettava uudelleen, mutta jossain määrin instrumentointi voidaan tällöin kuitenkin toteuttaa kesän 1999 mittauksia yksinkertaisempana.
- Tähänastisten mallinnustarkastelujen perusteella näyttäisi siltä, että ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden kuvaamiseen olisi mahdollista rakentaa mallinnusympäristö, jonka avulla rakenteeltaan tunnettujen ratapenkereiden pystysuuntaista jäykkyyttä ja sen vaikutusta muun muassa raiteen rakenneosiin kohdistuviin rasituksiin on mahdollista laskennallisesti ennakoita. Likimääräisen tuloksen saamiseksi ratapenkereestä tulee tällöin tuntee vähintään rakennekerrosten paksuudet ja rakeisuusjakautumat sekä pohjamaan maalaji ja tiiviys. Tarvittaessa arviota voidaan tarkentaa rakennekerrosten materiaaleille ja pohjamaalle tehtävin laboratoriotestein. Mallinnusympäristön käytännön toteuttamisessa tulisi ensisijaisesti selvittää olemassa olevien ratarakenteen mallinnusohjelmistojen (esim. GEOTRACK) hyödyntämismahdollisuudet, jotta hankkeeseen liittyvät ohjelmistokehitystyöt eivät muodostuisi laajuudeltaan kohtuuttomiksi.
- Eräs mielenkiintoinen soveltamisalue edellä kuvatulle ratarakenteen pystysuuntaisen jäykkyyden mallinnusympäristölle voisi olla sen yhdistäminen nk. diagnostisella junalla saatavien mittaustulosten käsittelyyn. Mallinnusympäristö voisi tällöin periaatteessa toimia apuvälineenä sekä rataverkon laajamittaisempaan inventointiin liittyvien mittaustulosten tulkinnaissa että yksittäisten ongelmakohteiden toiminnan ja korjausvaihtoehtojen analysoinnissa.
- Eräs sovelluskohde nyt puheena olevan tutkimusosuuden yhteydessä tehdyn kerrosrakennemallinnuksen tuloksille on tukikerroksessa vaikuttavien keskimääräisten jännitysten arviointi. Raidesepelin kestävyyttä ja siinä erisuuruisten akselipainojen alaisena tapahtuvan hienonemisen nopeutta olisikin mahdollista arvioida esimerkiksi raemuodon ja kiviaineksen laadun suhteen toisistaan poikkeaville kiviaineksille tehtävällä syklisellä kuormituskoesarjalla, jonka

yhteydessä erilaisia akselipainoja vastaavien kuormitusten suuruudet arvioidaan ratarakenteen kerrosrakennemallinnukseen perustuvalla laskelmalla.

- Kerrosrakennemallinnuksen avulla saatavan ratapenkereen kuormitusjakautuman suoraviivainen vertaaminen esimerkiksi ratarakenteesta alla olevaan pohjamaahan välittyvien kuormitusten arviointiin monesti sovelletun niin kutsutun 2:1-jakautuman antamaan tulokseen ei penkereen rakennekerrosten osalta ole mielekästä. Syynä tähän on ennen muuta se, että likimääräisen 2:1-jakautuman mukainen tulos riippuu muun muassa hyvin voimakkaasti ratapölkyn alapinnan kuormitusjakautumaa koskevista otaksumista.
- Kuten edellä kappaleessa 9.3 jo todettiin, nyt puheena olevan tutkimusvaiheen yhteydessä tehtyjen erittäin alustavien pengerelevyden riittävyteen liittyvien mallinnustarkastelujen perusteella ei ole mahdollista ottaa kantaa siihen, mikä on pitkäaikaisen syklisen kuormituksen alaiseksi tulevan ratapenkereen riittävä pengerelevyys 250 kN tai 300 kN akselipainolla. Itse asiassa ratapenkereiden stabiilisuudesta nykyistenkään akselipainojen alaisena ei ole olemassa muuta kuin kokemusperäisiä havaintoja, jotka nekin on eräissä yhteyksissä jossain määrin kyseenalaistettu. Likimääräinen käsitys korotettujen akselipainojen vaatimasta penkereen vähimmäislevydestä voitaisiin kuitenkin muodostaa staattisen kuormitustilanteen vakavuuslaskelmilla, joilla pyrittäisiin määrittämään se pengerelevyys, jolla staattisen kuormituksen alaisena olevan ratapenkereen varmuus murtumista vastaan olisi vähintään yhtä suuri kuin nyt käytössä olevilla akselipainon, pengerelevyden ja junan sallitun nopeuden yhdistelmillä.
- Luotettavampaan ja tarkempaan tulokseen pääsemiseksi pengerelevyden vaikutukseen liittyviä tarkasteluja ehdotetaan myöhemmässä vaiheessa jatkettavaksi kehittyneempiin mallinnustyökaluihin – lähinnä kolmiulotteisten elementtimallien käytön mahdollistaviin elementtilaskentaohjelmiin – perustuvalla teoreettisella mallinnuksella. Tämän avulla pyritään muodostamaan selkeä käsitys toistokuormitetun ratapenkereen fysikaalisesta toimintatavasta ja ratapenkereen stabiiliteetin kannalta kriittisten kohtien sijainnista. Mallin avulla olisi mahdollista tarkastella paitsi pengerelevyden myös esimerkiksi penkereen luiskakaltevuuden vaikutusta edellä mainittuihin seikkoihin.
- Edellisessä kohdassa mainitun ratapenkereen teoreettisen mallinnuksen tulokset olisivat erittäin tarpeellisia myös nimenomaan mahdollisen pengerelevyden vaikutuksen tutkimiseen tähtäävän erillisen instrumentointikohteen suunnittelussa. Eräs mahdollinen toteutustapa tällaiselle instrumentointikohteelle olisi, että kohde sijaitisi yksiraiteisen radan kaarteessa, jossa radan pengerelevyttä sekä mahdollisesti myös penkereen luiskakaltevuutta varioitaisiin systemaattisesti mittausten aikana. Aikataulullisesti tällaisen kohteen toteutus voisi kuitenkin käytännössä sijoittua aikaisintaan vuoden 2001 kesälle.

Instrumentointikohteeseen liittyneiden mallinnustarkastelujen yhteydessä on noussut esille myös joukko lähinnä ratarakenteiden kuormitusotaksumiin liittyviä kysymyksiä, jotka eivät sinällään olleet tutkimuskohteina nyt puheena olevan tutkimusvaiheen yhteydessä, mutta joihin vastaamiseen instrumentointikohteen mallinnustarkasteluihin liittyneet pohdinnat ainakin jossain määrin antavat tukea. Näiden osalta voidaan todeta seuraavaa:

- Instrumentointikohteesta tehtyjen mittausten perusteella ei voida suoranaisesti tehdä johtopäätöksiä Ratateknisten määräysten ja ohjeiden (RAMO) osassa 3 'Radan rakenne' radan alla olevan pohjamaan stabiliteettitarkasteluissa sovellettavaksi määrätyn kuormitusotaksuman 120 kN/raidemetri riittävydestä korotettuja akselipainoja silmällä pitäen. Syynä tähän on lähinnä se, että viime kädessä mainitun kuormitusotaksuman riittävyys tai oikeellisuus riippuu korotettujen akselipainojen yhteydessä käyttöön tulevasta vaunukalustosta. Koska instrumentointikohteen koejunassa toisaalta oli vain neljä kahteen toisistaan suhteellisen etäällä sijaitsevaan teliin kiinnitettyä 250 kN suuruisella kuormalla varustettua akselia, ei koejuna myöskään mitä ilmeisimmin edustanut korotettujen akselipainojen käytön yhteydessä kriittisimmäksi muodostuvaa kuormitusyhdistelmää, jossa korotetun akselinpainon kuormittamia teliakseleita on useampia ja ne sijaitsevat tiheämmin peräkkäin. Jos kuitenkin otaksutaan, että pohjamaan kannalta kuormitusten jakautumiseen voidaan kahden peräkkäisen telin osalta soveltaa edellä mainittua 2:1-jakautumaa myös radan pituussuunnassa, voidaan kuormitusotaksumaa 120 kN/raidemetri pitää 250 kN akselipainolle soveltuvana silloinkin, kun tällä tavoin kuormitettuja yksittäisiä telejä on myös peräkkäisissä vaunuissa. Samaa johtopäätöstä ilman kuormitusjakautuman tarkempaa analysointia ei kuitenkaan voi suoralta kädeltä tehdä kuvan 4.5:9 mukaisia mittaustuloksia vastaavan kahdeksan-akselisen vaunutyyppin osalta eikä varsinkaan 300 kN akselipainon osalta.
- Suuntaa-antava otos dynaamisen kuorman osuudesta mitatuissa pyörävoiman arvoissa on nähtävissä kuvassa 5.1:3, jossa on esitetty instrumentointikohteen yli kulkeneen koejunan vaunun mitattujen pyörävoiman pystykomponenttien jakautuma. Kuvan 5.1:3 jakautumassa suurin osa hajonnasta aiheutuu ylityksistä, joissa koejuna on kulkenut Korian suunnasta Kouvolan suuntaan eli lähestynyt instrumentointikohdetta radassa olevan kaarteiden suunnasta. Kouvolan suuntaan jatkuvalta suoralta radalta instrumentointikohdetta lähestyessään junan pyörävoiman pystykomponentin hajonta on sitä vastoin ollut huomattavasti pienempi (Taulukko 4.4:1). Yleispäteviä johtopäätöksiä dynaamisen pyöräkuorman osuudesta edellä mainittujen mittaustulosten perusteella ei kuitenkaan ole mahdollista tehdä, koska instrumentointikohteen mittaustulokset edustavat vain tässä nimenomaisessa kohteessa vallinneita olosuhteita. Koska rata instrumentointikohteen kohdalla oli juuri perusparannettu ja koejunan tapauksessa myös vaunujen pyörät ainakin silmämääräisen arvion perusteella erittäin hyväkuntoiset, on ilmeistä, että huonokuntoisemmalla radalla dynaamisen kuorman osuus eli staattista akselipainoa ympäröivän akselipainon vaihtelualueen laajuus on todennäköisesti kuvassa 5.1:3 esitettyä tulosta suurempi.

- Raiteen ominaisuuksien lisäksi myös kalustotyypillä otaksutaan yleensä olevan vaikutusta dynaamisen kuorman osuuteen raiteeseen kohdistuvia pyöراويimia arvioitaessa. Instrumentointikohteen tapauksessa tätä olisi periaatteessa mahdollista analysoida kohteen kautta kulkeneen muun liikenteen osalta, jos junien akselikohtaiset staattiset akselipainot tunnettaisiin. Likimääräiseen tulokseen olisi kuitenkin ilmeisesti mahdollista päästä vaunukohtaisten punnitustietojenkin perusteella. Kaksi esimerkkiä instrumentointikohteen kautta kulkeneiden säiliöjunien mitattujen pyöراويimien jakautumista on esitetty kuvissa 5.1:4 ja 5.1:5.
- Liikkuvan kaluston teknisten määräysten ja ohjeiden (LIMO) osan 1 'Liikkuvan kaluston yleiset määräykset' mukaiset pyöراويiman pysty- ja vaakakomponentteja koskevat otaksumat 170 kN ja 70 kN voidaan instrumentointikohteen olosuhteissa todeta riittäviksi sekä koejunan 250 kN akselipainojen että muutamien muiden yksityiskohtaisempaan tarkasteluun otettujen instrumentointikohteen kautta kulkeneiden junien osalta. Johtopäätöksen ekstrapolointia 300 kN akselipainoon tai kunnoltaan tai geometrialtaan toisenlaiselle radalle instrumentointikohteen tulosten perusteella ei kuitenkaan ole mahdollista tehdä.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- AASHTO T 294-92 I (1992). Interim method of test for resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils - SHRP protocol P46. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Gåsemyr, H. 1996. Overbyggnings komponenter: Sviller. Nordisk baneteknisk ingenjörutdannelse. Ellivuori. 19.11.1996. 45 s.
- Järvenpää, I., Kolisoja, P. & Levomäki, M. (1999). Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/1999. Ratahallintokeskus, Helsinki. 30 s.
- Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisu nro 223. 214 s.
- Kolisoja, P., Niskanen, P., Mäkelä, E. & Levomäki, M. (1999). Tukikerros ja alusrakenne - kirjallisuusselvitys, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 6/1999. Ratahallintokeskus, Helsinki. 135 s.
- Kouhia, R. ja Tuomala, M. 1997. Rakenteiden mekaniikan numeeriset menetelmät, luentomoniste, Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- NYNAS (1995). NOAH computer software for pavement design calculations. Part: documentation. Version 1995.
- PLAXIS (1998). Finite element code for soil and rock analyses. Version 7.0 A.A. Balkema. Rotterdam. 1998.ss. 1-1 – 8-8.
- Puikkonen, E. 1989. Ratatekniikka 1989. Suomen maarakentajien keskusliitto ry. 74 s.
- Raymond, G. P. (1985). Track part of the system 'railway'. Nordic railway seminar 1998. Lecture notes. 46 s.
- Riessberger, K. 1998. Track part of the system 'railway'. Nordic railway seminar 1998. Lecture notes. 46 s.
- Selig, E.T. & Waters, J.M. (1994). Track geotechnology and substructure management. London. Thomas Telford. ss. 1.1-16.11.
- Shell (1995). BISAR-PC user manual. Version 1995, Release 2.0.
- Souto, A., Hartikainen, J. & Özüdogru, K. (1994). Measurement of dynamic parameters of road pavement materials by the bender element and resonant column methods. Géotechnique, Vol. 44, No. 3, pp. 519-526.

Taulukko L1:1 Erittely mittauskohteen kautta kulkeneista junista ja niiden nopeuksista.

Mitt. Nro	Pvm	Klo	Junan nro	Junan tyyppi	V1 (km/h)	V2 (km/h)	Vka (km/h)	HUOM!
1	6.7.	14:37	P8	P	115	119	117	
2	6.7.	14:56	T6010	S	61	65	63	Ei videota
3	6.7.	16:00	P24	P	118	118	118	Ei videota
4	6.7.	17:04	IC10	P	129	115	122	
5	6.7.	17:12	T2092	S	53	52	52,5	Lovipyöriä
6	6.7.	18:06	P76	P	131	128	129,5	
7	6.7.	18:13	T2086	S	58	53	55,5	Lovipyöriä
8	6.7.	18:27	T2838	T	73	76	74,5	Lovipyöriä
9	6.7.	20:07	P36	P	119	124	121,5	
10	6.7.	20:13	P14	P			113	Tutka epäk.
11	6.7.	20:21	T2030	S	68	68	68	Lovipyöriä
12	6.7.	21:18	T2038	T	77	77	77	
13	6.7.	22:22	P80	P	133	132	132,5	
14	6.7.	23:24	T2017	S	69	66	67,5	Lovipyöriä
15	7.7.	01:43	T2850	T	74	74	74	
16	7.7.	01:48	T2806	T	43	44	43,5	Lovipyöriä
17	7.7.	03:57	T2852	T	70	71	70,5	
18	7.7.	04:05	T2012	T	75	75	75	Lovipyöriä
19	7.7.	04:32	H9730	P	108	108	108	
20	7.7.	04:36	T2854	T	78	78	78	
21	7.7.	04:48	T2810	T	75	75	75	Lovipyöriä
22	7.7.	05:36	H9744	P	111	115	113	
23	7.7.	05:43	T2011	T	80	75	77,5	
24	7.7.	06:27	P222	P	126	127	126,5	
25	7.7.	06:34	T2028A	S	60	54	57	Lovipyöriä
26	7.7.	07:37	IC2	P	117	120	118,5	
27	7.7.	08:31	IC72	P	135	133	134	
28	7.7.	08:35	H9762	P	120	119	119,5	
29	7.7.	09:05	IC4	P	109	113	111	
30	7.7.	09:34	P32	P	113	109	111	

P = henkilöjuna, T = tavarajuna, S = säiliöjuna, K = koejuna

Taulukko L1:1 Erittely mittauskohteen kautta kulkeneista junista ja niiden nopeuksista (jatkoa).

Mitt. Nro	Pvm	Klo	Junan nro	Junan tyyppi	V1 (km/h)	V2 (km/h)	Vka (km/h)	HUOM !
31	7.7.	10:18	P34	P	99	99	99	
32	7.7.	10:36	P6	P	105	109	107	
33	7.7.	11:52	P74	P	127	126	126,5	
34	7.7.	12:03	T2084	S	59	50	54,5	Lovipyöriä
35	7.7.	13:28	H9792	P	80	80	80	
36	7.7.	14:37	P8	P	124	125	124,5	
37	7.7.	16:01	P24	P	113	113	113	
38	7.7.	16:06	T6010	S	76	75	75,5	2 junaa yhtä aik.
X	7.7.	17:08	IC10	P	136	141	138,5	Penkereen kav.
X	7.7.	17:13	T2092	S	60	56	58	Penkereen kav.
39	7.7.	17:55	P76	P	131	130	130,5	
40	7.7.	18:03	T2086	S	62	57	59,5	Lovipyöriä
41	7.7.	18:19	T2034	T	75	73	74	Lovipyöriä
42	7.7.	20:01	P36	P	88	92	90	
43	7.7.	20:09	P14	P	112	112	112	
44	7.7.	20:18	T2030	T	76	75	75,5	Lovipyöriä
45	7.7.	21:03	P80	P	137	137	137	
46	7.7.	21:16	T2038	T	77	74	75,5	Lovipyöriä
47	7.7.	23:44	T2017	T	64	62	63	Lovipyöriä
48	8.7.	01:36	T2032	T	57	54	55,5	Lovipyöriä
49	8.7.	01:54	T2850	T	68	66	67	Lovipyöriä
50	8.7.	03:36	T2012	T	77	79	78	Lovipyöriä
51	8.7.	03:59	T2852	T	71	67	69	
52	8.7.	04:32	H9730	P	116	115	115,5	
53	8.7.	04:38	T2810	T	80	80	80	
54	8.7.	05:36	H9744	P	112	112	112	
55	8.7.	05:43	T2011	T	60	60	60	
56	8.7.	06:29	P222	P	123	125	124	
57	8.7.	06:36	T2082A	S	58	54	56	Lovipyöriä
58	8.7.	07:37	IC2	P	124	128	126	

P = henkilöjuna, T = tavarajuna, S = säiliöjuna, K = koejuna

Taulukko LI:1 Erittely mittauskohteen kautta kulkeneista junista ja niiden nopeuksista (jatkoa).

Mitt. Nro	Pvm	Klo	Junan nro	Junan tyyppi	V1 (km/h)	V2 (km/h)	Vka (km/h)	HUOM!
59	8.7.	noin 8	--	K	0	0	0	Koej. Punnitus
60	8.7.	08:24	IC72	P	120	119	119,5	
61	8.7.	08:28	H9762	P	101	100	100,5	
62	8.7.	08:35	--	K	41	41	41	
63	8.7.	09:04	IC4	P	121	123	122	
64	8.7.	09:09	--	K	50	45	47,5	
65	8.7.	09:18	--		84	84	84	Työk. TTV 16
66	8.7.	09:29	P32	P	110	113	111,5	
67	8.7.	09:34	--	K	61	61	61	
68	8.7.	10:08	--	K	68	68	68	
69	8.7.	10:18	P34	P	110	110	110	
70	8.7.	10:25	--	K	80	81	80,5	
71	8.7.	10:36	P6	P	131	130	130,5	
72	8.7.	10:43	Kv Pv 2	T	35	33	34	Lovipyöriä
73	8.7.	10:49	--	K	89	89	89	
74	8.7.	11:04	--	K	97	99	98	
75	8.7.	11:29	--	K	100	100	100	
76	8.7.	11:43	P74	P	126	125	125,5	
77	8.7.	11:52	T2084	S	54	53	53,5	Lovipyöriä
78	8.7.	11:58	--	K	95	85	90	Koej. Jarrutus

P = henkilöjuna, T = tavarajuna, S = säiliöjuna, K = koejuna

Taulukko L1:2 Koejunan punnituspöytäkirja.

VR Cargo

Lappeenranta jat.

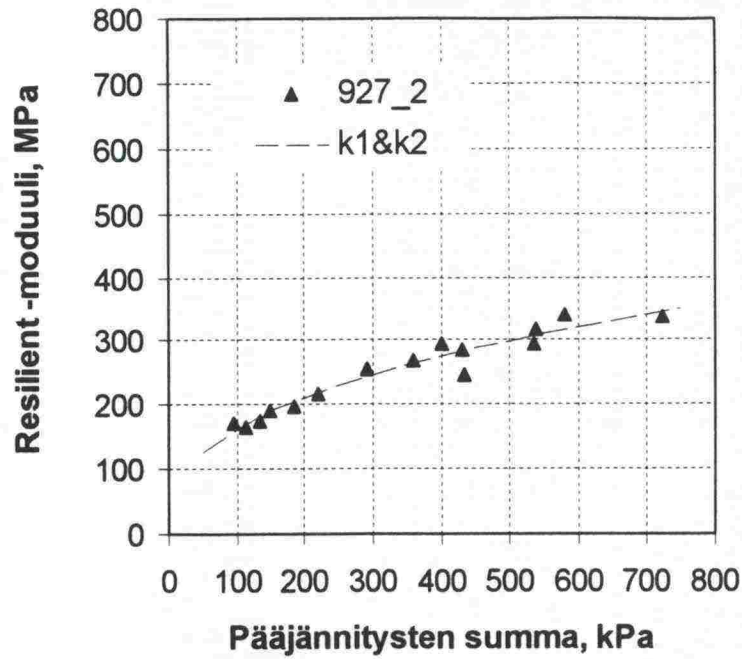
 Juna nro: 2335 Aks.-edellä: 4 Vaunut: 1 Punnitus nro: 100033

Liikkeessä-punnitus aloitus: 07.07.99 17:05 BRUTTO Punnitus

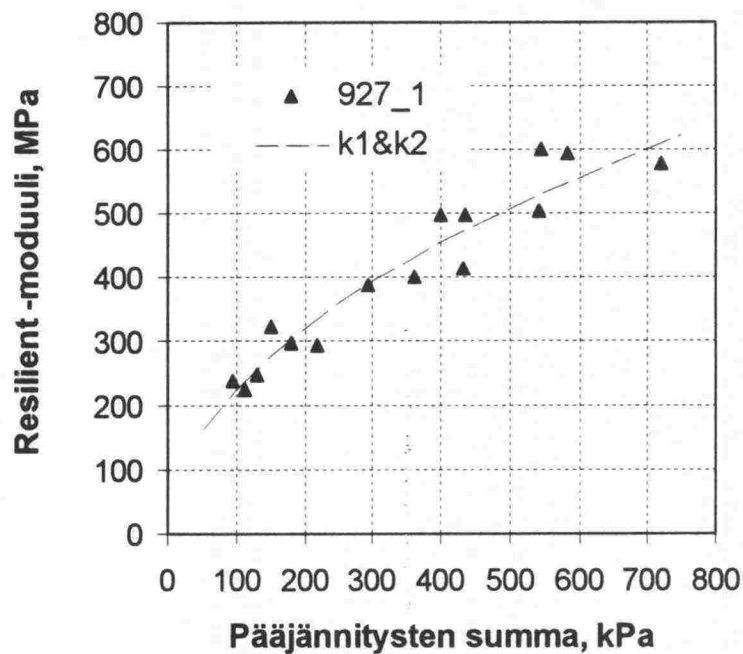
Vaunu nro	PAINO kg	Nopeus km/h	Akse	Silt	T	Lastaus	A-T-K	Virhe	Punnitus nro
1 75140-4	98000	10.4	4		*	502/498 A			100067

Liikkeessä-punnitus lopetus: 07.07.99 17:11 Suunta: <-

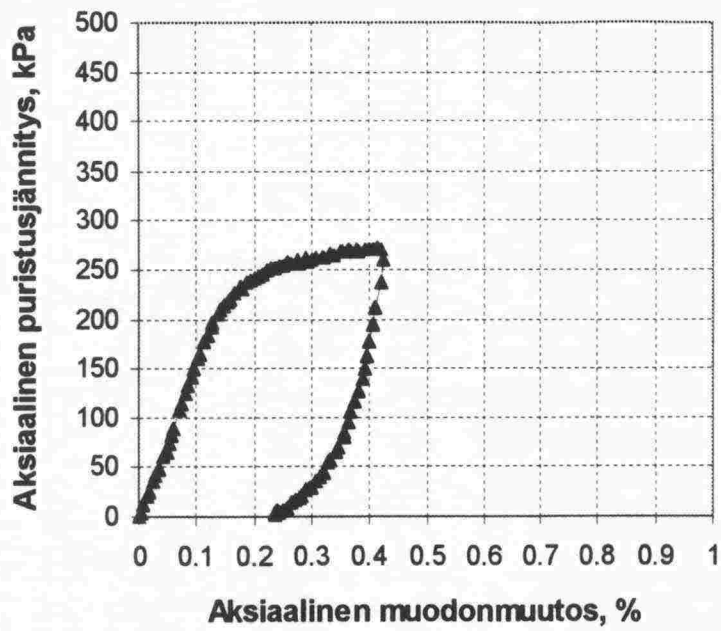
HUOM:



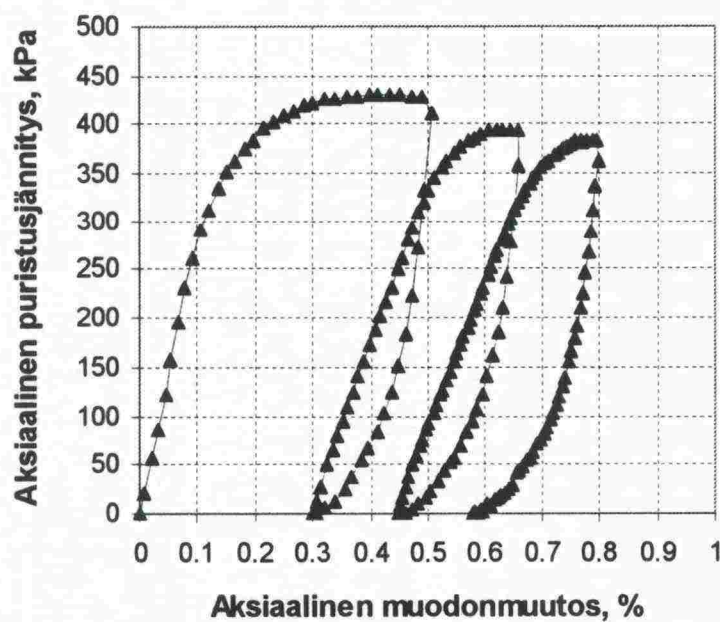
Kuva L2:1 Syklisen kolmiaksaalikokeen tulos syvyystasolla $K_v - 1,2\text{ m} \dots K_v - 2,0\text{ m}$ esiintyneelle hiekalle.



Kuva L2:2 Syklisen kolmiaksaalikokeen tulos syvyystason $K_v - 2,0\text{ m}$ alapuolella esiintyneelle soraiselle hiekalle.

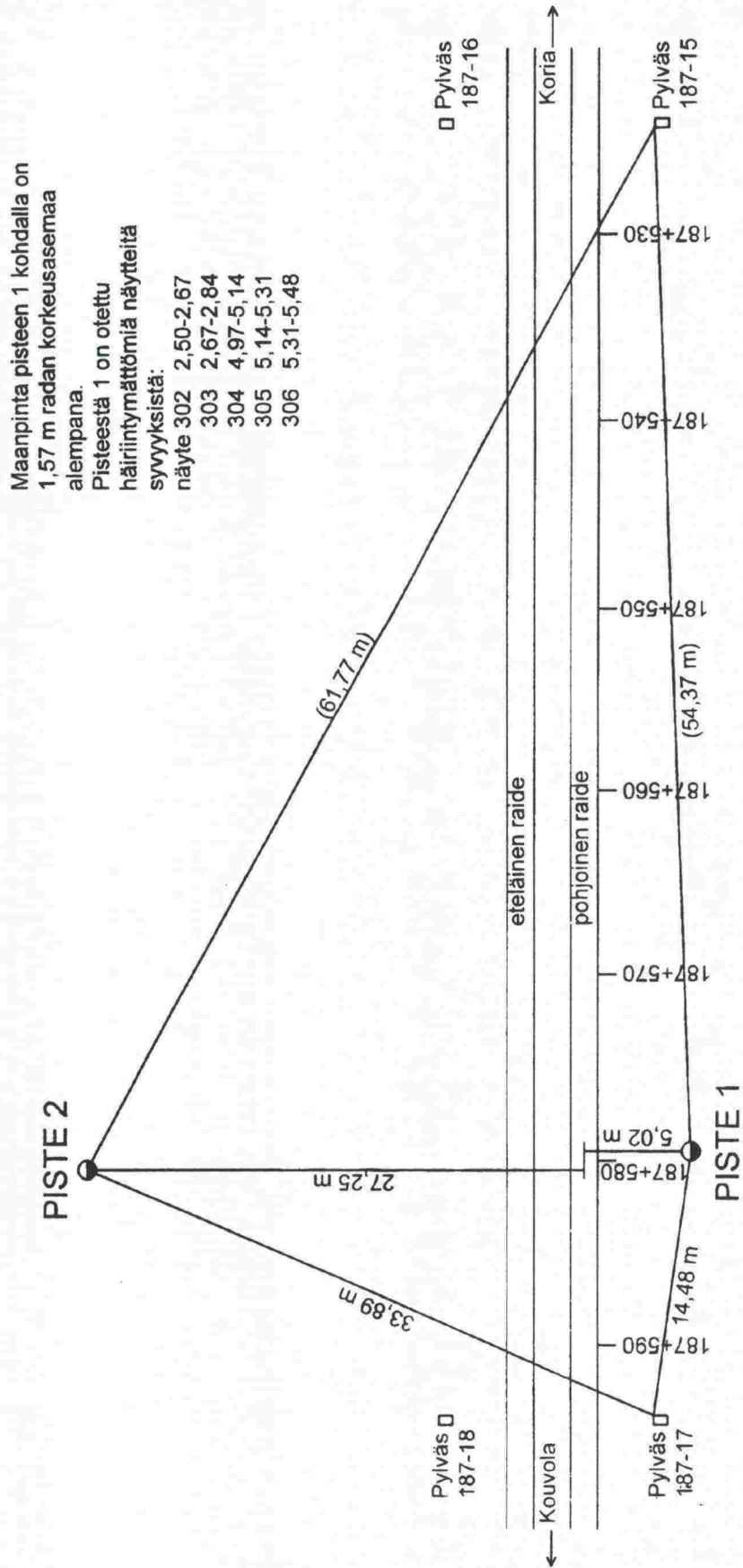


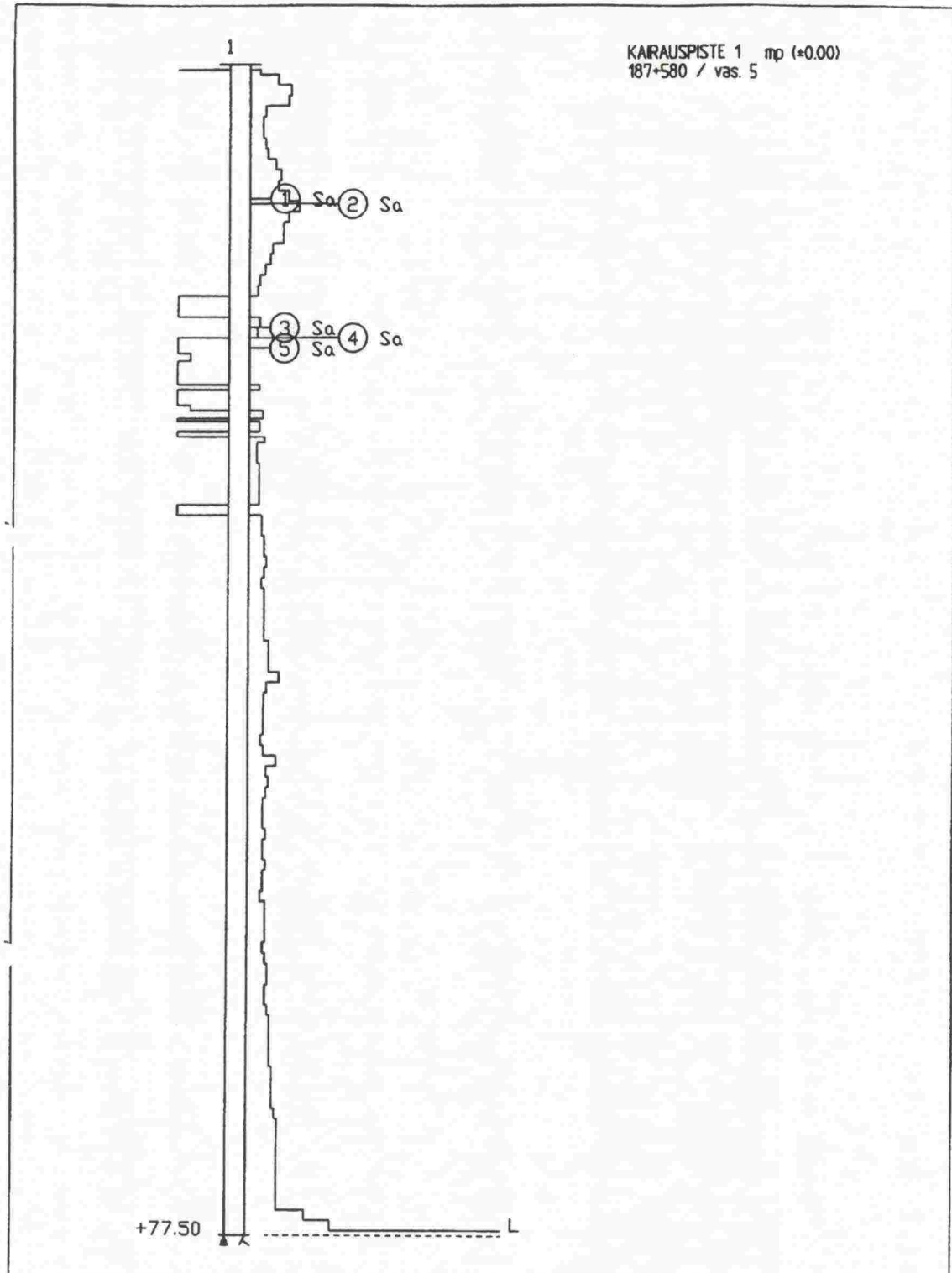
Kuva L2:3 Staattisen kolmiakiaalikokeen tulos syvyystasolla $K_v - 1,2 \text{ m} \dots K_v - 2,0 \text{ m}$ esiintyneelle hiekalle.



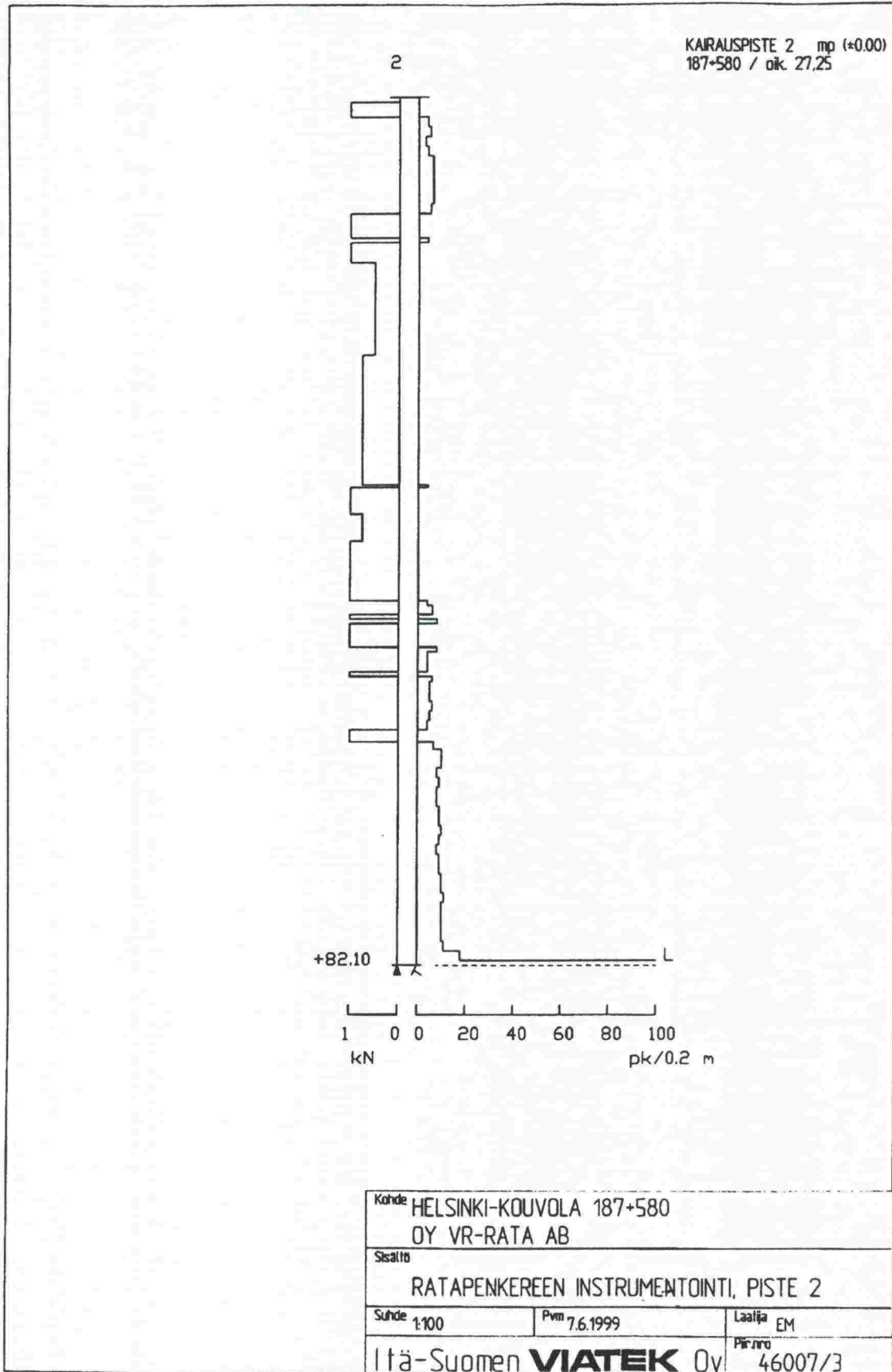
Kuva L2:4 Staattisen kolmiakiaalikokeen tulos syvyystason $K_v - 2,0 \text{ m}$ alapuolella esiintyneelle soraiselle hiekalle.

Painokairauspisteiden sijainti

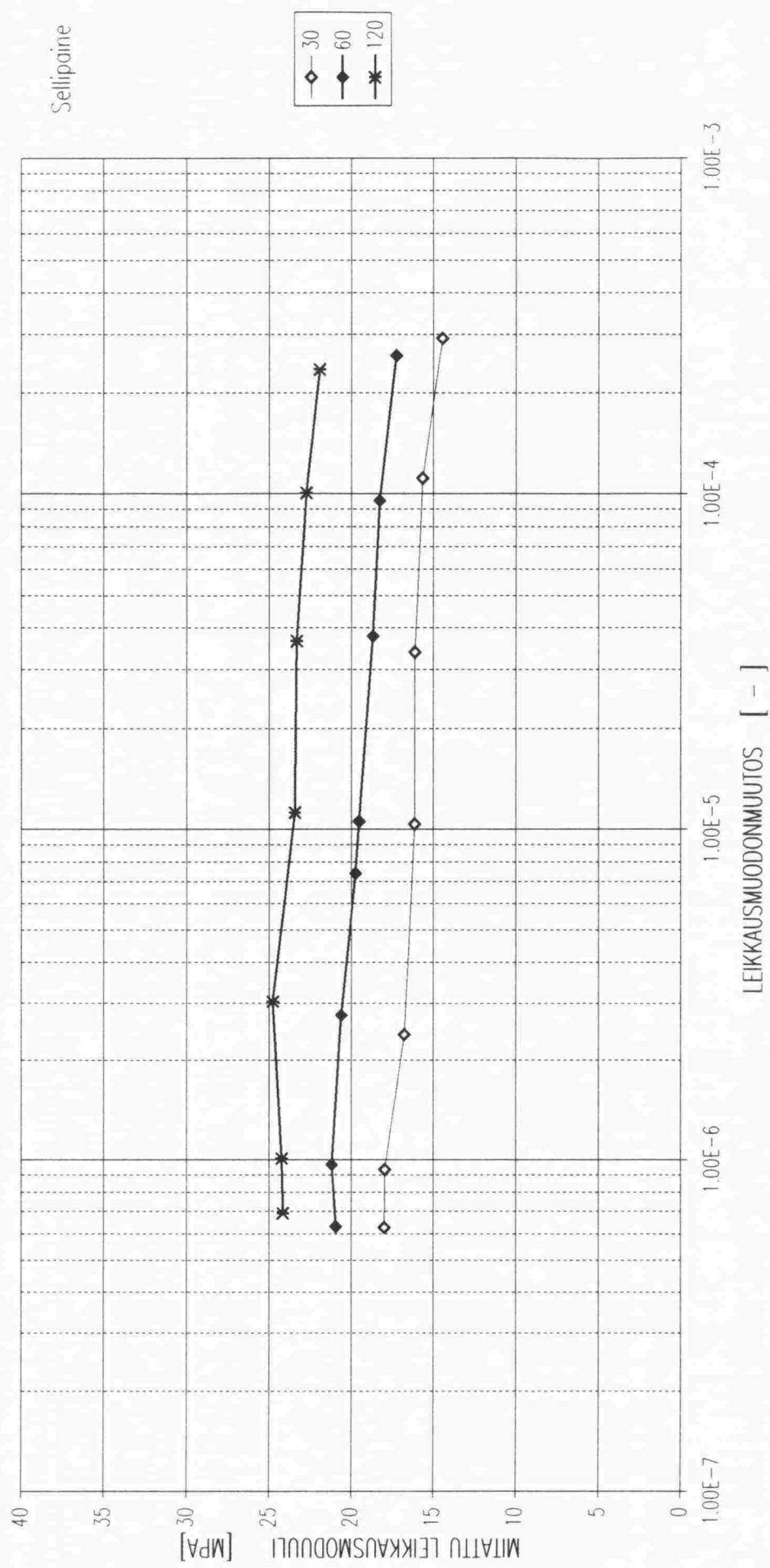




Kohde HELSINKI-KOUVOLA 187+580 OY VR-RATA AB		
Sisältö RATAPENKEREEN INSTRUMENTOINTI, PISTE 1		
Suhte 1:100	Pvm 7.6.1999	Laailija EM
Itä-Suomen VIATEK Oy		Proj.nro 46007/2

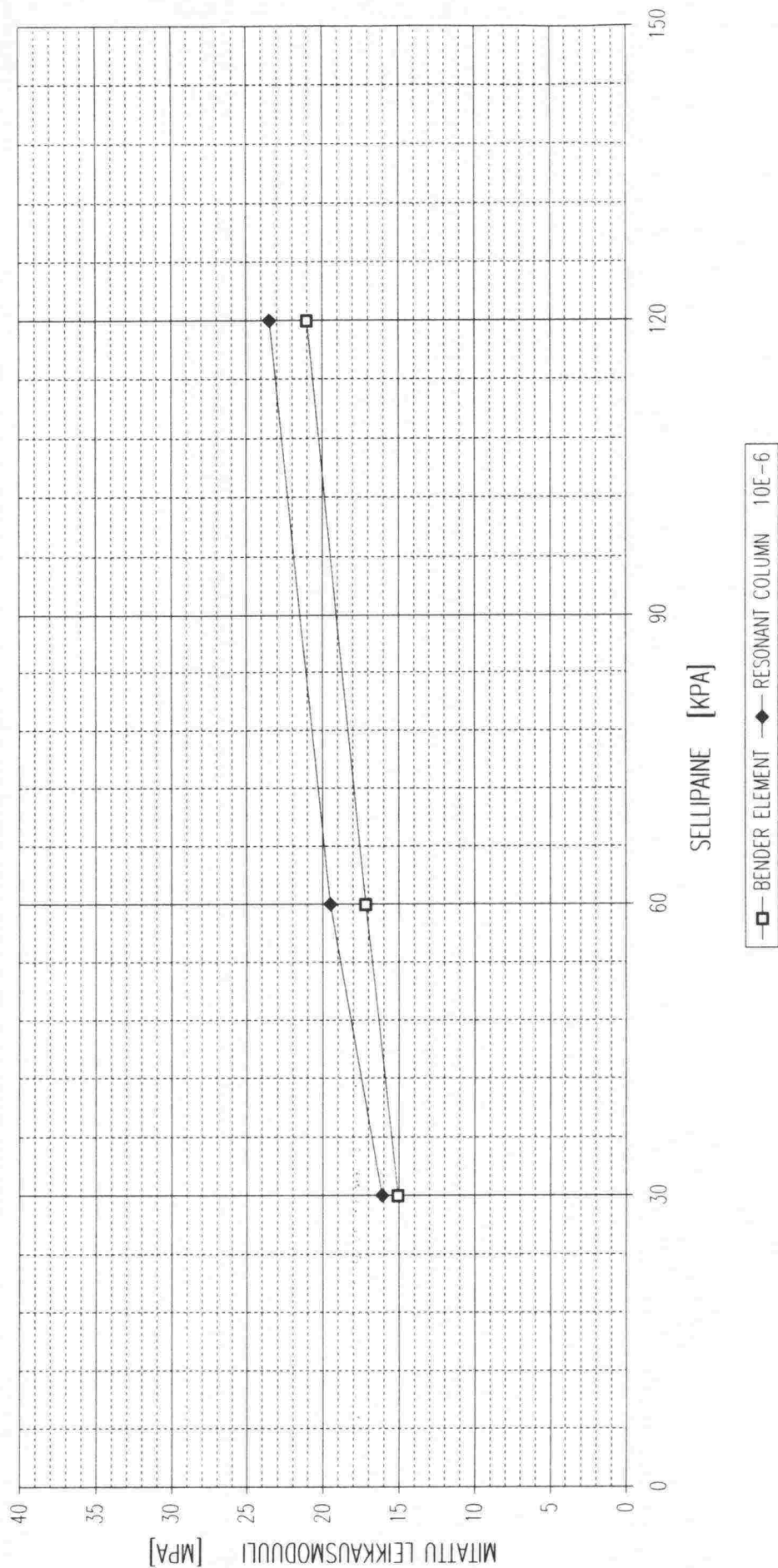


927_rc1/(pt1, 2.50-2.67 m)



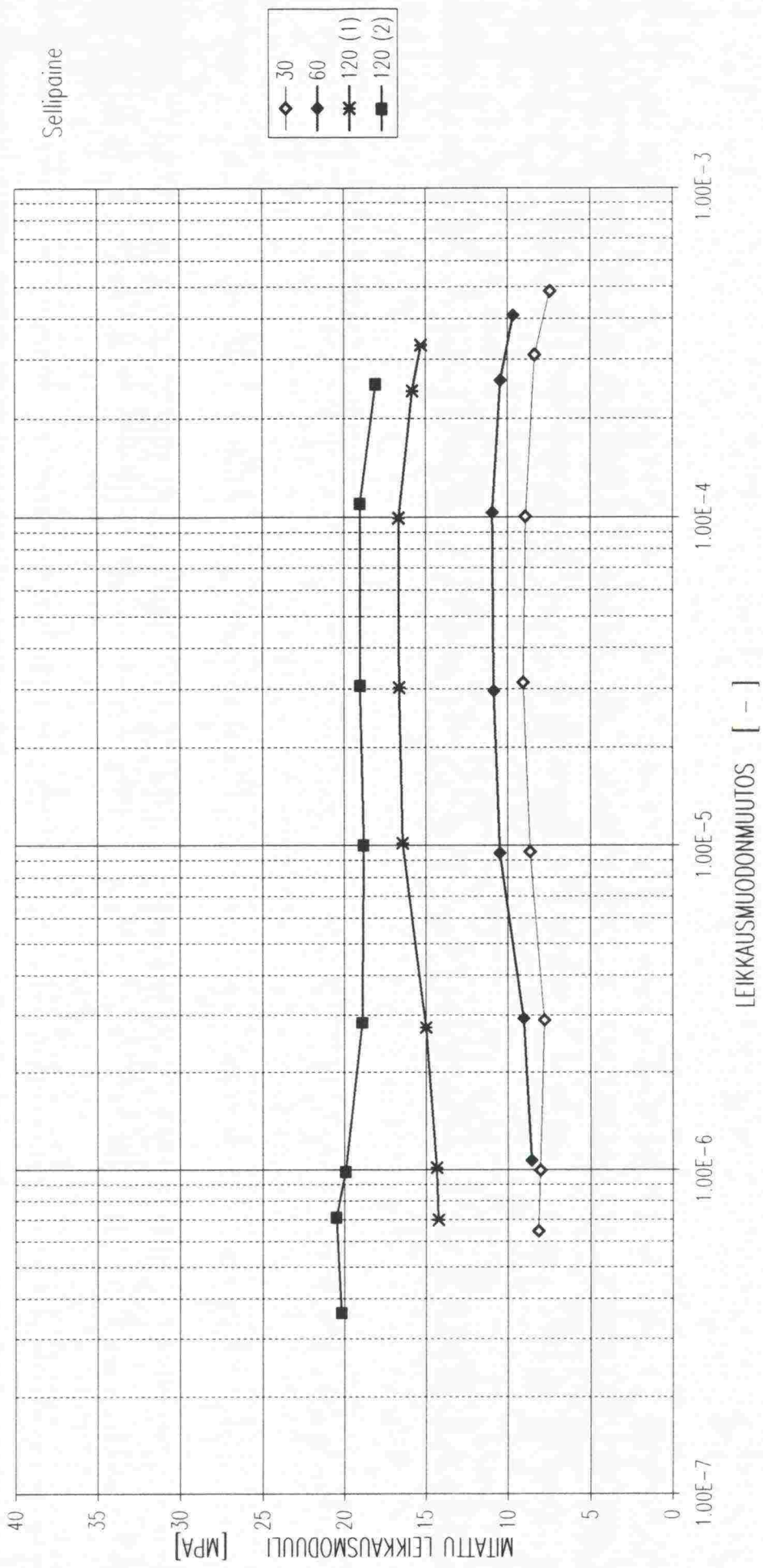
Kuva L4:1 Leikkausmoduulin vaihtelu 2,50 – 2,67 m syvyydeltä pohjamaasta otetulla näytteellä.

927_rc1/ (pt1, 2.50-2.67 m)



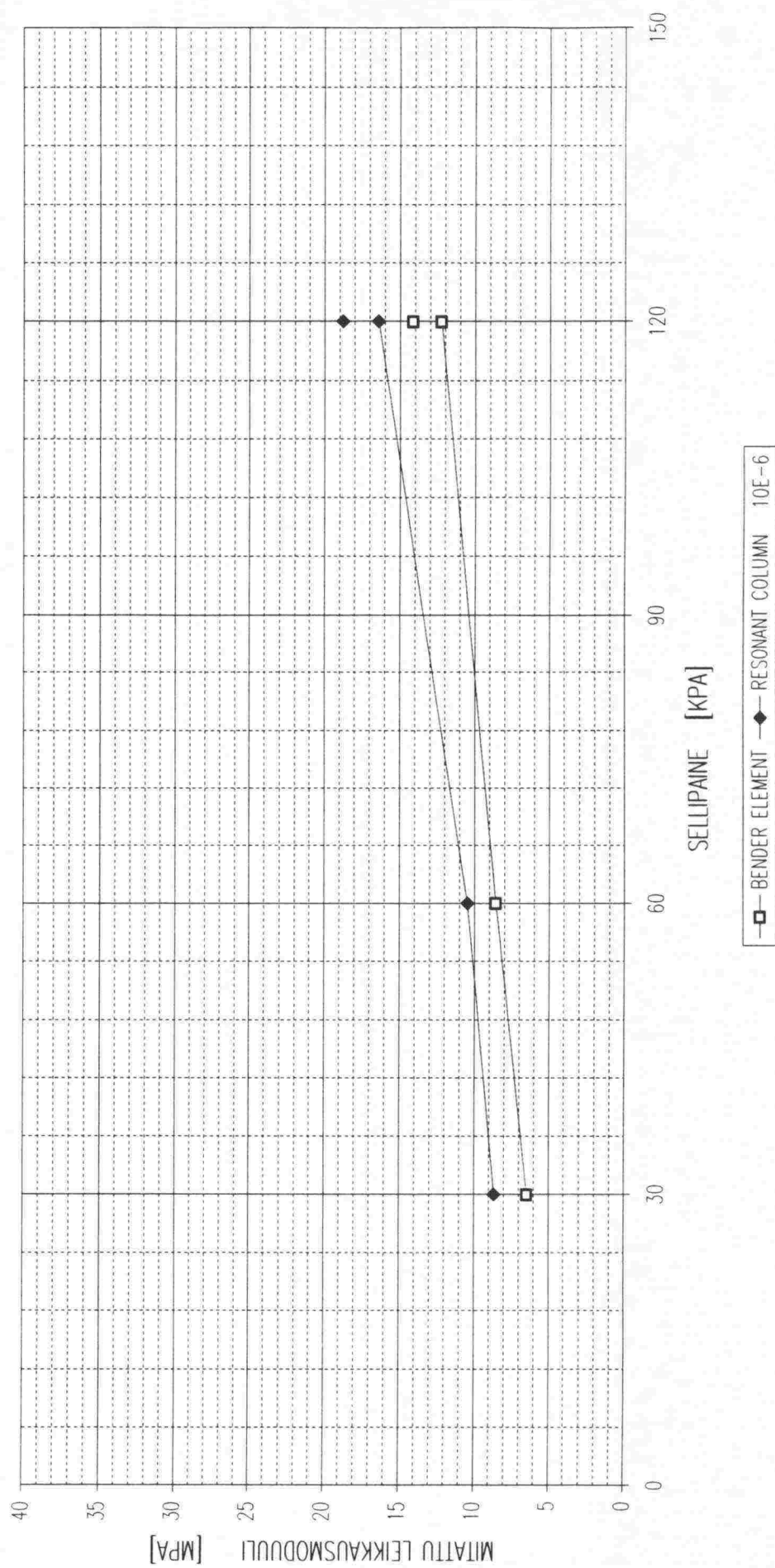
Kuva L4.2 Leikkausmoduulin maksimiarvot 2,50 – 2,67 m syvyydeltä pohjamaasta otetulla näytteellä.

927_rc2/(pt1, 5.14-5.31 m)



Kuva L4.3 Leikkausmoduulin vaihtelu 5,14 – 5,31 m syvyydeltä pohjamaasta otetulla näytteellä.

927_rc2/ (pt1, 5.14-5.31 m)



Kuva L4:4 Leikkausmoduulin maksimiarvot 5,14 – 5,31 m syvyydeltä pohjamaasta otetulla näytteellä.

TÄRINÄMITTAUS 07.07.-08.07.1999, KORJA

		anturi 1		anturi 2		anturi 3												
anturin sijainti		radan penkka		tien penkka		metssä												
etäisyys radasta		3 m		15,5 m		35,5 m												
								Tulokset										
pvm	aika	anturi 1 mm/s	taajuus Hz	anturi 2 mm/s	taajuus Hz	anturi 3 mm/s	taajuus Hz	tyyppi P/T/S	akselit kpl	massa tn	metripaino t/m	pituus m	nopeus km/h	vaunuja kpl	junan numero	veturi	mittaus- numero	muuta (lovia)
07.07.	15:59	5,72	43	0,7	4	0,44	5	p	12	129	1,30303	99	130,5	3	P24	SR1	37	
08.07.	7:38	6,6	32	1,08	5	0,51	5	p	16	194	1,552	125	126	4	IC2	SR1	58	
07.07.	21:04	6,03	37	0,57	10	0,38	9	p	24	267	1,5	178	137	6	P80	SR1	45	
08.07.	10:18	6,6	47	0,64	5	0,38	5	p	24	304	1,820359	167	110	6	P34	SR1	69	
08.07.	8:25	6,67	51	0,51	6	0,44	4	p	24	305	1,713483	178	119,5	6	IC72	SR1	60	penkereen kavennus
07.07.	17:08	6,86	34	0,51	6	0,57	9	p	24	307	1,724719	178	138,5	6	IC10	SR1	x1	
08.07.	6:28	7,11	43	0,38	8	0,32	11	p	28	315	1,544118	204	124	7	P222	SR1	56	
08.07.	10:35	6,86	32	0,95	6	0,38	5	p	28	315	1,544118	204	130,5	7	P6	SR1	71	
08.07.	9:04	8,64	39	0,64	5	0,38	4	p	28	361	1,769608	204	122	7	IC4	SR1	63	
08.07.	11:42	6,35	7	1,14	6	0,57	5	p	32	361	1,562771	231	125,5	8	P74	SR1	76	
07.07.	20:01	5,84	47	0,32	7	0,32	10	p	32	448	1,939394	231	112	8	P14	SR1	43	
08.07.	5:35	5,84	47	0,95	4	0,57	4	p	44	462	1,490323	310	112	11	H9744	SR1	54	
07.07.	14:37	6,86	7	0,89	8	0,51	5	p	44	512	1,651613	310	124,5	11	P8	SR1	36	
07.07.	17:55	7,11	7	1,02	6	0,51	5	p	44	517	1,667742	310	130,5	11	P76	SR1	39	
08.07.	9:29	6,16	43	0,83	4	0,57	12	p	52	710	2,100592	338	111,5	13	P32	SR1	66	
07.07.	20:09	6,41	47	0,7	5	0,44	8	p	76	1130	2,703349	418	75,5	28	T2030	SR1	44	
07.07.	18:03	10,92	73	3,18	6	2,29	6	s	150	1156	2,013937	574	74	38	T2034	SR1	41	loviyöriä
07.07.	17:13	8,38	57	2,54	6	2,29	6	s	152	2254	4,49004	502	58	38	T2092	2SR1	x2	loviyöriä
07.07.	16:06	9,91	51	1,27	8	1,4	9	s	204	4003	6,274295	638	75,5	46	T6010	2SR1	38	2 junaa yhtiä alkaa
08.07.	6:35	21,34	73	5,08	6	4,45	6	s	212	4061	6,375196	637	56	39	T2082A	2SR1	57a	loviyöriä
08.07.	6:36	12,45	73	1,91	5	0,89	6	s	212	4061	6,375196	637	56	39	T2082A	2SR1	67b	loviyöriä
07.07.	18:03	10,41	64	4,57	6	3,81	6	s	232	4403	6,317073	697	59,5	44	T2086	2SR1	40	loviyöriä
07.07.	12:03	20,07	57	6,1	6	5,33	6	s	216	4445	6,664168	667	54,5	50	T2084	2SR1	34a	loviyöriä
07.07.	12:03	21,08	57	4,19	5	2,92	5	s	216	4445	6,664168	667	54,5	50	T2084	2SR1	34b	loviyöriä
08.07.	11:52	19,81	57	4,83	5	3,56	6	s	216	4497	6,691964	672	53,5	48	T2084	2SR1	77a	loviyöriä
08.07.	11:53	11,18	51	4,19	6	3,43	6	s	216	4497	6,691964	672	53,5	48	T2084	2SR1	77b	loviyöriä
07.07.	18:19	24,13	51	1,52	8	1,14	7	t	36	410	1,595331	257	90	9	P36	SR1	42	
08.07.	1:53	9,4	47	3,05	7	1,4	8	t	40	413	1,912037	216	67	11	T2850	2DV12	49	loviyöriä
08.07.	10:43	6,16	73	0,25	18	0,25	30	t	64	432	1,454545	297	34	16	PV KV02	Dr14	72	loviyöriä
08.07.	4:38	10,41	57	1,65	7	1,4	7	t	86	635	1,560197	407	80	26	T2810	SR1	53	
07.07.	23:44	5,33	14	2,41	6	1,59	6	t	82	976	2,374696	411	63	22	T2017	2DV12	47	loviyöriä
08.07.	5:42	7,11	85	0,89	6	0,64	6	t	66	1083	2,69403	402	60	20	T2011	SR1	55	
08.07.	3:37	7,62	51	1,78	6	1,02	5	t	80	1226	2,335238	525	78	33	T2012	SR1	50	loviyöriä
08.07.	3:59	16	57	2,29	7	1,91	7	t	72	1306	2,726514	479	69	32	T2852	2DV12	51	
07.07.	21:15	6,35	73	2,48	4	1,46	6	t	104	1970	3,575318	551	75,5	37	T2038	SR1	46	loviyöriä
08.07.	1:36	15,49	39	1,02	6	1,02	6	t	118	1998	2,955621	676	55,5	40	T2032	2SR1	48	loviyöriä

ÄÄRINÄMITTAUS 07.07.-08.07.1999, KORJA

anturi 1		anturi 2		anturi 3											
anturin sijainti	radan penkka	tien penkka	metsä												
etäisyys radasta	3 m	15,5 m	35,5 m												
tulokset															
anturi 1	anturi 2	anturi 3	tyyppi	akselit	massa	metripaino	pituus	vaunuja	junan	veturi	mittaus-	muuta	Pölkyn painuma		
mm/s	mm/s	mm/s	P/T/S	kpl	tn	t/m	m	kpl	numero		numero	(lovia)	kanava 8	kanava 9	kanava 10
5,33	2,41	1,59	t	82	976	2,374696	411	22	T2017	2DV12	47	loviyöriä	2,17	2,02	2,44
5,72	0,7	0,44	p	12	129	1,30303	99	3	P24	SR1	37		2,17	2,02	2,44
5,84	0,32	0,32	p	32	448	1,939394	231	8	P14	SR1	43		1,38	1,23	1,72
5,84	0,95	0,57	p	44	462	1,490323	310	11	H9744	SR1	54		1,42	1,27	1,75
6,03	0,57	0,38	p	24	267	1,5	178	6	P80	SR1	45		1,35	1,17	1,61
6,16	0,83	0,57	p	52	710	2,100592	338	13	P32	SR1	66		1,49	1,22	1,81
6,16	0,25	0,25	t	64	432	1,454545	297	16	PV KV02	D114	72	loviyöriä	2,53	2,2	2,92
6,35	2,48	1,46	t	104	1970	3,575318	551	37	T2038	SR1	46	loviyöriä	1,74	1,37	1,99
6,35	1,14	0,57	p	32	361	1,562771	231	8	P74	SR1	76		1,59	1,23	1,89
6,41	0,7	0,44	p	76	1130	2,703349	418	28	T2030	SR1	44		1,56	1,19	1,83
6,6	1,08	0,51	p	16	194	1,552	125	4	IC2	SR1	58		1,69	1,29	2,18
6,6	0,64	0,38	p	24	304	1,820359	167	6	P34	SR1	69		1,6	1,22	1,98
6,67	0,51	0,44	p	24	305	1,713483	178	6	IC72	SR1	60		1,73	1,22	1,95
6,86	0,89	0,51	p	44	512	1,651613	310	11	P8	SR1	36		2,21	1,6	2,45
6,86	0,95	0,38	p	28	315	1,544118	204	7	P6	SR1	71		2,08	1,59	2,41
7,11	1,02	0,51	p	44	517	1,667742	310	11	P76	SR1	39		1,65	1,15	1,86
7,11	0,89	0,64	t	66	1083	2,69403	402	20	T2011	SR1	55		1,79	1,27	2,05
7,11	0,38	0,32	p	28	315	1,544118	204	7	P222	SR1	56		2,14	1,62	2,58
7,62	1,78	1,02	t	80	1226	2,335238	525	33	T2012	SR1	50	loviyöriä	1,66	1,18	1,89
8,64	0,64	0,38	p	28	361	1,769608	204	7	IC4	SR1	63		1,14	0,77	1,31
9,4	3,05	1,4	t	40	413	1,912037	216	11	T2850	2DV12	49	loviyöriä	1,94	1,35	2,03
9,91	1,27	1,4	s	204	4003	6,274295	638	46	T2082A	2SR1	38	2 junaa yht	1,67	1,22	1,85
10,41	4,57	3,81	s	232	4403	6,317073	697	44	T2086	2SR1	40	loviyöriä	2,56	2,12	2,88
10,41	1,65	1,4	t	86	635	1,560197	407	26	T2810	SR1	53		2,56	2,12	2,88
10,92	3,18	2,29	s	150	1156	2,013937	574	38	T2034	SR1	41	loviyöriä	2,1	1,75	2,37
11,18	4,19	3,43	s	216	4497	6,691964	672	48	T2084	2SR1	77	b_loviyöriä	1,55	1,26	1,83
12,45	1,91	0,89	s	212	4061	6,375196	637	39	T2082A	2SR1	57	b_loviyöriä	1,59	1,27	1,79
15,49	1,02	1,02	t	118	1998	2,955621	676	40	T2032	2SR1	48	loviyöriä	1,52	1,26	1,7
16	2,29	1,91	t	72	1306	2,726514	479	32	T2852	2DV12	51		1,51	1,26	1,71
19,01	4,83	3,56	s	216	4497	6,691964	672	48	T2084	2SR1	77	a_loviyöriä	1,47	1,22	1,71
20,07	6,1	5,33	s	216	4445	6,664168	667	50	T2084	2SR1	34	a_loviyöriä	1,53	1,28	1,78
21,08	4,19	2,92	s	216	4445	6,664168	667	50	T2084	2SR1	34	b_loviyöriä	1,48	1,23	1,61
21,34	5,08	4,45	s	212	4061	6,375196	637	39	T2082A	2SR1	57	a_loviyöriä	2,2	2,01	2,69
24,13	1,52	1,14	t	36	410	1,595331	257	9	P36	SR1	42		2,2	2,01	2,69

- 1/1997 Railway Industry Structures and Capital Investment Financing
2/1997 Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset
3/1997 Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI)
4/1997 Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla
5/1997 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020
1/1998 Rataverkon jatkosähköistyksen yhteiskuntataloudellinen vaikutus selvitys
2/1998 Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96)
3/1998 Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät
4/1998 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99
5/1998 Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi
6/1998 Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratahankeissa
1/1999 Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus,
250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
2/1999 Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat
ympäristökustannukset
3/1999 Rautatieliikenteen aiheuttama värinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
4/1999 Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja
300 kN:n akselipainot
5/1999 Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa
6/1999 Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus,
250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
7/1999 Rautatiesiltojen luokittelu ja inventointi rataosuudella Rautaruukki-
Haaparanta akselipainojen korottamista varten
8/1999 Ratarumpujen maastoselvitys, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
1/2000 Rataverkko 2020 -ohjelman väliraportti. Kehittämismuutosten
vaikutustarkastelut
2/2000 Bantrum, 250 kN och 300 kN axellaster
3/2000 Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus
4/2000 Raidesevelin lujisuuden vaikutus tukikerroksen ikään

RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

TEKNINEN YKSIKKÖ

Lisätietoja: Pasi Leimi, puh. (09) 5840 5184, sähköposti: pasi.leimi@rhk.fi
Jakelu: Sinikka Kiiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: sinikka.kiikka@rhk.fi

ISBN 952-445-033-x
ISSN 1455-2604