

RATARUMPUTUTKIMUS

Instrumentointi ja mittaukset

- Erkki Mäkelä**
- Pauli Kolisoja**

RATARUMPUTUTKIMUS

Instrumentointi ja mittaukset

- o Erkki Mäkelä
- o Pauli Kolisoja

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

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

ISBN 952-445-055-0
ISSN 1455-2604

Mäkelä, Erkki ja Kolisoja, Pauli: Ratarumpututkimus, instrumentointi ja mittaukset. Ratahallintokeskus, Kunnossapitoyksikkö. Helsinki 2001. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 8/2001. 72 sivua ja 3 liitettä. ISBN 952-445-055-0, ISSN 1455-2604.

Avainsanat: Instrumentointi, ratarumpu, koekuormitus, mittaus, jännitys, muodonmuutos

TIIVISTELMÄ

Tämä ratarummun instrumentointia ja mittausta koskeva raportti käsittelee syksyllä 2000 Toijalan ja Viialan välisellä rataosuudella instrumentoitua koekohtetta. Koekohteessa oli kaksi raidetta rinnakkain. Koerumpu rakennettiin kahdessa vaiheessa, jolloin penkereeseen sijoittuvat instrumentit asennettiin ainoastaan läntisen raiteen alle.

Koekohteeseen asennetuilla instrumenteilla mitattiin penkereestä pysty- ja vaakasuuntaisia maanpaineita sekä pysty- ja vaakasuuntaisia venymiä. Kiskoista mitattiin ensisijaisesti pyörävoimien pystykomponentteja. Instrumentoidusta ratapölkystä mitattiin pölkyn molempien päiden ja sen keskikohdan pystyliikettä. Ratapölkyn keskikohdalta mitattiin myös sen yläpinnan venymiä pölkyn suuntaan. Ratarummusta mitattiin vaaka- ja pystyhalkaisijan muutosta. Venymiä mitattiin rummun kehän suunnassa, rummun pituussuunnassa ja rumpuelementtien saumojen yli. Syksyllä 2000 ensimmäinen mittaustapahtuma oli ennen raiteen tuentaa ja toinen raiteen tuennan jälkeen. Penkereeseen asennettiin myös lämpötila-antureita, joilla mitattiin penkereen jäätymistä ratarummun ympärillä talvella 2000–2001. Mitatut lämpötilat esitetään rumppututkimuksen toisessa osassa laadittavan mallinnusraportin yhteydessä.

Instrumentit asennettiin kolmelle tasolle penkereeseen. Ylin taso oli noin 0,5 m tukikerroksen alapinnan alapuolelta (Kv -1,1 m). Keskimäinen taso oli noin 0,4 m rummun yläpinnan yläpuolelta (Kv -1,7 m) ja alin taso oli rummun puolen välin tasolla (Kv - 2,5 m). Lämpötila-antureita asennettiin myös rummun alapuolella olevan soraarinnan alapintaan ja tästä tasosta 0,5 m alaspäin olevalle tasolle. Kaikkien instrumenttien sijainnit todennettiin mittanauhmittauksin.

Kiskoista saatiin mitattua onnistuneesti pyörävoimien suuruudet. Ratapölkystä tehdyt pystysuuntaisten siirtymien ja yläpinnan venymien mittaukset onnistuivat myös. Penkereeseen asennetuista instrumenteista saatiin lähes kaikista onnistuneita mittaussignaaleja. Ainoastaan keskimmaiselle instrumenttien asennustasolle sijoitettu penkereen vaakasuuntaista venymää mittaava anturi V25 oli ajautunut mittausalueensa ulkopuolelle. Rumpuelementtien pituussuuntaiset venymät olivat kauttaaltaan hyvin pieniä. Muuten ratarumpuun sijoitetuista venymä- ja siirtymäantureista saatiin edustavia mittaustuloksia.

Koekohteen penkereessä käytetyn täyttösoran palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä tutkittiin Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa syklisellä kolmiaksaalikoelaitteistolla. Samassa laboratoriossa määritettiin pohjamaan kuivakuorisavelle ja syvemmillä sijaitsevalle pehmeämmälle savelle palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä jännitystasosta riippuvana kuvaavat leikkausmoduuliarvot yhdistetyllä Resonant Column ja Bender Element (BERC) -laitteistolla.

TTKK:n rakennushallissa koekuormitettiin samanlainen Iisalmen sahan valmistama rumpuelementti kuin koekohteeseen oli asennettu. Kuormituksen tarkoituksena oli saada tietoa rumpuelementin käyttäytymisestä kimmoisella muodonmuutosalueella. Kuormituksesta saatua tietoa tullaan käyttämään tämän tutkimuksen toisessa eli mallinnusosassa. Rumpuelementtiä kuormitettiin Betoniputkinormien 1995 mukaisesti muuten, paitsi maksimikuormitus oli alle särökuorman. Kuormituskertoja oli kaksi.

Molemmilla kuormituskerroilla rumpuelementistä mitattiin rummun halkaisijan muutos niin vaaka- kuin pystytasossakin. Rummun kehän suuntaisia venymiä mitattiin rummun vastakkaisilta pystyseinämillä, pohjasta ja katosta. Ensimmäisellä kuormituskerralla maksimikuormana oli 51,8 kN/m ja toisella 103,4 kN/m. Mittauksissa havaittiin mikrohalkeilun aiheuttavan rumpuputken epälineaarista käyttäytymistä jo alhaisilla kuormituksilla. Kuormituksen kasvaessa noin 60–80 kN/m epälineaarinen käyttäytyminen lisääntyy huomattavasti. Parhaiten tämä oli todennettavissa rummun kattoon asennetuilla venymäanturilla. Rumpuputken kuormitus onnistui molemmilla kuormituskerroilla hyvin ja kaikista antureista saatiin edustavia mittaustuloksia.

Mäkelä, Erkki and Kolisoja Pauli: Railway Culvert Study, Instrumentation and Measuring. Finnish Rail Administration, Maintenance Department. Helsinki 2001. Publications of the Finnish Rail Administration A 8/2001. 72 pages and 3 enclosures. ISBN 952-445-055-0, ISSN 1455-2604.

Key words: instrumentation, railway culvert, test loading, measurement, stress, strain

SUMMARY

This report deals with instrumentation and measuring of a test railway culvert, which was built in the railway embankment between Toijala and Viiala in autumn 2000. On the instrumentation site there were two parallel tracks. The test culvert was built in two stages. The instruments were installed during the first stage while the western part of the culvert was built.

Vertical and horizontal earth pressures as well as vertical and horizontal strains were measured with the instruments installed in the embankment. The primary interest regarding the measurements made from both of the rails was the vertical component of the wheel load. Vertical movement at both ends and in the middle of a sleeper were measured from the instrumented sleeper. In addition, Longitudinal strains on the upper surface of the sleeper were recorded in the middle of the sleeper. Displacement measurements made in the test culvert gave information about diameter changes of the culvert in horizontal and vertical directions. Meantime, strains were measured in longitudinal direction of the culvert, at the top and at the bottom of the inner circumference of the culvert as well as across a joint of two culvert elements. The first measuring period in autumn 2000 took place before tamping of the track and the second one a few days after tamping. Temperature sensors were also installed in the embankment. Temperatures were measured a couple of times during the winter 2000–2001. These results of the temperature measurements will be presented in another report, which will deal with modelling of the railway culvert behaviour.

The measurement instruments were installed on three different levels in the embankment. The uppermost level was approximately 0,5 m beneath the ballast layer, that is to say approximately 1,1 meters below the track level. The intermediate layer was situated approximately 0,4 meters above the top of the culvert i.e. approximately 1,7 meters below the track level, while the lowest level was situated at the mid-height of the culvert, approximately 2,5 meters below the track level. In addition, temperature sensors were installed also at two different levels below the culvert. The first one of these levels was situated at the bottom of hard core filling and the next one just 0,5 meters below that. The locations of all the instruments were verified with a measuring tape.

The magnitudes of vertical wheel loads were successfully recorded from the rails. Vertical displacements and the strains at the top of the instrumented sleeper were also measured successfully. Almost all transducers installed in the embankment gave adequate data except transducer number V25, measuring horizontal strains of the embankment, which had been drifting away from its measuring range. The measured longitudinal strains of culvert elements were very small. All other strain and displacement instruments installed in the culvert gave representative data.

The resilient deformation behaviour of the gravel fill material used in the embankment was tested using the cyclic loading triaxial equipment available in the Laboratory of foundation and earth structures at the Tampere University of Technology (TUT). In the same laboratory the strain level dependent values of shear modulus were determined both for the dry crust clay material from the upper part of the subgrade and for the softer clay material lying under the dry crust using a combined Resonant Column and Bender Element (BERC) device.

A culvert element manufactured by Iisalmen saha Ltd that was of the same type than those installed in the railway embankment between Toijala and Viiala was test loaded in the test hall of the department of civil engineering of TUT. The aim of this test was to get information about the mechanical behaviour of the culvert element in elastic strain range. The results will be used as a background information for the modelling part of the study. The culvert element was test loaded according to the regulations of Betonibutkinormi 1995, except that the load did not reach the so called crack load. In the test loading there were two load cycles.

During both of these load cycles diameter changes of the culvert in horizontal and vertical directions were measured. Strains induced in the inner circumference of the culvert element were measured at the bottom and at the top of the culvert as well as from the vertical walls. During the first load cycle a maximum load of 51,8 kN/m was reached, while during the second load cycle the maximum load was 103,8 kN/m. During the test loading nonlinear behaviour of the culvert element could be observed even at fairly low level of loading and the nonlinearity increased significantly at a load level of about 60–80 kN/m. Especially clearly this could be seen from the data given by the strain transducer installed on top of culvert. Both load cycles applied on the culvert element were completed successfully and representative data was obtained from all of the transducers.

ESIPUHE

Tämä ratarummun instrumentointia ja mittausta käsittelevä raportti on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) toimeksiannosta tehtävää betonisia ratarumpuja käsittelevää tutkimusta, joka on osa yhteispohjoismaista ratarumpututkimusta. Tutkimus on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa professori Pauli Kolisojan ohjauksessa. Raportin ovat laatineet diplomi-insinööri Erkki Mäkelä ja professori Pauli Kolisoja.

Tutkimuksen etenemistä valvoi johtoryhmä, johon kuuluivat Pasi Leimi RHK:n kunnossapitoyksiköstä, Juha Heinonen Oy VR-Rata Ab:sta ja Pauli Kolisoja ja Erkki Mäkelä TTKK:n pohja- ja maarakenteiden laboratoriosta.

Helsingissä, lokakuussa 2001

Ratahallintokeskus
Kunnossapitoyksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ..... | 3 |
| SUMMARY | 5 |
| ESIPUHE | 7 |
| SISÄLLYSLUETTELO | 8 |
| 1. JOHDANTO | 10 |
| 2. INSTRUMENTOINNIN TOTEUTUS | 11 |
| 2.1 Instrumentointikohde..... | 11 |
| 2.2 Mitattavat suureet..... | 12 |
| 2.3 Instrumenttityypit..... | 14 |
| 2.4 Instrumentoinnin asentaminen ja sijoittelu..... | 18 |
| 2.4.1 Instrumentoinnin pääosat | 18 |
| 2.4.2 Pohjamaan instrumentointi..... | 18 |
| 2.4.3 Penkereen instrumentointi..... | 19 |
| 2.4.4 Raiteen instrumentointi..... | 25 |
| 2.4.5 Ratarummun instrumentointi..... | 28 |
| 2.5 Mittausinstrumenttien toteutuneet sijainnit | 30 |
| 2.5.1 Pohjamaa | 30 |
| 2.5.2 Penger..... | 32 |
| 2.5.3 Mittanauhmittauksen periaate..... | 36 |
| 2.5.4 Ratarumpu | 37 |
| 3. MITTAUKSET INSTRUMENTOINTIKOHTEELLA..... | 39 |
| 3.1 Mittausten ajankohta | 39 |
| 3.2 Mittausjärjestelyt..... | 39 |
| 3.3 Mitattu junaliikenne | 42 |
| 3.4 Esimerkkejä mittaustuloksista | 42 |
| 3.4.1 Kiskot..... | 43 |
| 3.4.2 Ratapölkky..... | 44 |
| 3.4.3 Tukikerroksen alapinta -0,5 m -taso (Kv -1,1 m)..... | 45 |
| 3.4.4 Rummun yläpinta +0,4 m -taso (Kv -1,7 m)..... | 46 |
| 3.4.5 Rummun puolivälin taso (Kv -2,5 m)..... | 48 |
| 3.4.6 Ratarumpu | 50 |
| 4. LABORATORIOTUTKIMUSTEN TULOKSET | 54 |
| 4.1 Pengermaalit..... | 54 |
| 4.2 Pohjamaan maalit | 55 |
| 4.3 Rumpuputkien koekuormitukset..... | 57 |
| 4.3.1 Koejärjestelyt..... | 57 |
| 4.3.2 Instrumenttien sijoittelu kuormitetuissa rumpuputkissa | 60 |
| 4.3.3 Mittaustulokset | 62 |

| | |
|--|----|
| 5. YHTEENVETO..... | 70 |
| 5.1 Johtopäätökset koekohteen instrumentoinnista ja mittauksista | 70 |
| 5.2 Johtopäätökset koerummun laboratoriotutkimuksista..... | 71 |
| KIRJALLISUUSLUETTELO..... | 72 |

LIITTEET

1. Erittely instrumentointikohteen kautta kulkeneesta liikenteestä
2. Syklisen kolmiaksaalikokeen tulokset
3. Resonant Column ja Bender element -mittausten tulokset

1. JOHDANTO

Tämä ratarummun instrumentointia ja mittausta koskeva raportti on osa Ratahallinto-keskukselle (RHK) tehtävää ratarumpujen toimintaa käsittelevää tutkimusprojektia. Ratarumpujen toimintaa käsittelevä tutkimusprojekti on vastaavasti osa RHK:n vuonna 1998 aloittamaa suurempaa projektikokonaisuutta, jolla pyritään selvittämään nykyisten sallittujen akselipainojen korottamisen edellytyksiä 250 kN:iin ja pitemmällä aikavälillä 300 kN:iin asti. Ratarumpuprojekti toteutetaan Pohjoismaisena yhteistyöprojektina, johon osallistuvat Suomen (RHK) lisäksi Ruotsi (Banverket) ja Norja (Jernbanverket). Suomessa tutkimus keskittyy betonista valmistettujen putkimaisten ja Ruotsissa vastaavasti kivisten ratarumpujen toimintaan. Ratarumpuprojektin lopputavoitteena on tuottaa yhteispohjoismaisia ohjeita rumpujen mitoittamista, rakentamista ja kunnossapitoa varten

Tässä instrumentointi- ja mittausraportissa käsiteltävä kohde sijaitsee Toijalan ja Viialan välisellä rataosuudella kilometrilukeman 152+695 kohdalla. Koekohteen kaksiraiteisessa radassa instrumentointi on asennettu ainoastaan läntisen raiteen alle. Penkereeseen sijoittuvat instrumentit asennettiin 16.9.2000. Raide ja ratarumpu instrumentoitiin 15–16.10.2000 ennen mittauksia. Itse mittauksia oli kaksi, joista ensimmäinen oli ennen raiteen tuentaa ja toinen raiteen tuennan jälkeen. Raiteen ja ratapenkereen instrumentoinnissa hyödynnettiin kesällä 1999 Koriolla saatuja kokemuksia, jotka on esitetty RHK:n julkaisusarjan julkaisussa A5/2000 ”Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot”.

Instrumentoinnin tavoitteena oli saada mittauksiin perustuvaa tietoa siitä, miten erisuuruiset akselikuormat vaikuttavat seuraaviin asioihin:

- kuormituksen jakautuminen tukikerroksen alapuolisessa ratapenkereessä rummun yläpuolella ja ympärillä
- kuormituksen jakautuminen itse ratarummussa
- kuormituksen aiheuttama pystysiirtymä ratapölkkyssä.

Pääosa mittauksista tehtiin, kun junat kulkivat läntistä raidetta pitkin. Penkereeseen ja ratarumpuun kohdistuvia rasituksia mitattiin koemielessä myös silloin, kun junat käyttivät itäistä raidetta. Junaliikenne oli mittausajanjakson normaalia liikennettä.

Tässä raportissa esitetään yhteenveto instrumentoinnin ja mittausten käytännön toteutuksesta sekä tulevaa mallinnusta tukevista laboratoriokokeista. Mittausraportissa esitetty tutkimusosuus on ensimmäinen osa Suomessa tehtävästä ratarumpujen toimintaa käsittelevästä tutkimusprojektista. Projektin toisessa eli mallinnusosuudessa tullaan esittämään talvella 2001 tehdyt ratapenkereen lämpötilamittaukset ja koko projektia koskevat yhteenvedot sekä mahdolliset jatkotutkimustarpeet.

2. INSTRUMENTOINNIN TOTEUTUS

2.1 Instrumentointikohde

Instrumentointikohde sijaitsee Toijalan ja Viialan välisellä rataosuudella kilometrilukeman 152+695 kohdalla. Tässä kohtaa rata kaartuu itään ja siinä kulkee kaksi raidetta rinnakkain. Kuvissa 2.1:1 ja 2.1:2 esitetään näkymät instrumentointikohteesta pohjoisen sekä etelän suuntaan.



Kuva 2.1:1 Näkymä instrumentointikohteesta pohjoisen suuntaan.



Kuva 2.1:2 Näkymä instrumentointikohteesta etelän suuntaan.

Kuvassa 2.1:1 näkyvä keltaisella maalattu ratapölkky ilmaisee raiteesta tehtyjen mittausten tarkan sijaintikohdan. Kuvasta 2.1:1 voidaan havaita myös raiteiden 70 mm suuruinen sivuttaiskaltevuus mittauskohdalla. Mittauskohdalla radan kaarresäde $R=3146$ m. Kuvaan 2 on merkitty erikseen kuvassa 1 näkyvä keltainen ratapölkky. Kuvista 2.1:1 ja 2.1:2 voidaan havaita myös radan molemmille puolille rakennettu huoltotie.

Ratarumpututkimusta varten rakennettiin kuvassa 2.1:1 näkyvän keltaisen ratapölkyn kohdalle uusi betoninen, halkaisijaltaan 800 mm oleva ratarumpu, jonka laskusuunta on idästä länteen eli kuvissa 2.1:1 ja 2.1:2 näkyvän istutetun koivikon suunnasta pellolle päin. Uusi betoninen ratarumpu korvaa vanhan kivisen ratarummun, jonka sijainti on uudesta rummista noin 10 m etelän suuntaan. Uusi betoninen ratarumpu sijaitsee 2,0 m syvyydessä Kv:sta (läntisen raiteen kohdalla $K_v = 87,79$ m) ja on kokonaispituudeltaan 28 m pitkä. Ratarummun pituuskaltevuus on noin 0,9 % (kuva 2.4:1).

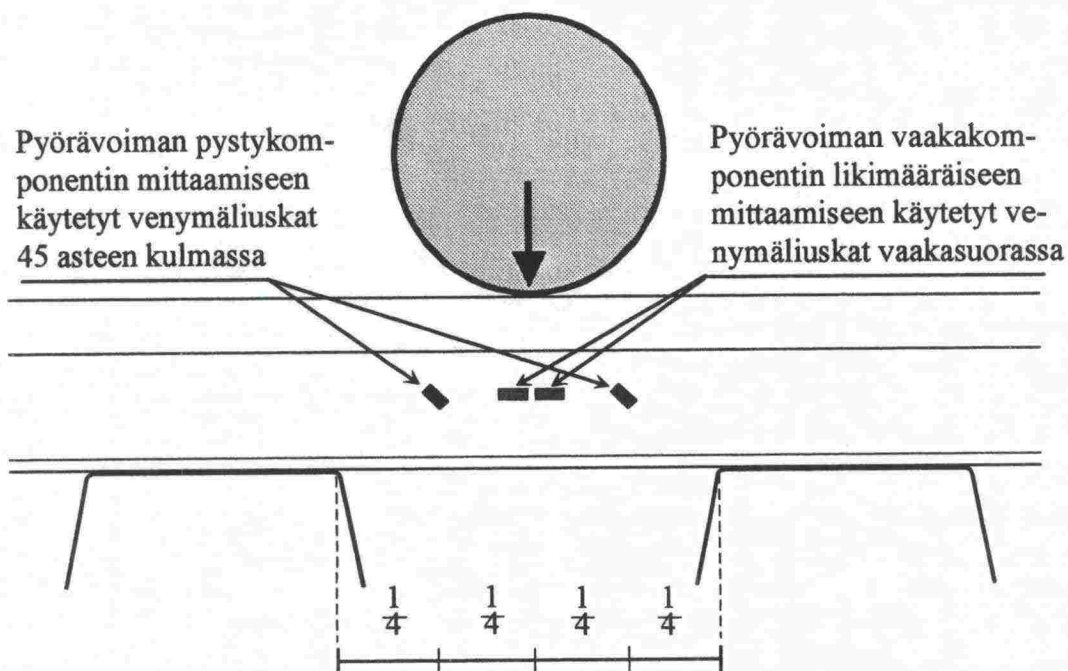
Ratarumpu rakennettiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa 15.–17.9.2000 rakennettiin läntisen raiteen alla oleva osa rummista ja toisessa vaiheessa 22.–24.9.2000 itäisen raiteen alla oleva osa rummista. Ensimmäisen vaiheen rakentamisen yhteydessä radan alusrakenteeseen asennettiin mittausinstrumentteja neljälle eri mittaus-tasolle. Rummun itäisen osan rakennusvaiheessa rataan ei asennettu mittaus-instrumentteja. Raiteeseen myöhemmin asennetut mittausinstrumentit sijaitsevat myös radan läntisellä raiteella.

2.2 Mitattavat suureet

Tähän mennessä toteutuneilla kahdella mittauskerralla rataan asennetuilla mittausinstru-menteilla on mitattu:

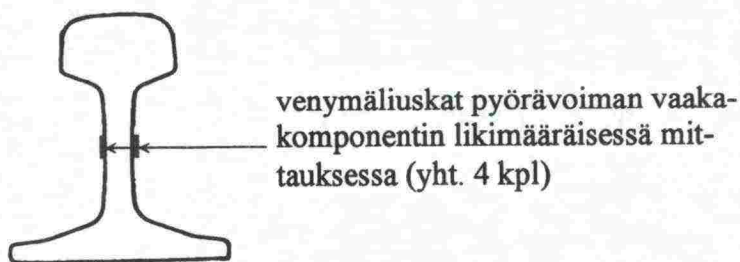
1. kiskoihin vaikuttavia pyörävoimia
2. ratapölkyn siirtymiä
3. ratapenkereessä vallitsevia jännityksiä
4. ratapölkyn, -penkereen ja -rummun muodonmuutoksia.

Tarkoituksena on mitata lämpötiloja myös myöhemmin talvella, jos talvi 2000–2001 on riittävän kylmä ratapenkereen jäätyneen kannalta. Syksyn 2000 mittauksissa keskityttiin ainoastaan neljään edellä esitettyyn suureeseen. Raiteen osalta mitattiin kiskon varren leikkausvenymiä, joiden avulla saatiin määritettyä kiskossa vaikuttava pystysuora voima eli ylittäneen pyörän pyörävoima. Kiskossa vaikuttavia venymiä mitattiin molemmista kiskoista. Kuvassa 2.2:1 esitetään pystysuoran sekä vaakasuoran voiman likimääräiseen mittaamiseen käytetty venymäliuskojen sijoittelu kiskossa sivulta päin katsottuna.



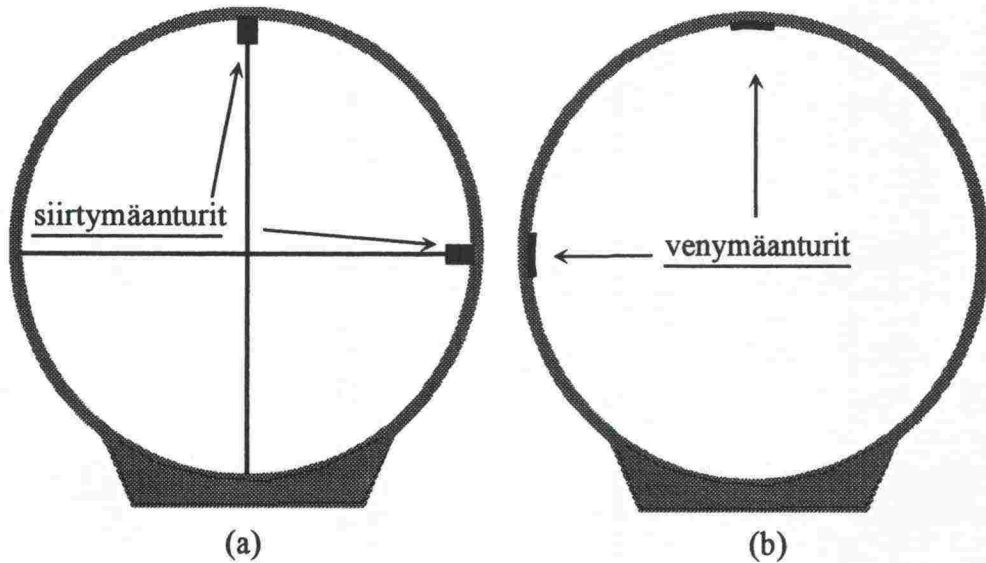
Kuva 2.2:1 Venymäliuskojen sijainti pyörävoiman pysty- ja vaakakomponenttien mittaussjärjestelyssä.

Kuvan 2.2:1 etäisyysmitat ovat suhteellisia. Venymäliuskat on sijoitettu kiskon molemmille puolille, jolloin venymäliuskojen yhteismääräksi saadaan 8 kappaletta kiskoa kohden. Kuva 2.2:2 havainnollistaa pyörävoiman vaakakomponentin likimääräisessä mittaamisessa käytettyjen venymäliuskojen sijoittelun kiskon poikkileikkauksessa.



Kuva 2.2:2 Venymäliuskojen sijainti pyörävoiman vaakakomponentin mittaussjärjestelyssä.

Raiteen muista osista mitatut suureet ovat kuvassa 2.1:1 näkyvän keltaisella maalatun pölkyn päiden ja pölkyn keskikohdan pystysuorat siirtymät sekä pölkyn yläpinnan pituussuuntainen venymä. Ratarummun osalta mitattiin rummun halkaisijan muutosta pysty- ja vaakasuunnassa (kuva 2.2:3 a) ja yksittäisen rumpuelementin pituus- ja kehän suuntaista venymää (kuva 2.2:3 b). Venymäantureita sijoitettiin myös rumpuelementtien saumojen yli pituussuuntaan kahteen kohtaan.

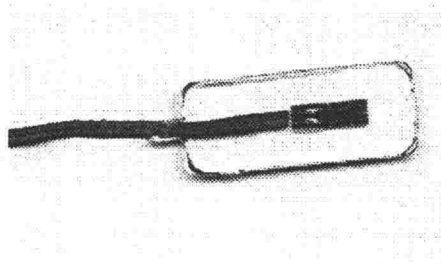


Kuva 2.2:3 Ratarummun (a) halkaisijan muutoksen ja (b) kehän suuntaisen venymän mittauskohdat.

Itse ratapenkereeseen asennetuilla instrumenteilla mitattiin pysty- ja vaakasuuntaisia maanpaineita sekä pysty- ja vaakasuuntaisia venymiä.

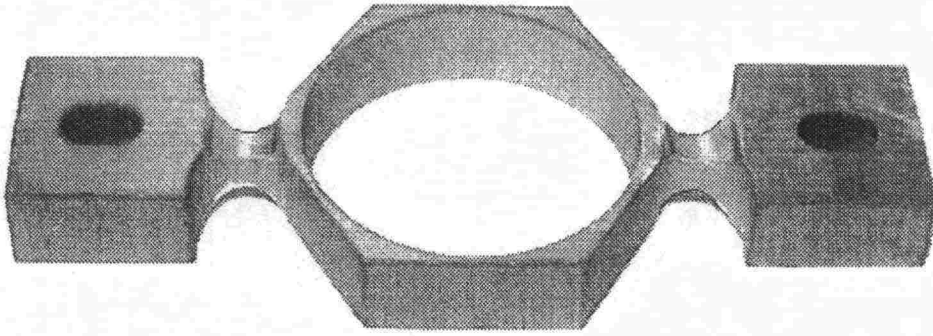
2.3 Instrumenttityypit

Kiskojen instrumentoinnissa käytettiin Kyowan KFW-5-120-C1-11L1M2R -tyyppisiä venymäliuskoja (kuva 2.3:1). Samoja liuskoja käytettiin ratapölkyn yläpinnan ja ratarummun venymien mittaamiseen sillä erolla, että venymäliuskat oli kiinnitetty anturina toimivaan, ruostumattomasta teräksestä valmistettuun kehikkoon, joka puolestaan oli kiinnitetty jäykästi ratapölkkyyn/-rumpuun.



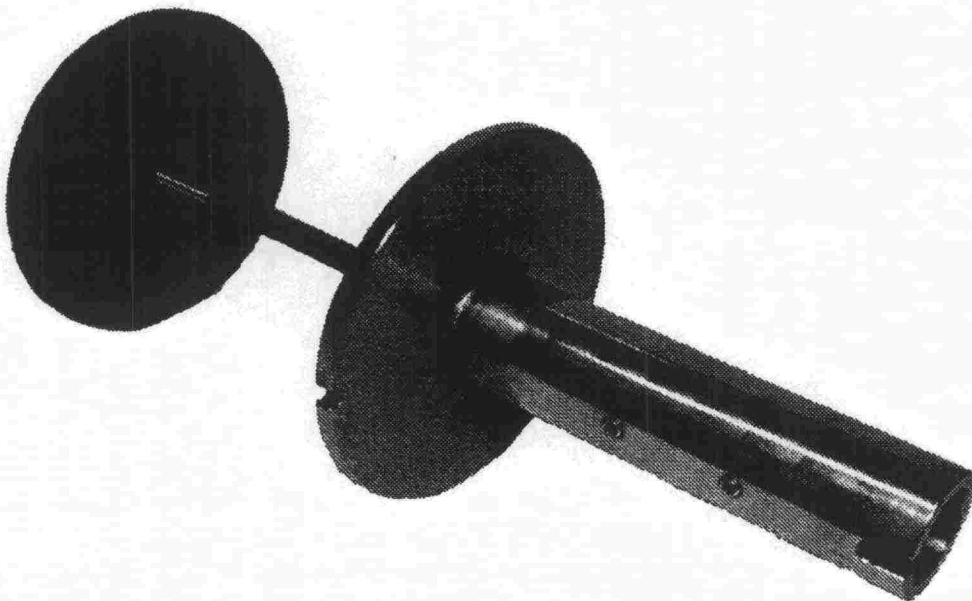
Kuva 2.3:1 Instrumentoinnissa käytetty Kyowan KFW-5-120-C1-11L1M2R venymäliuska.

Kuvassa 2.3:2 on esitetty alumiininen venymäliuskojen kiinnityskehikko, joka on tyypiltään samanlainen kuin pölkyssä ja rummuissa käytetty teräksinen kehikko. Venymäliuskat sijoitettiin kehikon keskellä olevan ympyrän muotoisen aukon sisäreunoille tasavälein.



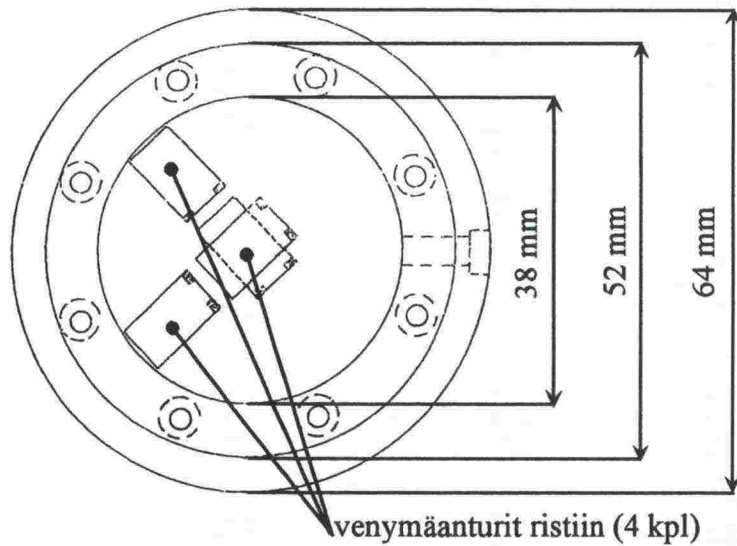
Kuva 2.3:2 Ratapölkkyssä ja -rummuissa käytetty venymäliuskojen kehikko eli venymäanturi.

Ratapenkereessä käytetty maan venymäanturityyppi on esitetty kuvassa 2.3:3. Kuvassa näkyy ainoastaan runko-osa. Maassa tapahtuvat muodonmuutokset, venymät ja puristumat, välittyvät kahden ympyrämuotoisen levyn avulla induktiiviselle etäisyys-anturille, joka mahdollistaa levyjen välisen etäisyyden mittaamisen. Maan venymäanturien runko-osa on terästä. Maan venymäanturit sekä ratapölkkyssä/-rummuissa käytetty venymäanturien kehikko on suunniteltu sekä valmistettu TTKK:n pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa.



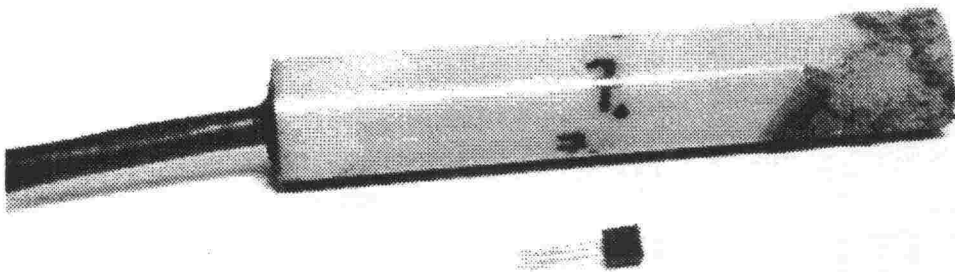
Kuva 2.3:3 Maan venymäanturin runko-osa.

Maanpaineantureina käytettiin Nottinghamin yliopistolla kehitettyä ja rakennettua The Nottingham Pressure Cell -tyyppistä maanpaineanturia. Kuvassa 2.3:4 on esitetty päältä päin skemaattinen kuva tästä anturityypistä. Maanpaineanturin korkeus on 11 mm ja sen ulkokuori on ruostumatonta terästä.



Kuva 2.3:4 The Nottingham Pressure Cell päältä päin katsottuna

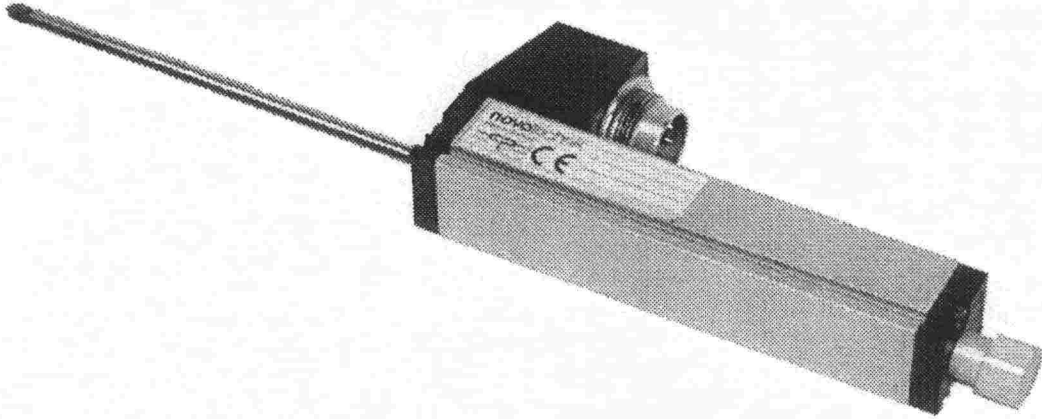
Pohjamaahan ja ratapenkereeseen asennettiin venymä- ja maanpaineantureiden lisäksi lämpötila-antureita, joilla on tarkoitus mitata lämpötiloja myöhemmin talvella. Lämpötila-antureina käytettiin NSC:n (National Semiconductor) valmistamia LM 335Z -tyyppisiä antureita. Kuvassa 2.3:5 on esitetty lämpötila-anturi ja sen suojakuori johtoineen.



Kuva 2.3:5 Lämpötila-anturi ja sen suojakuori johtoineen.

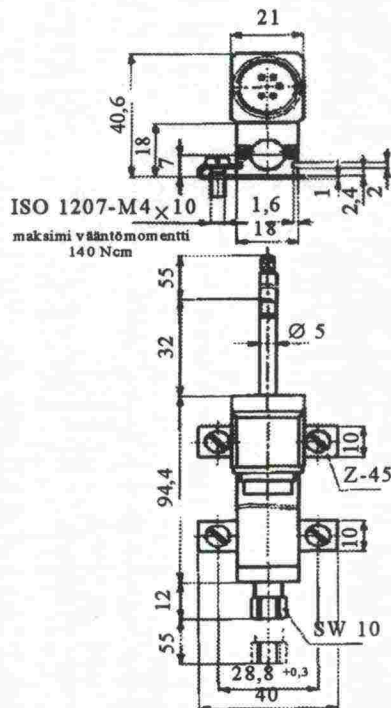
Kuvassa 2.3:5 näkyvän lämpötila-anturin suojakuori on muovia. Itse anturi sijaitsee hartsin valettuna muovikuoren sisällä. Kuvan 2.3:5 anturi ja suojakuori ovat oikeassa koossa eli suojakuoren pituus on 88 mm ja itse anturin pituus 18 mm.

Keltaisella maalatun ratapölkyn (kuva 2.1:1) pystysuuntaista liikettä mitattiin Novotechnikin TR 50 siirtymäanturilla. Kuvassa 2.3:6 on esitetty kyseinen anturityyppi. Samoja antureita käytettiin rummun sisähalkaisijan mittauksessa rumpuelementtien koekuormituksen yhteydessä TTKK:n rakennustekniikan koehallissa (kappale 4.3).



Kuva 2.3:6 Novotechnikin siirtymäanturi TR 50.

Siirtymäanturin tunnuksen lopussa esiintyvä numero viittaa maksimisiirtymään, jota anturilla voidaan mitata (yksikkönä mm). Siirtymäanturin ulkokuori on alumiinia ja itse mittavarsi on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Mittausvarren päässä oleva kuulapää on karkaistua ruostumatonta terästä. Kuvassa 2.3:7 esitetään siirtymäanturin TR 50 ulkoisia mittoja. Kuvassa 2.3:7 esitetään myös siirtymäanturin kiinnitysteline, jota ei ole esitetty kuvassa 2.3:6.



Kuva 2.3:7 Siirtymäanturin TR 50 ulkoisia mittoja (Novotechnik 2000).

2.4 Instrumentoinnin asentaminen ja sijoittelu

2.4.1 Instrumentoinnin pääosat

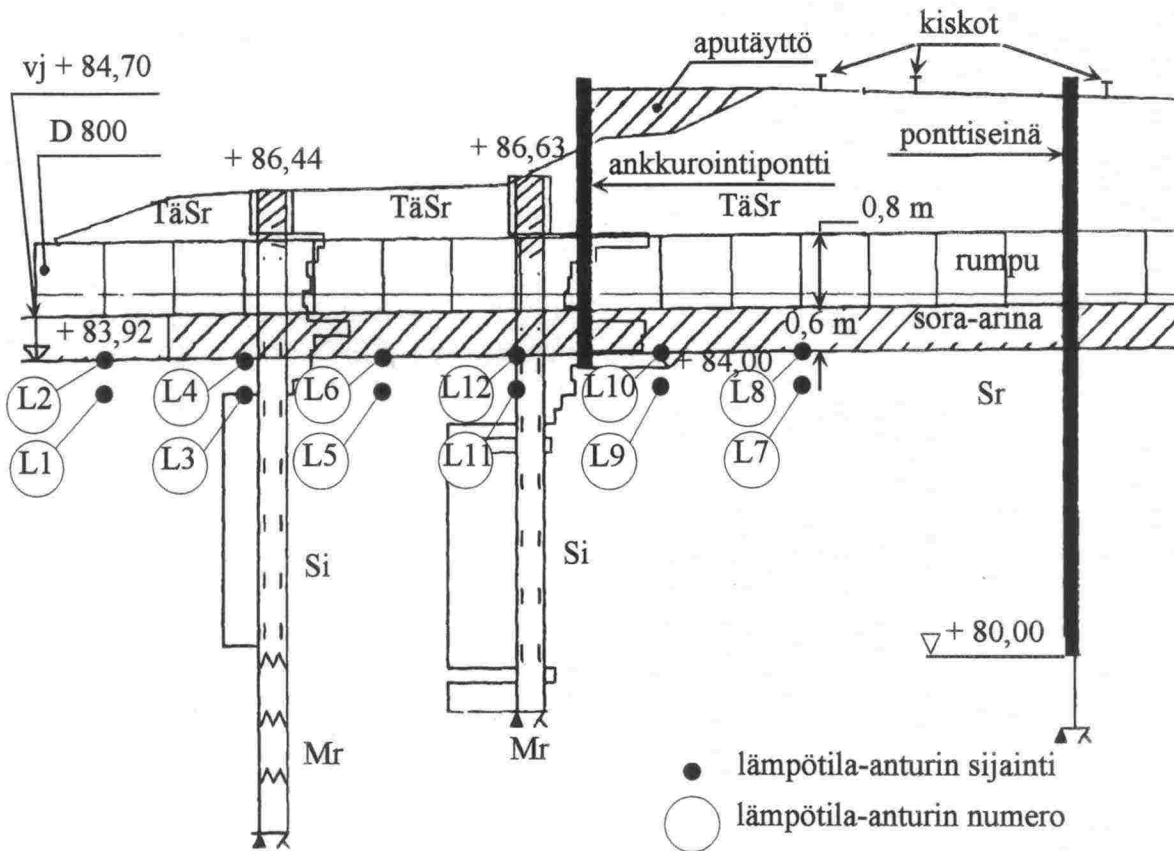
Rataan asennetut mittausinstrumentit voidaan jakaa neljään kategoriaan:

- pohjamaahan asennetut mittausinstrumentit
- ratapenkereeseen asennetut mittausinstrumentit
- raiteeseen asennetut mittausinstrumentit sekä
- ratarumpuun asennetut mittausinstrumentit.

Instrumentoinnin asentaminen eteni ajallisesti koerummun rakentamisen mukaan eli ensimmäisenä asennettiin ratapenkereen auki kaivun myötä pohjamaahan lämpötila-anturit. Tämän jälkeen ratapenkereeseen asennettiin kolmelle eri tasolle venymä-, maanpaine- ja lämpötila-antureita. Raiteen instrumentointi tehtiin koerummun valmistuttua niin, että molemmat raiteet olivat olleet liikenteen käytössä noin kolme viikkoa. Koerummun instrumentointi tehtiin ensimmäistä mittausjaksoa edeltävänä päivänä.

2.4.2 Pohjamaan instrumentointi

Ratapenkereen ja pohjamaan instrumentointi tehtiin 16.9.2000. Pohjamaan instrumentointia edelsi rummun rakentamisessa tarvittavien ponttiseiniä upotus ja tuenta, läntisen raiteen katkaisu ja purku, radan kaivaminen auki tarvittavalle tasolle pohjamaahan sekä kaivutason peittäminen suodatinkankaalla. Lämpötila-anturit sijoitettiin rummun keskikohdalla kahdelle eri syvyystasolle. Syvin taso sijaitsi 0,5 m kaivutason alapuolella ja seuraava taso oli kaivutasossa. Kuvassa 2.4:1 on esitetty läntisen raiteen poikkileikkaus työaikana, mistä käy selville pohjamaahan asennettujen lämpötila-antureiden asennustasot, antureiden lukumäärä ja antureiden numerointi. Samaan kuvaan on piirretty painokairaustulokset kolmesta eri tutkimuspisteestä. Rummun asennustyön valmistuttua kuvassa vasemmalla näkyvät pontit poistettiin. Kuvan 2.4:1 oikean puoleiseen raiteiden välissä olevaan ponttiseinään tehtiin rummun kohdalle reikä. Reikä ulottuu noin 0,5 m rummun alapinnan alapuolelle. Muuten ponttiseinä katkaistiin yleistasosta Kv -0,9 m itäisen puolen rakentamisen yhteydessä. Myös kuvassa esiintyvä aputäyttö poistettiin samaan aikaan. Kuvaan ei ole piirretty tukikerroksen alapinnassa sijaitsevaa routaeristystä.

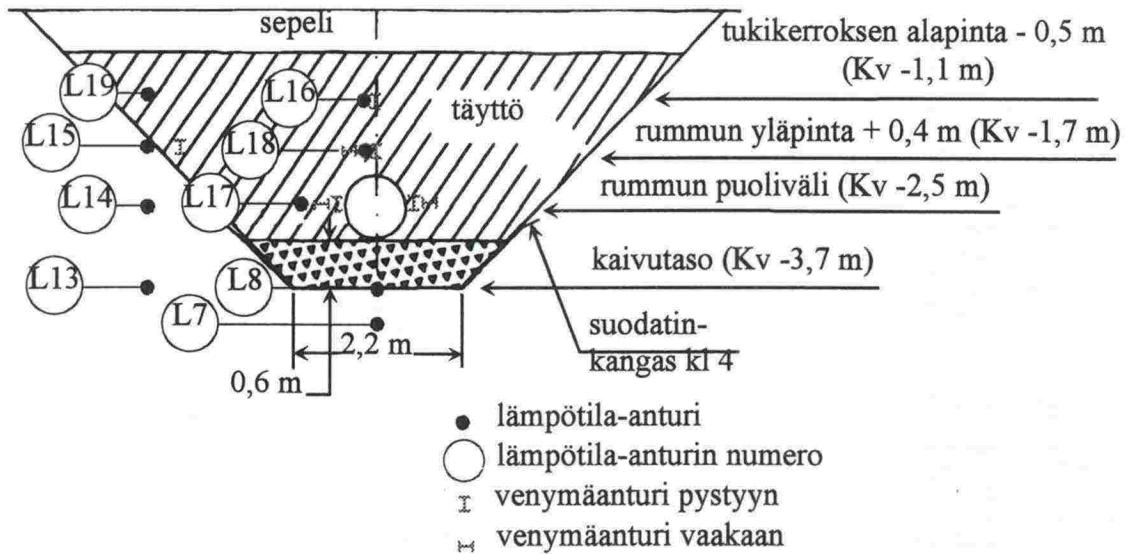


Kuva 2.4:1 Pohjamaahan asennettujen lämpötila-anturien sijainti ja numerot.

2.4.3 Penkereen instrumentointi

Penkereen instrumentointi tehtiin välittömästi pohjamaan instrumentoinnin jälkeen. Penkereeseen asennettiin maanpaine-, venymä- ja lämpötila-antureita kolmelle eri korkeustasolle. Ensimmäinen korkeustaso tuli rummun puolivälin tasolle ($K_v -2,5$ m), toinen rummun päällä olevaan täyttöön noin 0,4 m rummun yläpinnasta ($K_v -1,7$ m) ja kolmas noin 0,5 m syvyyteen tukikerroksen alapinnan alapuolelle ($K_v -1,1$ m) (kuva 2.4:2). Maanpaine- ja venymäantureita asennettiin kahteen poikkileikkaukseen kummankin kiskon alapuolelle. Lämpötila-antureita asennettiin kuvan 2.4:2 mukaisesti myös kaivannon luiskan läpi rummun sivulle noin 2,5 m etäisyydelle rummusta.

Pohjamaan instrumentoinnin jälkeen kaivutason päälle rakennettiin kuvassa 2.4:1 esitetty 0,6 m paksuinen sora-arinakerros. Kuvassa 2.4:3 esitetään sora-arinan tiivistämistä Bomag BPR 50/52 D-2 -tyyppisellä suunnanvaihdolla varustetulla tärylevyllä, jonka paino on noin 465 kg. Kuvan 2.4:2 tärylevyn työleveys on 520 mm ja siinä on D-2 sarjan dieselmoottori (Rotator 2000).



Kuva 2.4:2 Penkereeseen ja pohjamaahan asennettujen antureiden asennustasot.

Kuva 2.4:2 on tarkkuudeltaan suuntaa-antava, eikä siihen ole merkitty lämpötila- ja venymäantureiden lisäksi maanpaineantureita. Kuva 2.4:2 edustaa vain yhtä läntisen raiteen ulkokiskon alapuolella olevaa pystysuuntaista tasoa kuvasta 2.4:1.



Kuva 2.4:3 Sora-arinan tiivistämistä Bomag BPR 50/52 D-2 -tyyppisellä tärylevyllä.

Sora-arinan tiiviyys mitattiin radiometrisellä tiiviyden mittauslaitteistolla (Troxler). Mittauksen suoritti Geopalvelu Oy. Mittaus tapahtui pintamittauksena kolmesta pisteestä tulevan rummun alapuolelta, jolloin tiiviyksiksi saatiin taulukon 2.4:1 mukaiset arvot.

Taulukko 2.4:1 Sora-arinan tiiviyysaste ja vesipitoisuus.

| Paikka | Vesipitoisuus [%] | Kuivatiheys [kg/m ³] | Tiiviyysaste [%] |
|------------------------|-------------------|----------------------------------|------------------|
| Rummun keskikohta | 4,1 | 2223 | 100 |
| Rummun keskikohta +3 m | 4,4 | 2158 | 97,2 |
| Rummun keskikohta +8 m | 4,1 | 2190 | 98,6 |
| <i>Keskiarvo:</i> | | | 98,6 |

Taulukon 2.4:1 arvot on saatu tiivistetyn kerroksen yläpinnasta, jolloin arvot eivät välttämättä vastaa tiiviyysasteeltaan kerroksen paksuuden mukaan muuttuvaa todellista tiiviyysastetta. Kuvassa 2.4:4 esitetään tiiviyden mittaamista rummun keskikohdalta kuvaan 2.4:1 piirretyn oikeanpuoleisen ponttiseinän vierestä.



Kuva 2.4:4 Tiiviyden mittaamista sora-arinan päältä.

Sora-arinan päälle asennettiin betoniset rumpuputket aloittaen kuvassa 2.4:4 näkyvästä ponttiseinästä (kuva 2.4:5).



Kuva 2.4:5 Rumpuputkien asentaminen ponttiseinästä alkaen.

Rumpuputkien asentamisen jälkeen rumpuputket peitettiin suodatinkankaalla. Tämän jälkeen päästiin tekemään vierustäyttö, joka ulotettiin rummun puolivälin tasolle. Vierustäyttö tiivistettiin kuvan 2.4:3 mukaisella tärylevyllä. Sora-arinan tapaan tiivistetystä kerroksesta mitattiin tiiviudet Troxlerilla kerroksen yläpinnasta. Tiiviudet olivat taulukon 2.4:2 mukaiset.

Taulukko 2.4:2 Vierustäytön tiiviysaste ja vesipitoisuus.

| Paikka | Vesipitoisuus [%] | Kuivatiheys [kg/m ³] | Tiiviysaste [%] |
|-----------------|-------------------|----------------------------------|-----------------|
| Toijalan puoli | 4,2 | 2175 | 98,0 |
| Toijalan puoli | 4,4 | 2134 | 96,1 |
| Tampereen puoli | 4,1 | 2170 | 97,7 |
| | | <i>Keskiarvo:</i> | 97,3 |

Mittausinstrumentit asennettiin vierustäyttöön rummun puolivälin tasoon. Tähän tasoon sijoitettiin kolme maan venymäanturia vaakatasoon, kolme venymäantureita pystytasoon, kaksi maanpaineanturia vaakatasoon ja yksi lämpötila-anturi kaivantoon sekä yksi lämpötila-anturi kaivannon luiskaan. Kuvassa 2.4:6 anturit on asennettu rummun puolivälin tasolla olevaan vierustäyttöön.



Kuva 2.4:6 Rummun puolivälin tasolle (Kv -2,5 m) asennetut täyttösoralla peitetyt mittausinstrumentit.

Kuvasta 2.4:6 havaitaan mittausinstrumenttien johdot valkoisissa suojaputkissa yksittäisten ankkurointiponttien välissä oikealla sekä Toijalan puoleisten instrumenttien johdot valkoisessa suojaputkessa kaapelikourun päälle vyyhdettynä. Suodatinkankaalla peitetty rumpu sekä kuvassa 2.4:1 esitetyt yksittäiset ankkurointipontit nähdään myös kuvasta.

Rummun päällä oleva sorakerros rakennettiin useammasta täyttökerroksesta, jotka tiivistettiin kuvan 2.4:3 mukaisesti tärylevyllä. Tiiviydet mitattiin Kv -1,7 m olevalta tasolta Troxlerilla. Tulokset esitetään taulukossa 2.4:3. Samalle tasolle asennettiin kaksi maan venymäanturia vaakatasoon, kaksi venymäanturia pystytasoon ja maanpaineanturia pystytasoon sekä kaksi lämpötila-anturia. Kuvassa 2.4:7 on esitetty pystyyn asennettävien venymäanturien asentamista.

Taulukko 2.4:3 Rummun päällä olevan täytön tiivysaste ja vesipitoisuus.

| Paikka | Vesipitoisuus [%] | Kuivatiheys [kg/m ³] | Tiivysaste [%] |
|-----------------|-------------------|----------------------------------|----------------|
| Toijalan puoli | 4,1 | 2217 | 99,9 |
| Tampereen puoli | 4,0 | 2150 | 96,8 |
| | | <i>Keskiarvo:</i> | 98,4 |

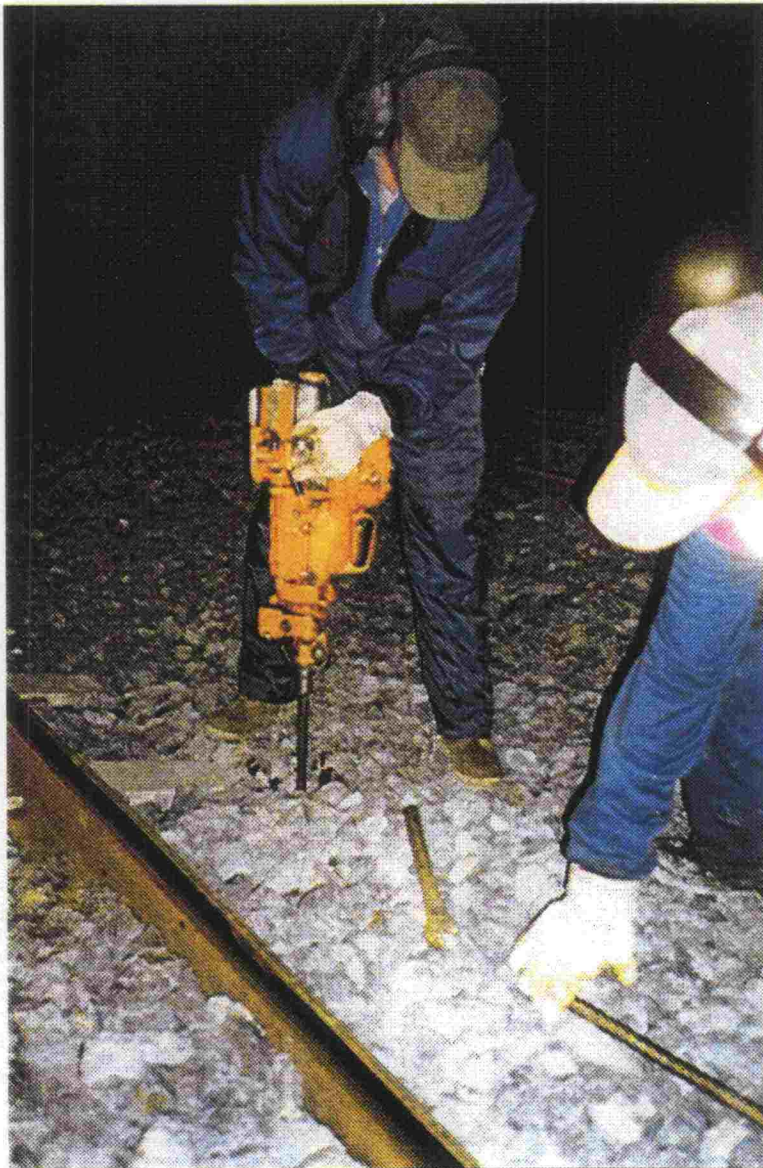


Kuva 2.4:7 Pystyyn asennettavien venymäantureiden asentamista rummun päällä olevassa täytössä (Kv -1,7 m).

Kuvasta 2.4:7 havaitaan selvästi tukikerroksen alapinnassa sijaitseva routaeriste. Lähimpänä tukikerroksen alapintaa olevalle instrumenttien asennustasolle (Kv -1,1 m) asennettiin kaksi venymäanturia pystytasoon ja kaksi lämpötila-anturia. Anturit pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman lähelle kiskoja eli lähes pystysuoraan kiskojen alapuolelle. Tukikerroksen alapinnasta ja tukikerroksen alapintaa lähinnä olevalta instrumenttien asennustasolta ei mitattu tiiviyksiä.

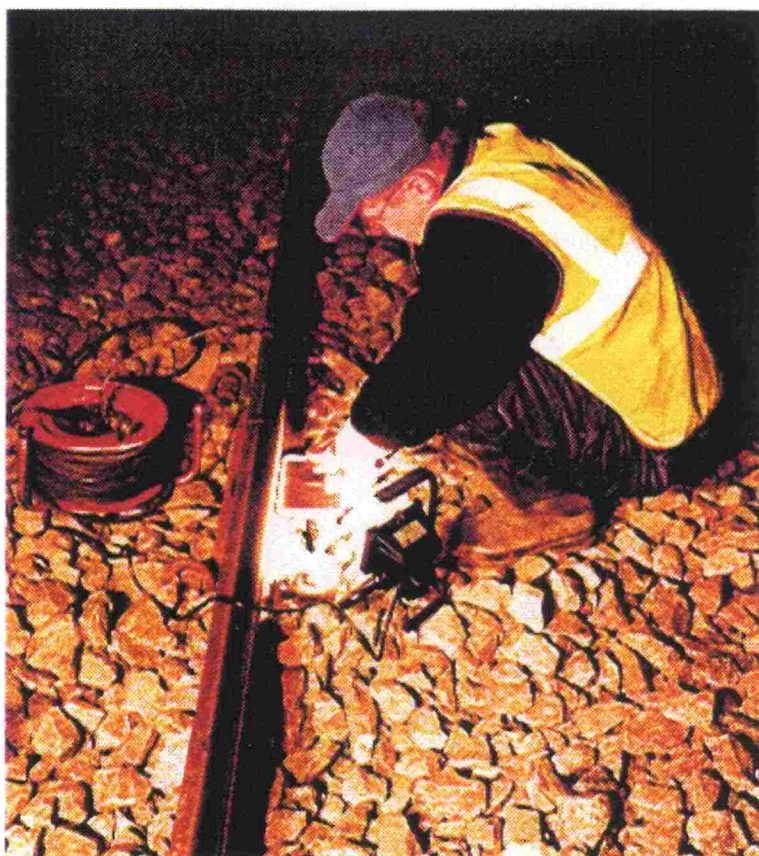
2.4.4 Raiteen instrumentointi

Läntisen raiteen instrumentointi päästiin tekemään, kun molemmat raiteet oli saatu liikennöitävään kuntoon. Ratapölkyn instrumentointi vaati yhteensä kuuden tiiviiseen pohjakerrokseen asti ulottuneen kairatangon asentamisen pölkyn ympärille. Kaksi tankoa sijoitettiin pölkyn keskikohdan molemmille puolille ja kaksi tankoa pölkyn molempien päiden lähelle. Kuvassa 2.4:8 on esitetty läntisen raiteen itäisen pölkyn pään Toijalan puoleisen kairatangon asentamista maahan. Geotesti Oy asensi kairatangot 6.–7.10.2000.



Kuva 2.4:8 Kairatankojen asentaminen ratapenkereen läpi pohjamaahan

Kiskoihin asennettiin yhteensä 16 venymäliuskaa. Näiden venymäliuskojen asennustapa selviää kappaleen 2.2 kuvista 2.2:1 ja 2.2:2. Kuvassa 2.4:9 on esitetty venymäliuskojen asentamista kiskoon.



Kuva 2.4:9 Venymäliuskojen asentaminen kiskoon meneillään.

Ratapölkkyyn asennettiin yksi venymäanturi ratapölkyn pituussuuntaan yläpinnan venymämittausta varten. Samasta pölkystä mitattiin myös siirtymiä kolmelta kohdalta eli keskeltä ja pölkyn molemmista päistä. Kuvassa 2.4:10 on esitetty ratapölkyn pystysuuntaisten siirtymien instrumentointi. Samasta kuvasta voidaan havaita myös pyöryvoiman pysty- ja vaakakomponenttien mittaamiseen tarvittu instrumentointi (vrt. kuvat 2.2:1 ja 2.2:2). Kuvissa 2.4:11 a ja b on esitetty tarkemmin pölkyn instrumentointi sen läntisen pään ja keskikohdan osalta.

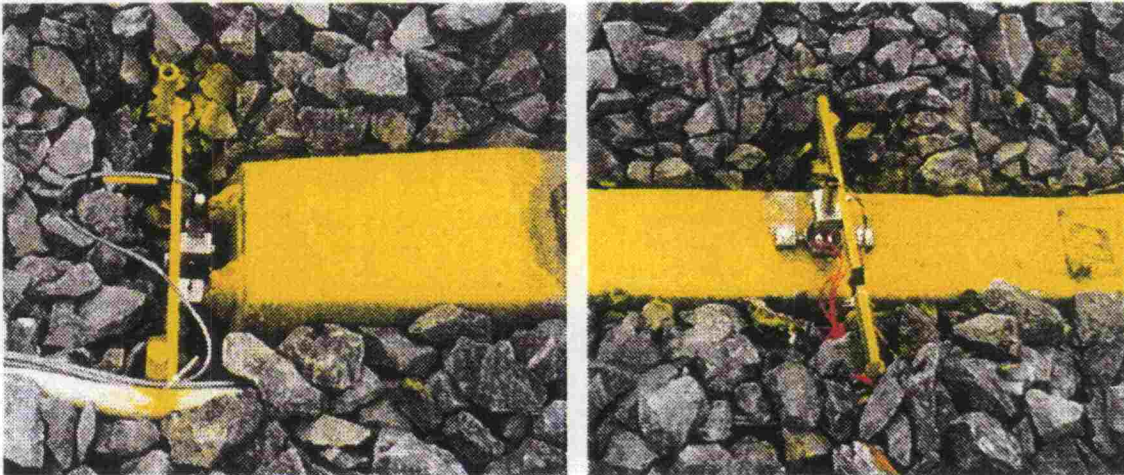


Kuva 2.4:10 ratapölkyn instrumentointi.

Kuvan 2.4:10 kiskon hamaraosassa näkyvät pystysuuntaiset valkoiset viivat liittyvät pystysuuntaisen voiman kalibrointiin.

(a)

(b)



Kuva 2.4:11 (a) Ratapölkyn läntisen pään instrumentointi ja (b) saman pölkyn keskikohdan instrumentointi.

2.4.5 Ratarummun instrumentointi

Ratarummun instrumentointi tehtiin edeltävänä päivänä ennen ensimmäistä mittaus-tapahtumaa. Rumpuun asennettiin 12 venymäanturia, jotka mittasivat siirtymiä rumpu-elementtien jatkosten yli (4 kpl), venymiä rummun pituussuunnassa (2 kpl) ja venymiä rummun kehän suunnassa (4 kpl) sekä rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutoksia (1 kpl kumpaakin). Kuvissa 2.4:12 a ja b on esitetty rummun pohjalla pituussuuntaan asennetut venymäanturikehikot.

(a)

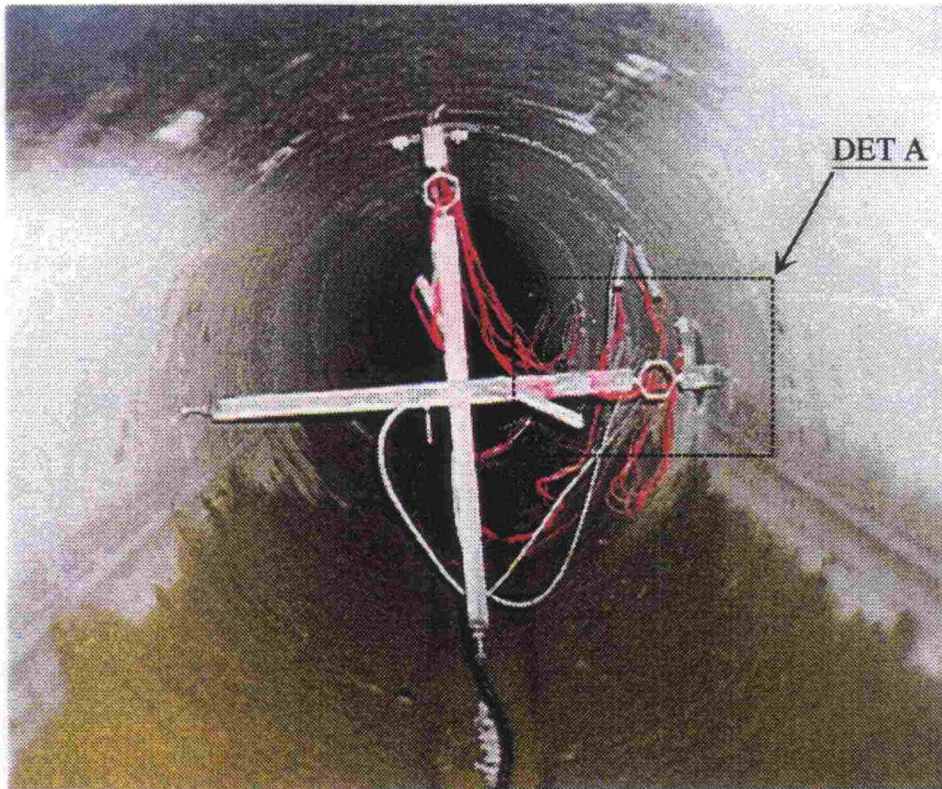
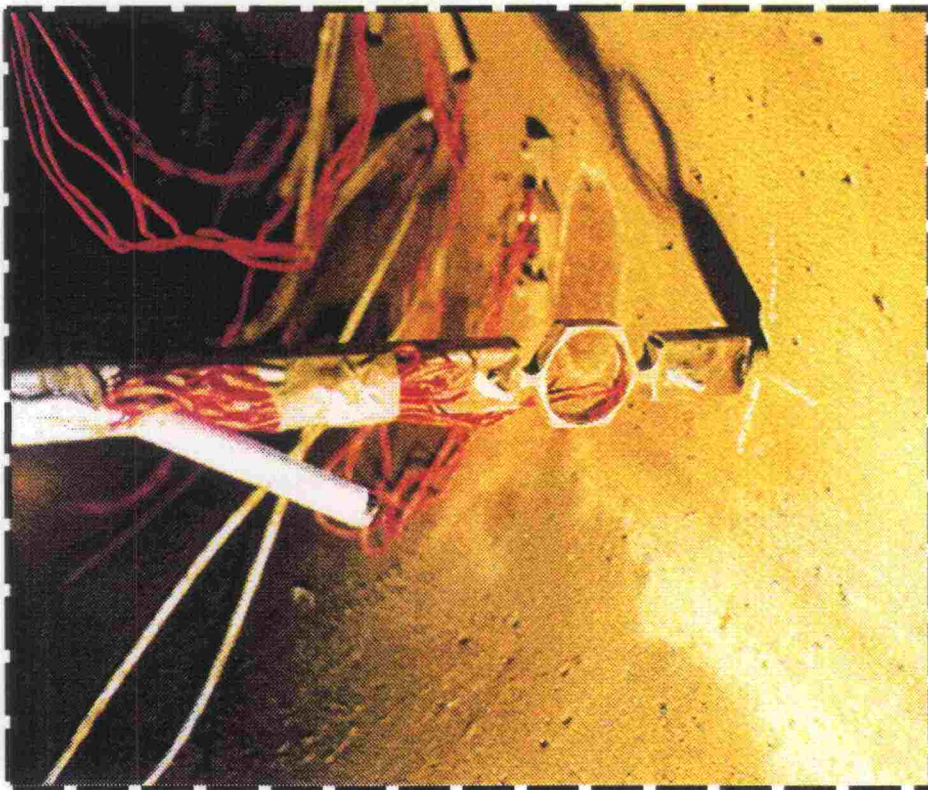
(b)



Kuva 2.4:12 Rummun pohjalle pituussuuntaan asennettu venymäkehikko (a) sauman ja (b) rumpuelementin keskikohdalla.

Kuvissa 2.4:12 a ja b näkyvät venymäanturit kiinnitettiin jäykästi ratarumpuun ruuveilla, joiden paikat porattiin ennen venymäanturien asentamista.

Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutosta mitattiin kuvan 2.4:13 mukaisella mittausjärjestelyllä (vrt. kuva 2.2:3). Kuvaan on otettu suurennos vaakahalkaisijamittauksen oikeanpuoleisesta päädyistä, missä venymäanturi sijaitsee. Kuvan 2.4:12 b oikeassa yläkulmassa ja kuvassa 2.4:13 näkyvät lämpötila-anturien suojakuoria muistuttavat muovikuoret ovat venymäanturien johtojen liitoskappaleita, joissa liitokset on valettu hartsiin kosteudelta suojaan.

DET A

Kuva 2.4:13 Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan instrumentointi sekä detalji vaakahalkaisijamittauksen oikeanpuoleisesta päästä.

2.5 Mittausinstrumenttien toteutuneet sijainnit

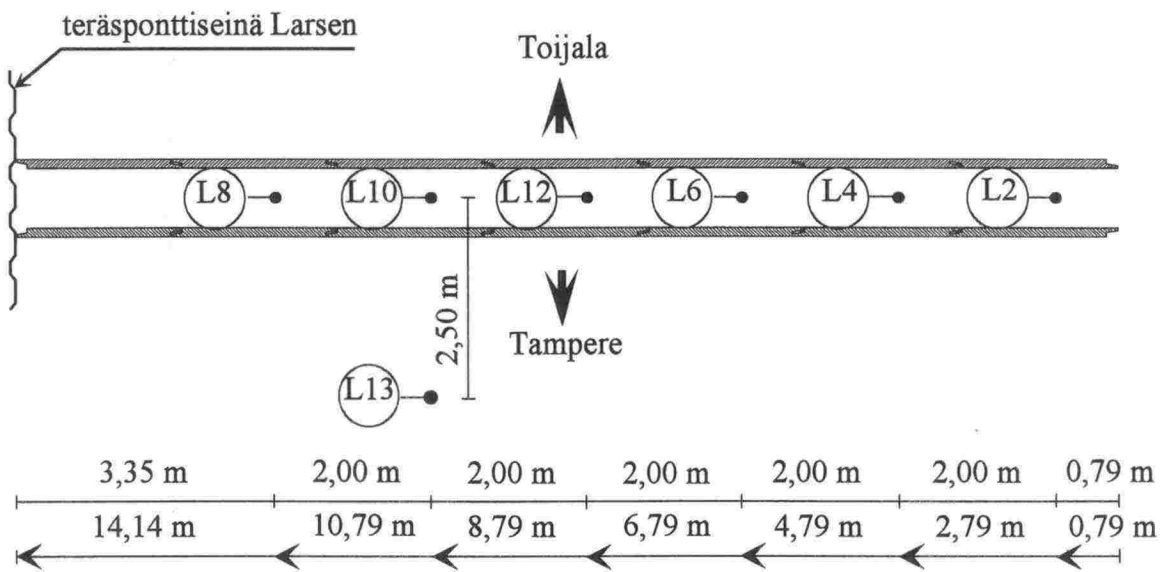
Rummun alle asennettuja lämpötila-antureita ja rummussa olevia venymäantureita lukuun ottamatta mittausinstrumenttien toteutuneet sijainnit todennettiin kaikissa tapauksissa mittanauhmittauksin raiteiden välissä olevaan ponttiseinään kiinnitetyistä kiintopisteistä, jotka oli mitattu takymetrillä kansallisen kartastokoordinaattijärjestelmän (KKJ) sidontapisteistä. Sidontapisteinä kansalliseen koordinaattijärjestelmään pidettiin rummun Tampereen ja Toijalan puoleisten ratajohtopylväiden jalustassa olevia pultteja. Kuvassa 2.1:1 näkyvät ensimmäiset ratajohtopylväät vasemmalla ja oikealla toimivat sidontapisteinä. Vastaava sidontapiste kuvassa 2.1:2 on lähin vasemman puoleinen pylväs. Geopalvelu Oy mittasi sidontapisteiden ja sidontapisteistä takymetrillä mitattujen kiintopisteiden koordinaatit. Myöhemmin tammikuussa 2001 TTKK:n geoinformatiikan laboratorion toimesta mitattiin rummun yläpuolella olevan ratapölkyn ja kiskon sekä keltaisella maalatun ratapölkyn lopullinen sijainti. Tällöin sidontapisteinä KKJ:hin pidettiin samoja ratapylväiden perustuksissa olevia pultteja kuin aiemmalla Geopalvelu Oy:n tekemällä mittauskerralla.

Rummun puolivälin tasoon sijoitetut mittausinstrumentit mitattiin muiden tasojen instrumenteista poiketen myös takymetrillä. Takymetrillä ja käsin mittanauhoilla mitattujen instrumenttien koordinaatteja verrattiin toisiinsa edellä mainitulla tasolla. Tämä mahdollistaa arvion muillakin tasoilla olevien, mittanauhalla mitattujen koordinaattien eroavaisuudesta takymetrillä saataviin koordinaatteihin.

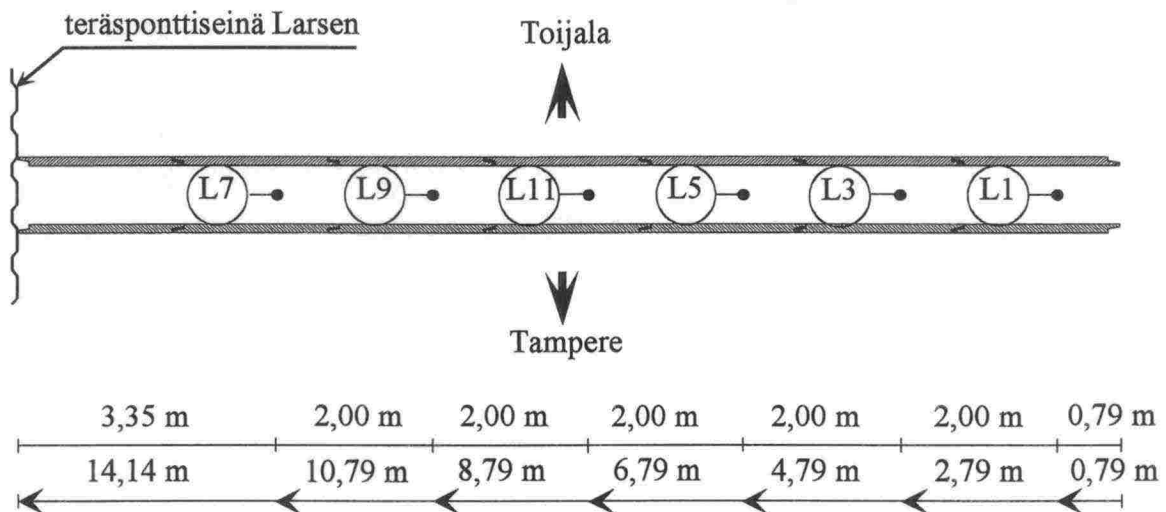
2.5.1 Pohjamaa

Yhteensä 13 lämpötila-anturia asennettiin pohjamaahan kahdelle tasolle (kuva 2.4:1). Lämpötila-anturien paikat mitattiin kuvan 2.4:1 oikean puoleisesta ponttiseinästä kohtisuorina etäisyyksinä, kun tiedettiin rummun keskikohdan sijainti kaivutasossa. Kaivutasoon asennettujen lämpötila-anturien korkeustaso oletettiin teoreettisen mukaiseksi. Kaivutason alapuolisten lämpötila-antureiden korkeustaso saatiin vastaavasti oikeaksi, kun lämpötila-anturit asennettiin asennusputkella, joka mahdollisti anturien asentamisen tarkasti puolen metrin syvyyteen. Lämpötila-antureiden sijaintia ei näin ollen ole suoranaisesti sidottu KKJ:hin, mutta niiden sijainti on mahdollista laskea, kun tiedetään vesijuoksun korkeus, rummun pituuskaltevuus ja oletetaan sora-arinan paksuus vakioksi koko rummun matkalla. Lämpötila-antureiden sijainnin virhettä globaalissa koordinaatistossa lisää kuvan 2.4:1 oikean puoleisen ponttiseinän vinous pystysuunnassa ja rummun keskikohdan todellisen sijainnin poikkeama lämpötila-antureita asennettaessa mitatusta rummun keskilinjasta. Edellä mainituista syistä pohjamaahan asennettujen lämpötila-antureiden sijaintia ei ilmaista KKJ:hin sidottuna, vaan ainoastaan lokaalissa, kuvan 2.5:1 mukaisessa koordinaatistossa, jossa selviää lämpötila-antureiden etäisyys rummun läntiseltä suuaukolta. Kuva 2.5:1 esittää ylemmän sekä alemman tason lämpötila-antureiden suhteellisen sijainnin ylhäältä päin katsottuna.

YLEMPI TASO (kaivutaso)



ALEMPI TASO (-0,5 m kaivutasosta)



● lämpötila-anturi

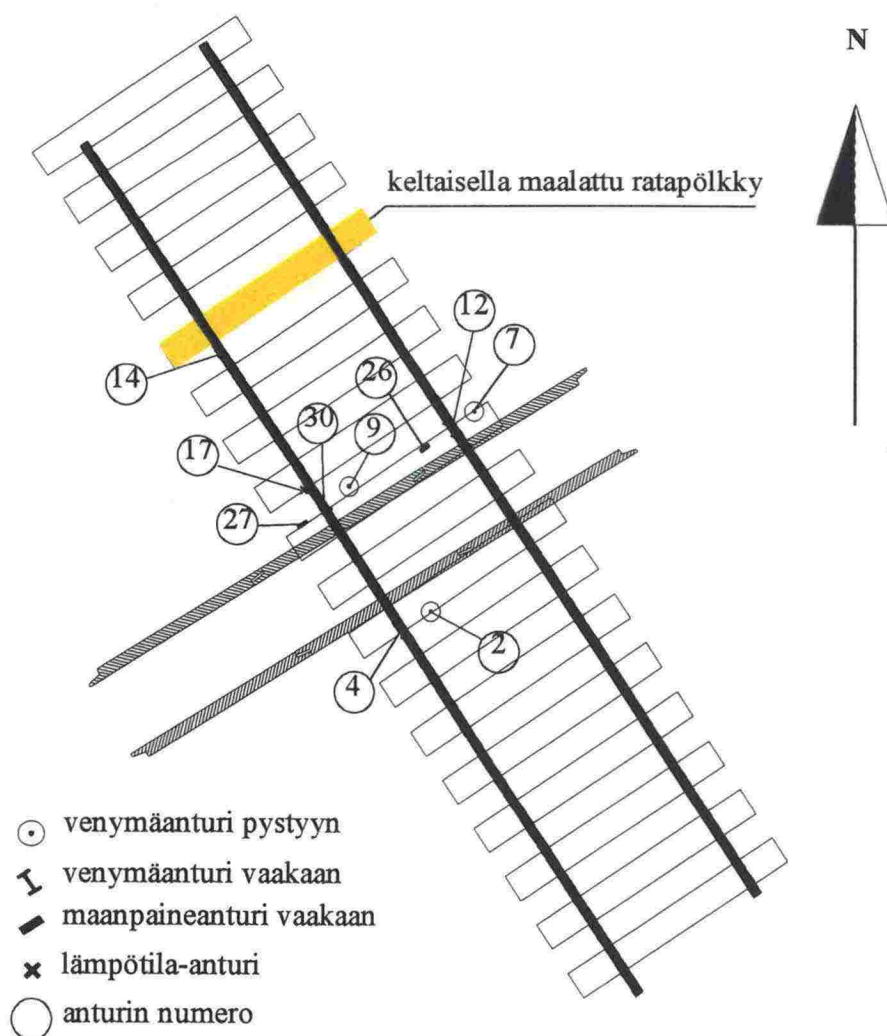
○ lämpötila-anturin numero

Kuva 2.5:1 Lämpötila-antureiden suhteellinen sijainti pohjamaassa ylemmällä ja alemmalla mittaustasolla.

Ylemmän mittaustason lämpötila-anturin nro 13 (kuva 2.5:1) paikka on mitattu myös globaaliin koordinaatistoon käyttämällä penkereeseen asennettujen instrumenttien yhteydessä sovellettua mittanauhmittausmenetelmää. KKK:n mukaiset koordinaatit lämpötila-anturille nro 13 ovat: $x = 6787787,768$ $y = 2488459,249$ $z = 84,583$

2.5.2 Penger

Penkereeseen asennettiin kuvan 2.4:2 mukaisesti kolmelle eri tasolle yhteensä 22 mittausanturia, joista venymäantureita oli 12 kappaletta, paineantureita 4 kappaletta ja lämpötila-antureita 6 kappaletta. Kuten kappaleessa 2.4 edellä jo todettiin, rummun puolivälin tasolle asennettiin yhteensä 10 mittausanturia, joista 3 venymäanturia pystyyn ja 3 vaakaan, 2 maanpaineanturia vaakaan ja 2 lämpötila-anturia. Kuvassa 2.5:2 on esitetty rummun puolivälin tasolle penkereeseen asennetut mittausanturit, raide ja itse ratarumpu.



Kuva 2.5:2 Rummun puolivälin ($K_v -2,5$ m) tasoon asennetut mittausinstrumentit

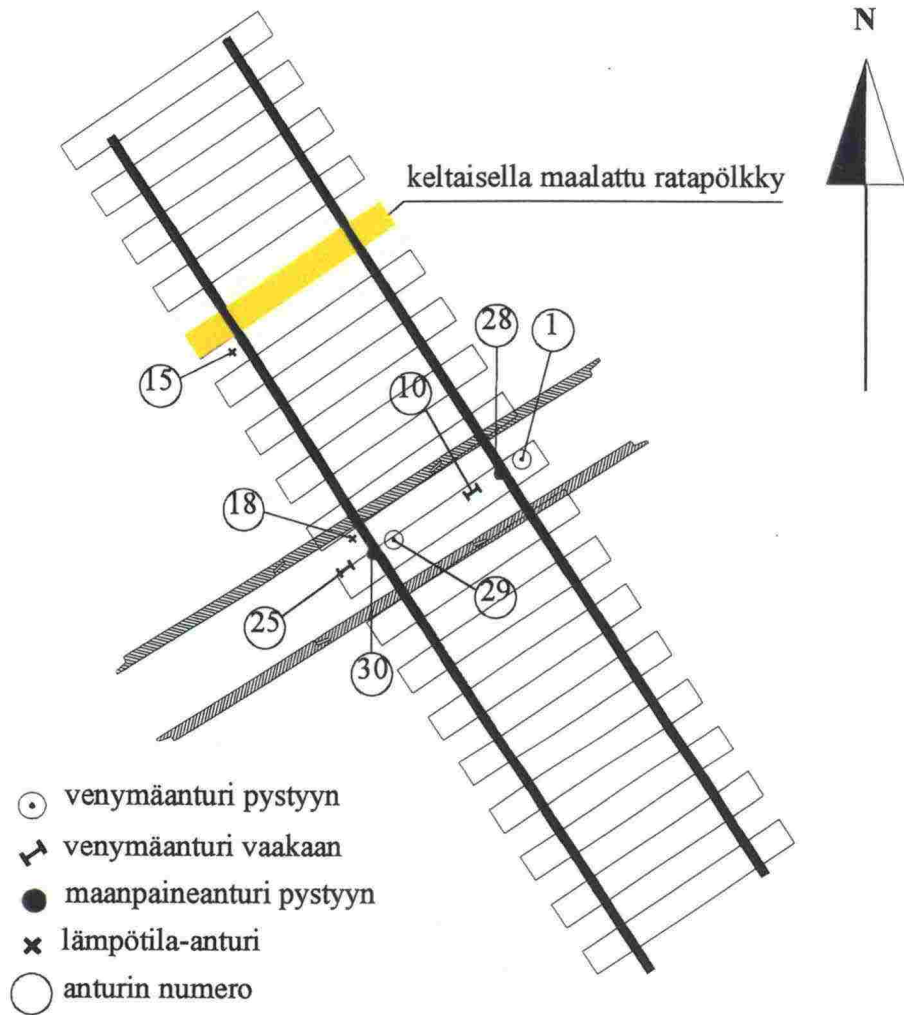
Kuvan 2.5:2 anturien sijainti KKJ:n mukaisessa koordinaatistossa on esitetty taulukossa 2.5:1. Taulukossa ilmoitetaan myös Geopalvelu Oy:n takymetrillä mitaamat tulokset ja mittanauhmittausten keskiarvon ja takymetrillä saatujen tulosten erotuksen itseisarvo. x -koordinaatteihin on lisättävä lukema 6787700 ja y -koordinaatteihin lukema 2488400. Tällöin esimerkiksi venymäanturin 7 (V 7 taulukossa 2.5:1) todellinen KKJ:n mukainen x -koordinaatti on 6787787,168 ja y -koordinaatti 2488461,907. z -koordinaatit ovat suoraan oikeassa muodossaan.

Taulukko 2.5:1 Rummun puolenvälin ($K_v -2,5$ m) tasoon sijoitettujen instrumenttien koordinaatit KKJ.

| | Anturien numerot | | | | | | | | | |
|-------------|------------------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|
| | V 7 | V 12 | MP 26 | V 9 | V 30 | MP 27 | L 17 | V 2 | V 4 | L 14 |
| x | 87,168 | 86,998 | 86,780 | 86,380 | 86,191 | 85,990 | 86,342 | 85,089 | 84,905 | 87,768 |
| x_t | 87,148 | 86,988 | 86,779 | 86,379 | 86,185 | 86,00 | 86,361 | 85,065 | 84,886 | - |
| $ x - x_t $ | 0,020 | 0,010 | 0,001 | 0,001 | 0,006 | 0,010 | 0,019 | 0,024 | 0,019 | - |
| y | 61,907 | 61,667 | 61,387 | 60,586 | 60,319 | 60,096 | 60,109 | 61,454 | 61,147 | 59,249 |
| y_t | 61,891 | 61,646 | 61,386 | 60,583 | 60,307 | 60,087 | 60,281 | 61,419 | 61,136 | - |
| $ y - y_t $ | 0,016 | 0,021 | 0,001 | 0,003 | 0,012 | 0,009 | 0,172 | 0,035 | 0,011 | - |
| z | 85,310 | 85,327 | 85,318 | 85,257 | 85,248 | 85,208 | 85,192 | 85,255 | 85,303 | 85,883 |
| z_t | 85,344 | 85,357 | 85,337 | 85,283 | 85,276 | 85,234 | 85,271 | 85,311 | 85,356 | - |
| $ z - z_t $ | 0,034 | 0,030 | 0,019 | 0,026 | 0,028 | 0,026 | 0,079 | 0,056 | 0,053 | - |

Taulukossa 2.5:1 venymäanturien lyhenteenä käytetään V-kirjainta. Vastaava lyhenne maanpaineantureille on MP ja lämpötila-antureille L. Taulukon 2.5:1 vasemmassa sarakkeessa karteesisen koordinaatistoakselin alaindeksinä käytetty t-kirjain viittaa takymetriin. Lämpötila-anturille nro 14 ei ole mitattu koordinaatteja takymetrillä. Takymetrillä ja mittanauhoilla saatujen koordinaattien ero johtuu pääasiassa mittanauhavirheistä ja mitattavien instrumenttien mittauskohtien eroavaisuudesta. Erot näyttävät olevan suurimmillaan syvyys suunnassa eli z -koordinaattien suhteen.

Rummun puolivälin tasosta seuraavalle tasolle, eli tasolle $K_v -1,7$ m asennettiin yhteensä kahdeksan anturia. Näistä kaksi venymäanturia pystyyn ja kaksi vaakaan. Maanpaineanturit, joita asennettiin kaksi, sijoitettiin pystyyn. Kaksi lämpötila-anturia sijoitettiin tälle tasolle rummun puolivälin tason tapaan. Kuvassa 2.5:3 on esitetty $K_v -1,7$ m olevalla tasolla sijaitsevat anturit.



Kuva 2.5:3 Kv -1,7 m -tasoon asennetut mittausinstrumentit.

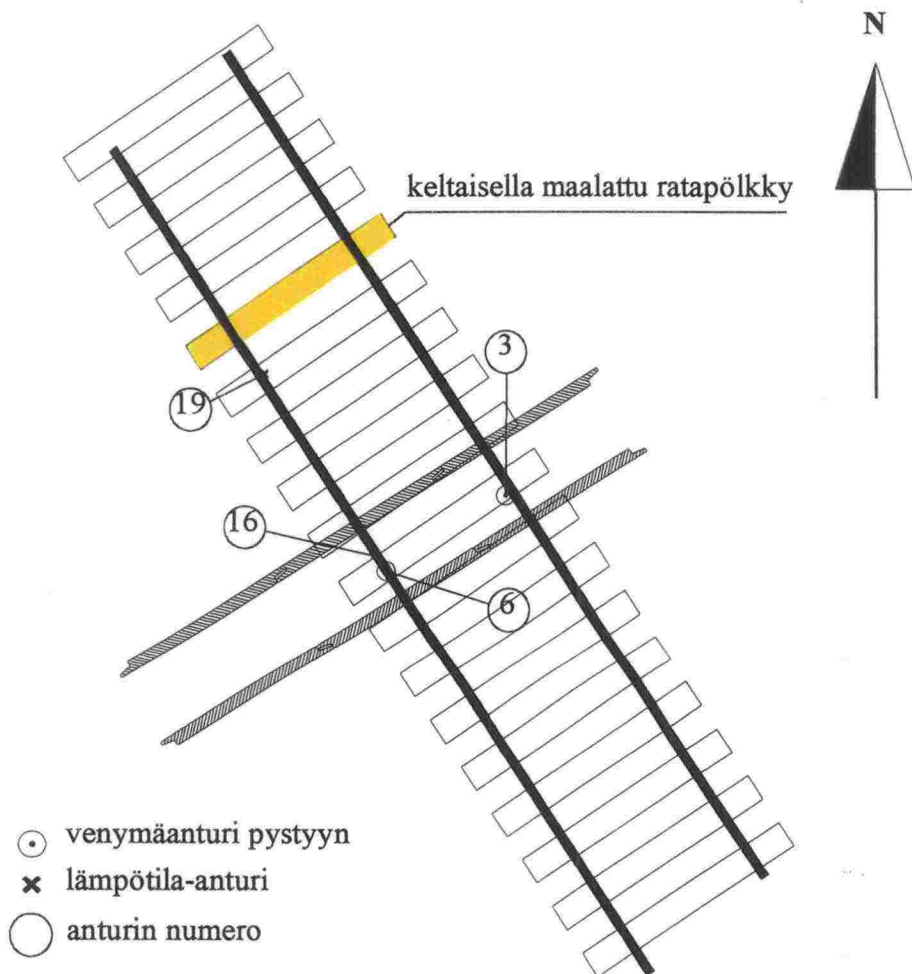
Kuvan 2.5:3 mukaiset instrumenttien sijainnit on ilmoitettu KKJ:n mukaisessa koordinaatistossa taulukossa 2.5:2.

Taulukko 2.5:2 Kv -1,7 m -tasoon sijoitettujen instrumenttien KKJ:n mukaiset koordinaatit.

| | Anturien numerot | | | | | | | |
|---|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | V 1 | V 10 | MP 28 | V 29 | V 25 | MP 30 | L 18 | L 15 |
| x | 86,564 | 86,231 | 86,417 | 85,730 | 85,427 | 85,581 | 85,744 | 87,686 |
| y | 62,252 | 61,721 | 62,013 | 60,874 | 60,351 | 60,648 | 60,429 | 59,116 |
| z | 86,076 | 86,110 | 86,081 | 86,073 | 86,162 | 86,103 | 86,133 | 86,288 |

Taulukon 2.5:2 x -koordinaattien arvoihin täytyy lisätä 6787700 ja y-koordinaatteihin 2488400. Z-koordinaatit ovat oikeassa muodossa. Kv -1,7 m olevalla tasolla sijaitsevia mittausantureita ei mitattu takymetrillä, vaan taulukossa 2.5:2 esitetyt tulokset ovat mittanauhalla saatujen tulosten keskiarvoja. Tulosten tarkkuudeksi voidaan arvioida taulukon 2.5:1 mukaisesti muutama senttimetri x -y -tasossa ja hieman enemmän syvyysuunnassa eli z-akselin suunnassa.

Ylimmäksi penkereeseen, eli Kv -1,1 m olevalle tasolle asennettiin yhteensä neljä anturia, joista kaksi oli pystysuuntaan asennettuja venymäantureita ja loput kaksi lämpötila-antureita. Kuvassa 2.5:4 on esitetty Kv -1,1 m olevalle tasolle sijoitetut mittausanturit.



Kuva 2.5:4 Kv -1,1 m -tasoon asennetut mittausinstrumentit.

Kuvan 2.5:4 mukaiset instrumenttien sijainnit ilmoitetaan KKJ:n mukaisessa koordinaatistossa taulukossa 2.5:3. Taulukon 2.5:3 x-koordinaattien arvoihin pitää lisätä

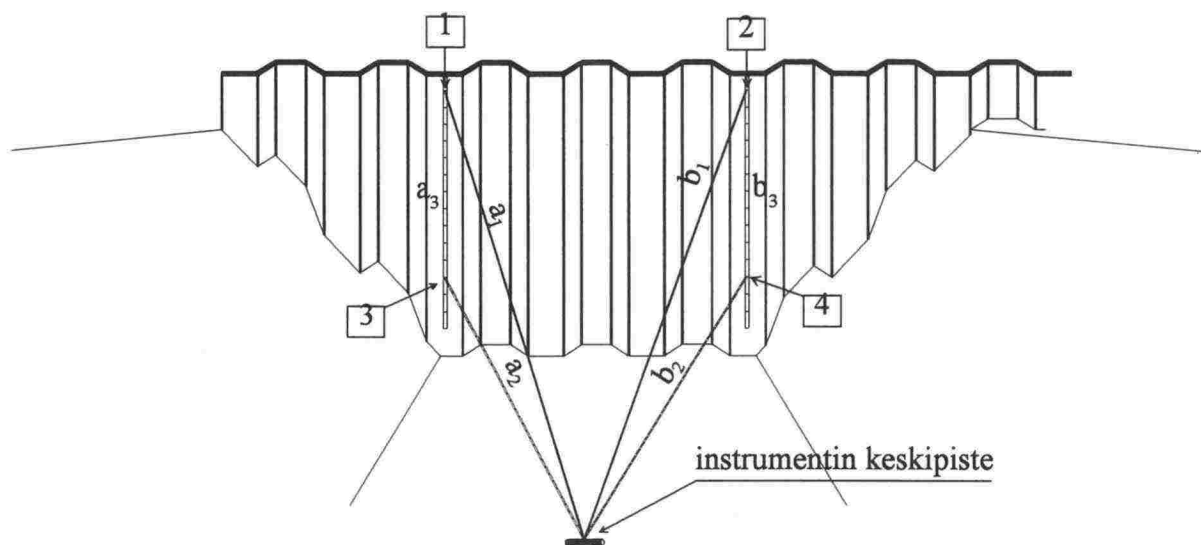
6787700 ja y-koordinaattien arvoihin 2488400. z-koordinaatit pysyvät samoina. Ilmoitetut koordinaatit ovat mittanauhmittausten keskiarvoja.

Taulukko 2.5:3 Kv -1,1 m tasolle asennettujen instrumenttien KKJ:n mukaiset koordinaatit.

| | Anturien numerot | | | |
|---|------------------|--------|--------|--------|
| | V 3 | V 6 | L 16 | L 19 |
| x | 86,264 | 85,469 | 85,638 | 87,564 |
| y | 62,067 | 60,772 | 60,648 | 59,451 |
| z | 86,666 | 86,650 | 86,667 | 86,763 |

2.5.3 Mittanauhmittauksen periaate

Kuvassa 2.5:5 esitetään mittanauhmittauksen pääperiaate, kun teräsponsittiseinäissä olevien kiintopisteiden 1, 2, 3 ja 4 koordinaatit tunnetaan KKJ:ssä.



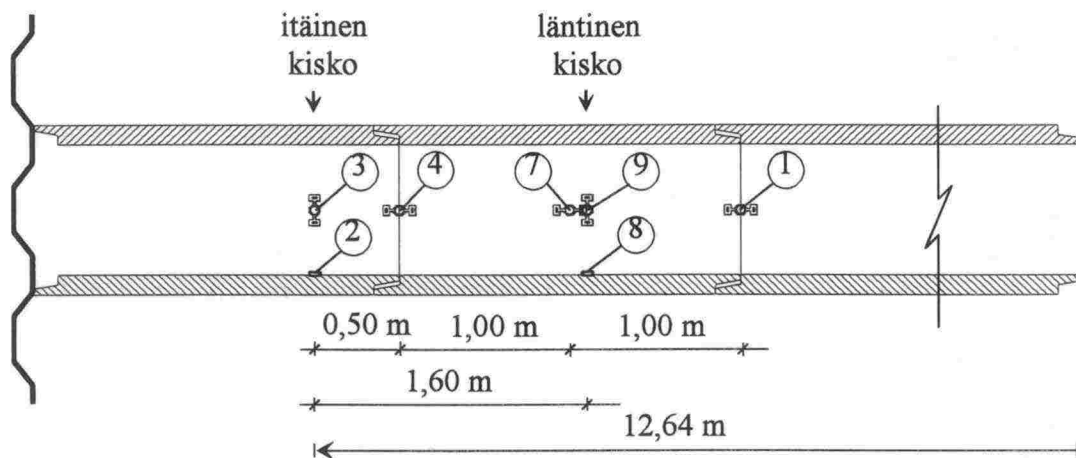
Kuva 2.5:5 Mittanauhmittauksen periaate.

Kuvassa 2.5:5 esitetyt kiintopisteet 1, 2, 3 ja 4 mitattiin KKJ:n mukaisista sidontapisteistä takymetrillä. Etäisyydet a_3 ja b_3 saatiin teräsponsittiseinäin kiinnitetyistä mittanauhoista. Etäisyydet a_3 ja b_3 vaihtelivat anturien asennustasoittain. Mittaamalla etäisyydet a_1 , a_2 , b_1 ja b_2 päästiin tilanteeseen, jossa tuntemattomina oli kolme instrumentin keskipisteen koordinaattia ja yhtälöitä oli neljä kappaletta. Koska yhtälöt ovat lineaarisesti riippumattomia, saadaan kahdeksan eri tulosta tuntemattomille instrumenttien koordinaateille. Näistä neljä tulosta toteuttivat instrumentin keskipisteen koordinaatit teräsponsittiseinän länsipuolella ja toiset neljä itäpuolella. Länsipuolella olevat arvot olivat tässä tapauksessa oikeita. Taulukoissa 2.5:1–2.5:3 on esitetty mittanauhmittausten keskiarvot instrumenteittain sponsittiseinän länsipuolelta.

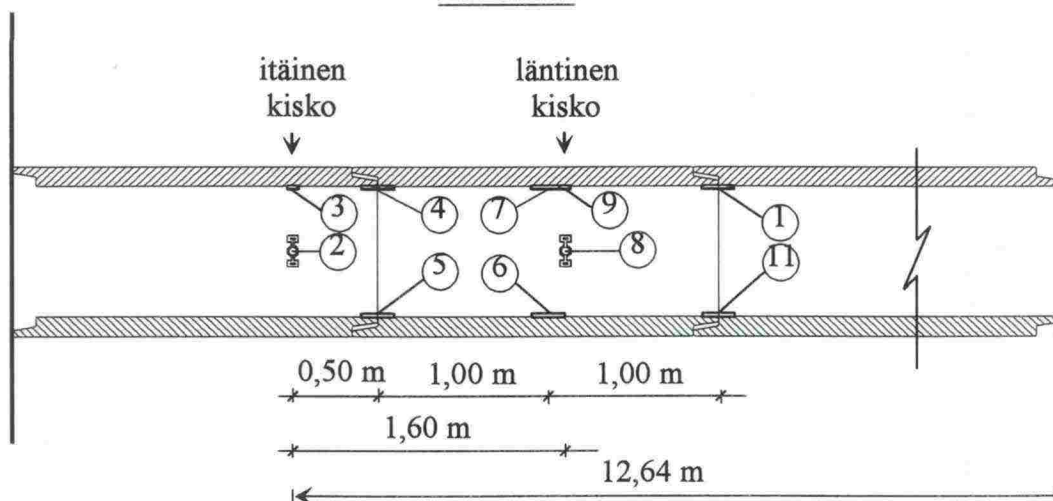
2.5.4 Ratarumpu

Ratarumpuun asennettiin yhteensä 12 venymäanturia, joiden asennuskohdiksi rummussa valittiin läntisen raiteen molempien kiskojen alapuolella olevat kohdat, saman raiteen kiskojen väliin jäänyt rumpujen saumakohta ja seuraava länteen päin oleva rumpujen saumakohta sekä molemmista saumakohdistaan instrumentoidun rummun keskikohta. Kuvassa 2.5:6 esitetään ratarummun instrumenttien sijainti päältä ja sivulta katsottuna. Venymäanturien etäisyydet mitattiin suhteessa rummun läntiseen päähän, jonka etäisyys läntisen raiteen itäisen kiskon kohdasta oli mitattu erikseen. Tämän takia etäisyydet ilmoitetaan paikallisessa koordinaatistossa etäisyytenä rummun läntiseen päähän tai etäisyytenä läntisen raiteen itäisen kiskon alapuolella olevasta kohdasta eikä KKJ:ssä. Mittaukset suoritettiin mittanauhahmittauksina. Läntisen raiteen itäisen kiskon etäisyydeksi rummun läntisestä päästä saatiin 12,64 m.

PÄÄLTÄ



SIVULTA



Kuva 2.5:6 Rummun instrumenttien sijainti paikallisessa koordinaatistossa.

Läntisen raiteen läntisen sekä itäisen kiskon alle sijoitettiin rumpuun yhteensä neljä venymäanturia, jotka mittasivat rummun kehän suuntaisia venymiä. Kiskojen välissä sijaitsevassa rumpujen saumakohdassa mitattiin rummun pohjalta ja katosta rumpujen liitoskohdan yli tapahtuvia rummun pituussuuntaisia liikkeitä kahdella venymäanturilla. Toisessa mitattavassa liitoskohdassa käytettiin edellä mainitun liitoskohdan kaltaista venymäanturikonfiguraatiota. Keskikohdastaan instrumentoidusta rummusta mitattiin rummun katosta ja pohjalta rummun pituussuuntaisia venymiä yhteensä kahdella venymäanturilla. Rummun halkaisijan muutosta mitattiin sekä pysty- että vaakasuunnassa. Näiden mittauskohdat vaihtelivat mittausten kuluessa itäisen ja läntisen kiskon alapuolella. Rummun halkaisijan mittaamiseen käytettyjen anturien sijaintia ei ole esitetty kuvassa 2.5:6.

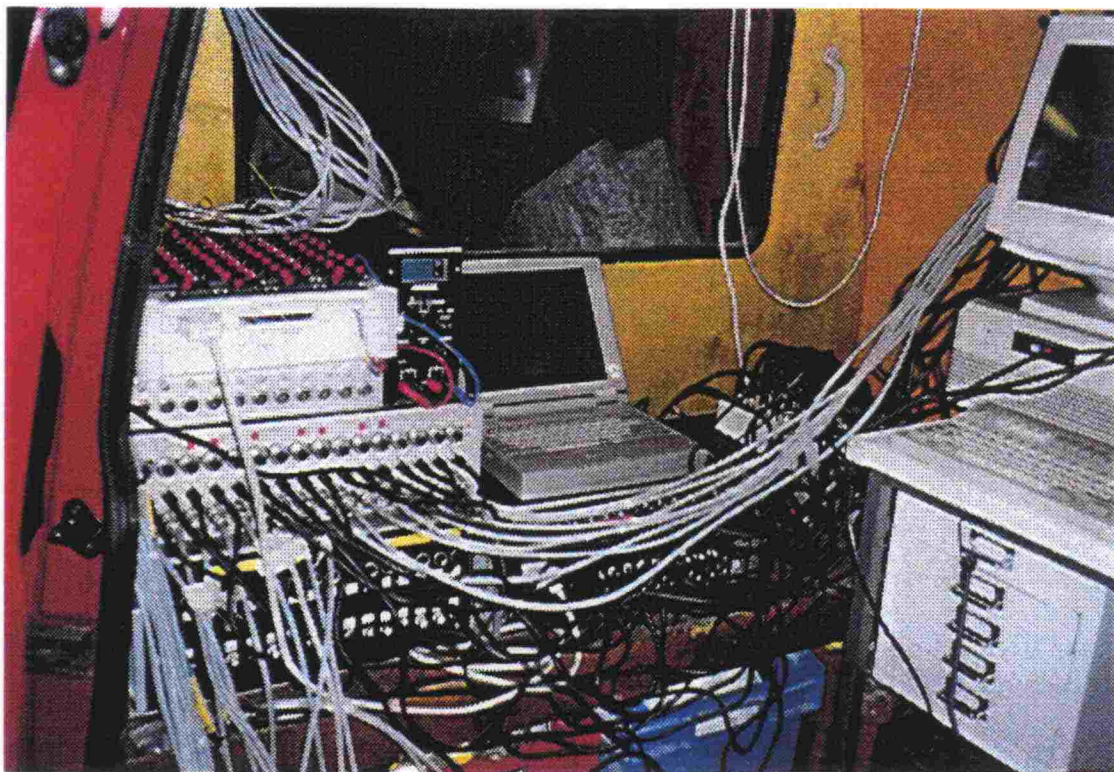
3. MITTAUKSET INSTRUMENTOINTIKOHTEELLA

3.1 Mittausten ajankohta

Toijalan ja Viialan välisellä koerumpukohteella tehtiin mittauksia kahdessa eri vaiheessa. Ensimmäinen mittausjakso oli 17.–18.10.2000 ja toinen 31.10.–1.11.2000. Molemmilla kerroilla mittaukset keskittyivät lähinnä yöaikaan. Ensimmäinen mittausjakso oli ennen raiteen tuentaa. Ensimmäisellä mittauskerralla saatiin lähes häiriötöntä mittausdataa lähinnä penkereeseen asennetuista mittausinstrumenteista. Rummun halkaisijan mittaus epäonnistui sen sijaan osittain ja muistakin rumpuun ja raiteeseen asennetuista instrumenteista saatiin jonkin verran häiriöitä sisältäviä mittaustuloksia. Tämän vuoksi kohteessa tehtiin toinen jakso mittauksia ja ensimmäistä mittausjaksoa voidaankin pitää lähinnä mittauksen toiminnan testauksena. Toisen mittausjakson aikana raide oli myös lopullisessa asemassa eli tuettuna ja muutenkin mittaukset onnistuivat kaikilla osa-alueilla odotetulla tavalla. Esimerkkejä mittaustuloksista esitetään jäljempänä kappaleessa 3.4.

3.2 Mittausjärjestelyt

Mittauksissa käytetyn tiedonkeruujärjestelmän ytimen muodostivat kaksi 16-kanavaisella Computerscope A/D -muunninkortilla varustettua mikrotietokonetta. Yhden kanavan mittauksessa kummankin muuntimen maksiminäytteenottotaajuus on 1MHz, mutta nyt mittaukset tehtiin 1 kHz taajuudella kustakin mittauskanavasta. Esimerkiksi 108 km/h nopeudella liikkuvan junan etenemä kahden peräkkäisen mittauksen välillä oli siis täten 30 mm. Koska muunninkortin erottelukyky on 12 bittiä, pölkyn siirtymämittaukset voitiin kytkeä tiedonkeruulaitteistoon suoraan, mutta penkereen sisällä olevilta venymä- ja maanpaineantureilta sekä rumpuun ja rata-pölkkyyn asennetuilta venymäantureilta tulevat mittaussignaalit oli vahvistettava ennen digitaaliseen muotoon muuntamista (kuva 3.2:1).



Kuva 3.2:1 Tiedonkeruujärjestelmä TTKK:n pohja- ja maarakenteiden laboratorion autossa.

Kuvassa 3.2:1 vasemmalla ylhäältäpäin lueteltuna näkyvät kaksi kytkentälaatikkoa, näiden alla vahvistin ja alimmaisena kolmas kytkentälaatikko. Vahvistimen päällä oikeassa reunassa oleva pieni musta laatikko on kytkentälaatikon virtalähde. Oikeassa reunassa kuvaa näkyy toinen tiedonkeruujärjestelmän tietokoneista. Keskellä näkyvää kannettavaa tietokonetta käytettiin tiedonkeruujärjestelmästä saatujen mittaussignaalien muuttamiseen mitattavien suureitten mittayksiköiksi. Kannettavan tietokoneen alla näkyvää mustaa laatikkoa käytettiin puolestaan maan venymäantureilta tulevien signaalien vahvistamiseen.

Junan lähestyessä kumpikin mittaustietokone pyrittiin aktivoimaan mahdollisimman samanaikaisesti, mutta koska tämä tapahtui manuaalisesti, mittausten synkronointi varmistettiin rekisteröimällä ulkokiskon pystyvoimasignaali molemmilla laitteistoilla. Pystyvoimasignaali valittiin tähän tarkoitukseen siitä syystä, että siinä näkyvät huippukohtat ovat erittäin selkeät ja määritettävissä yksikäsitteisesti (kuva 3.4:1).

Koska käytössä olleiden mittauskanavien lukumäärä oli hieman pienempi kuin asennettujen mittausanturien kokonaismäärä, aktiivisena olevia mittauskanavia vaihdeltiin mittausjakson aikana taulukon 3.2:1 mukaisesti. Näin varmistuttiin siitä, että kaikilta antureilta saatiin tallennettua edustava otos mittaussignaaleita erityyppisten junien kulkiessa mittauskohteen yli.

| | |
|------|---|
| PSS | = pölkyn itäisen pään siirtymä |
| PKV | = pölkyn keskikohdan pituussuuntainen venymä |
| RV x | = rummussa sijaitseva venymäanturi (x saa arvoja 1 ... 11, huom! ei 10) |
| RH x | = rummun halkaisijan mittaus (x saa arvot 12 ja 13) |
| MP x | = maanpaineanturi (x saa arvoja 26, 27, 28 ja 30) |
| V x | = penkereeseen sijoitettu maan venymäanturi |

Tarkemmat tiedot anturien sijainnista ja asennoista on esitetty kappaleessa 2.4.

Taulukon 3.2:1 mittausantureista voidaan todeta, että kaikilla maassa olevilla venymä- ja maanpaineantureilla mitattiin lähes jokainen junan ylitys. Ainoastaan pengertäytteessä Kv -1,7 m tasolla sijaitseva vaakasuuntainen venymäanturi nro 25 (V 25 taulukossa 3.3:1) oli ajautunut tiivistämisestä tai penkereessä liikenteen alaisena tapahtuneista muodonmuutoksista johtuen mittausalueensa ulkopuolelle. Pyörävoiman pysty- ja vaakasuuntaista komponenttia rekisteröitiin kiskoihin asennetuilla venymäliuskoilla myös koko ajan samoin kuin pölkyn liikkeitä mittaavia siirtymäantureitakin. Muutokset mitattavien instrumenttien kytkennöissä tehtiin rummun venymäanturien sekä pölkyn yläpintaa mittaavan venymäanturin (PKV taulukossa 3.2:1) välillä. Mittauksen numero 52 kohdalla pölkyn yläpinnan venymäanturin signaali kytkettiin tietokoneeseen maan venymäanturin nro 25 kanavaan. Rummun halkaisijan muutosta mitattiin antureilla RH 12 ja RH 13. Mittausten 41–50 aikana anturit olivat rummussa sisäkiskon kohdalla ja mittausten 51–79 aikana ulkokiskon kohdalla.

3.3 Mitattu junaliikenne

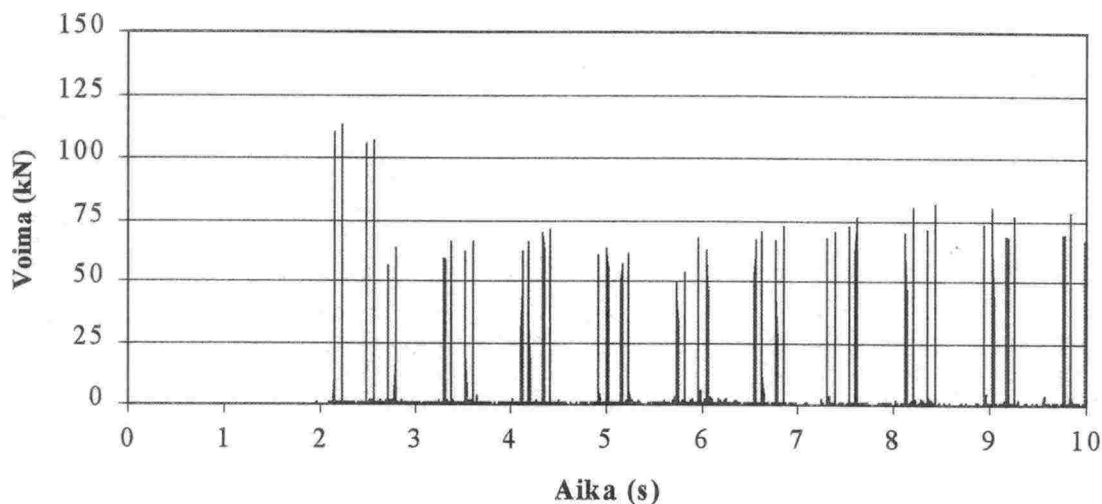
Molempien mittauskertojen yhteenlaskettu mitattujen junien lukumäärä oli 79 kpl. Tästä yhteenlasketusta mittauskertojen lukumäärästä mitattiin 34 kpl ensimmäisen mittausjakson aikana eli 17.–18.10.2000 ja loput 45 kpl toisen mittausjakson aikana eli 31.10.–1.11.2000. Liitteessä 1 esitetään erittely molemmilta mittausjaksoilta mittauksittain eli mittauksen numero, päivämäärä, kellonaika, junan kulkusuunta, junan tyyppi ja veturin tyyppi sekä veturien lukumäärä. Huomioitavaa sarakkeeseen on merkitty mm. tietoa mittausinstrumenttien kytkentöjen muutoksista. Liitteessä 1 esiintyvät puutteelliset tiedot vetureista johtuvat mm. mittausajankohdan heikosta näkyvyydestä (yö + sumu).

3.4 Esimerkkejä mittauksista

Tässä kappaleessa esitetään esimerkkejä mittaussignaaleista ajan funktiona eri mittausantureilta. Esimerkkisignaali on saatu mittauksesta numero 53 eli tavarajunasta, joka ylitti instrumentointikohteen 1.11.2000 klo 0.35 (liite 1).

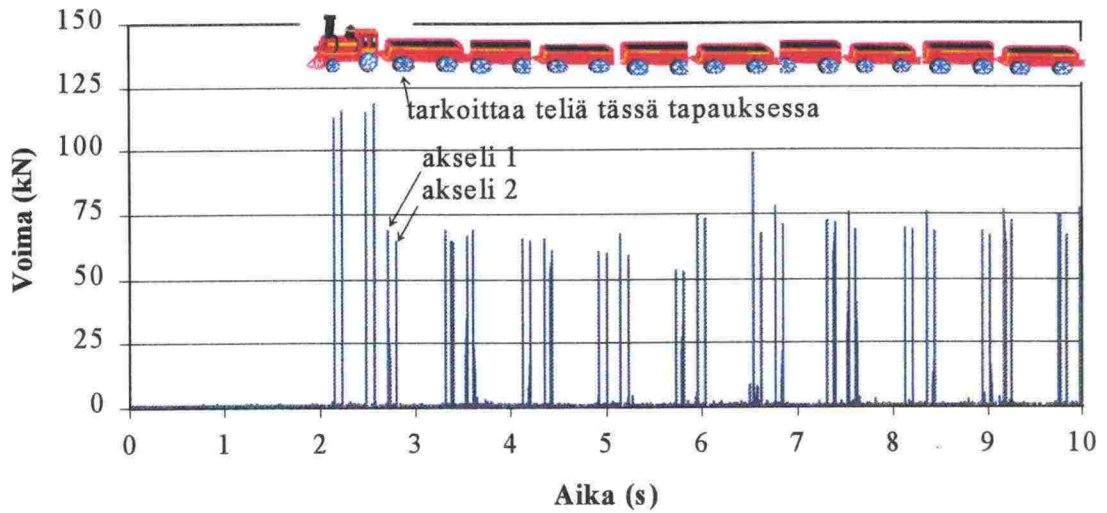
3.4.1 Kiskot

Kiskojen osalta tärkeimmät mitattavat suureet olivat pyörävoimien aiheuttamat pystysuuntaiset kuormitukset jokaiselta akselilta. Kuvassa 3.4:1 on esitetty läntiseen eli ulkokiskoon kohdistunut pystyvoima ajan funktiona mittausjakson 10 ensimmäisen sekunnin ajalta.



Kuva 3.4:1 Ulkokiskon pystyvoima ajan funktiona.

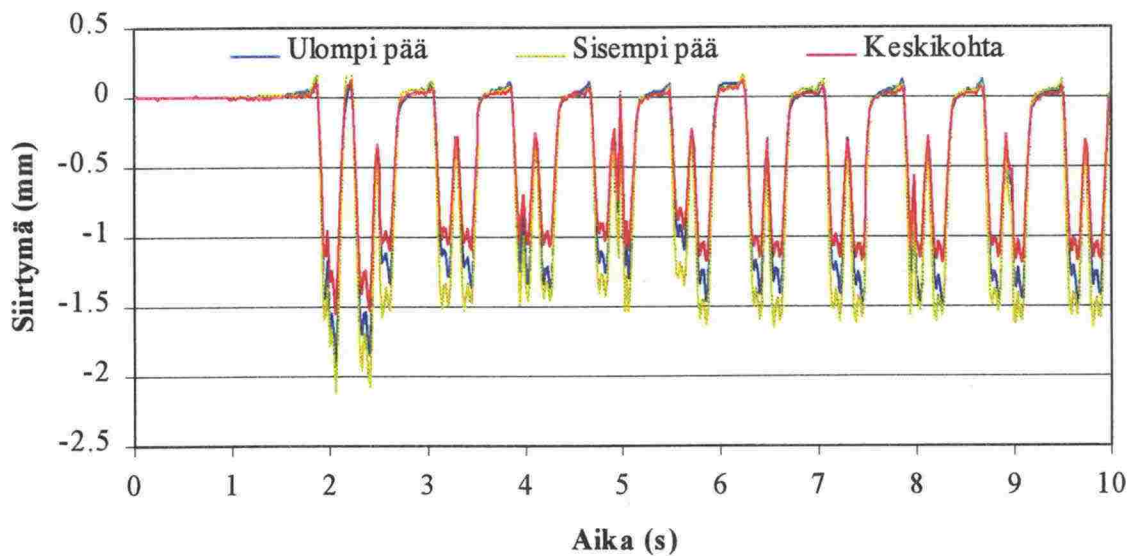
Kuvasta 3.4:1 voidaan havaita yksittäisten pyörien aiheuttamat pystysuuntaiset voimat piikkeinä. Esimerkiksi vasemmalta ensimmäisenä näkyvät kaksi rinnakkaista piikkiä ovat veturin ensimmäisen telin aiheuttamat piikit. Näistä ensimmäinen on ensimmäisen akselin ulkokiskoon aiheuttama pystysuuntainen kuormitus, jonka suuruus on noin 110 kN. Ensimmäisen akselin sisäkiskoon aiheuttama pystysuuntainen kuormitus näkyy vastaavasti kuvassa 3.4:2 ensimmäisenä piikkinä. Kuvista 3.4:1 ja 3.4:2 voidaan havaita, että 10 s mittausjaksoon on mahtunut veturin lisäksi 9 vaunua. Tämä on piirretty skemaattisesti kuvaan 3.4:2 havainnollisuuden lisäämiseksi, jolloin yksi leikkijunan akseli vastaa todellisuudessa yhtä teliä. Kuvissa 3.4:1 ja 3.4:2 havaitaan akseleitten välillä 'voimakohinaa', joka aiheutuu osittain kiskojen taipumisesta akseleitten välillä ja osittain myös mittauslaitteistosta. Kuvassa 3.4:2 voidaan havaita myös viidennen vaunun toisen telin ensimmäisessä akselissa todennäköisesti ollut lovipyörä (aika noin 6,6 s).



Kuva 3.4:2 Sisäkiskon pystyvoima ajan funktiona.

3.4.2 Ratapölkky

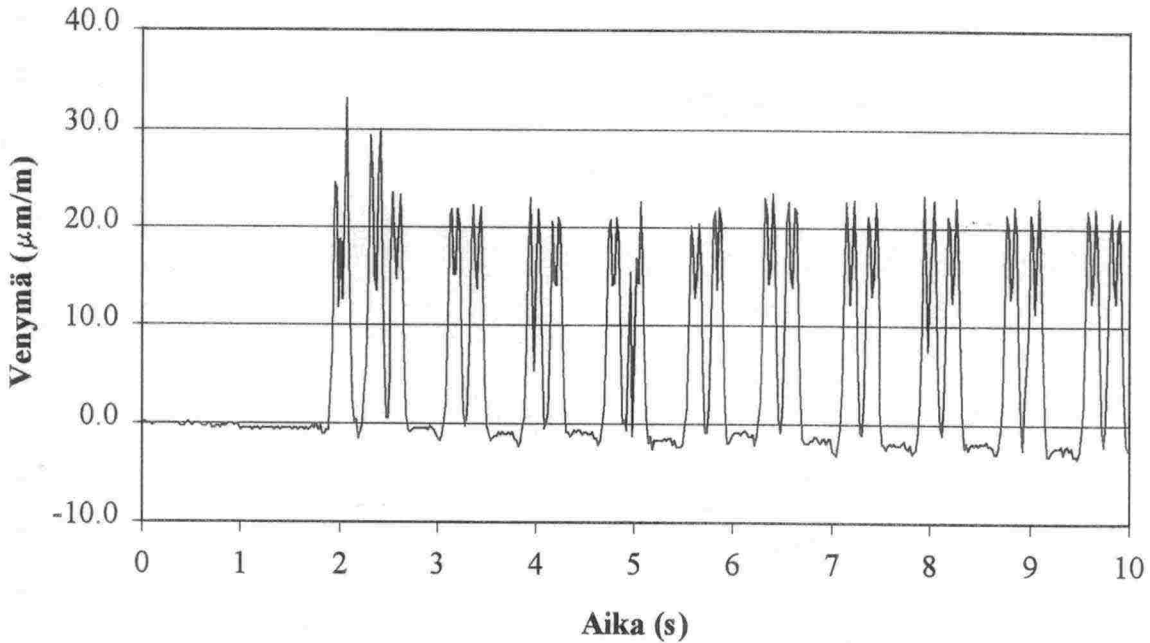
Ratapölkyn pystysiirtymä pölkyn päiden ja keskikohtan kohdilta on esitetty kuvassa 3.4:3.



Kuva 3.4:3 Pölkyn pystysiirtymä ajan funktiona.

Kuvasta 3.4:3 nähdään myös, että pölkyn pystysuuntainen liike ehtii palautua telien välillä, mutta ei juurikaan yksittäisten akselien välillä.

Ratapölkystä mitattiin myös yläpinnan venymää, joka on esitetty kuvassa 3.4:4. Koska pölkyn päät painuvat enemmän kuin sen keskikohta, keskikohtan yläpinnalle muodostuu vetojäännityksiä.

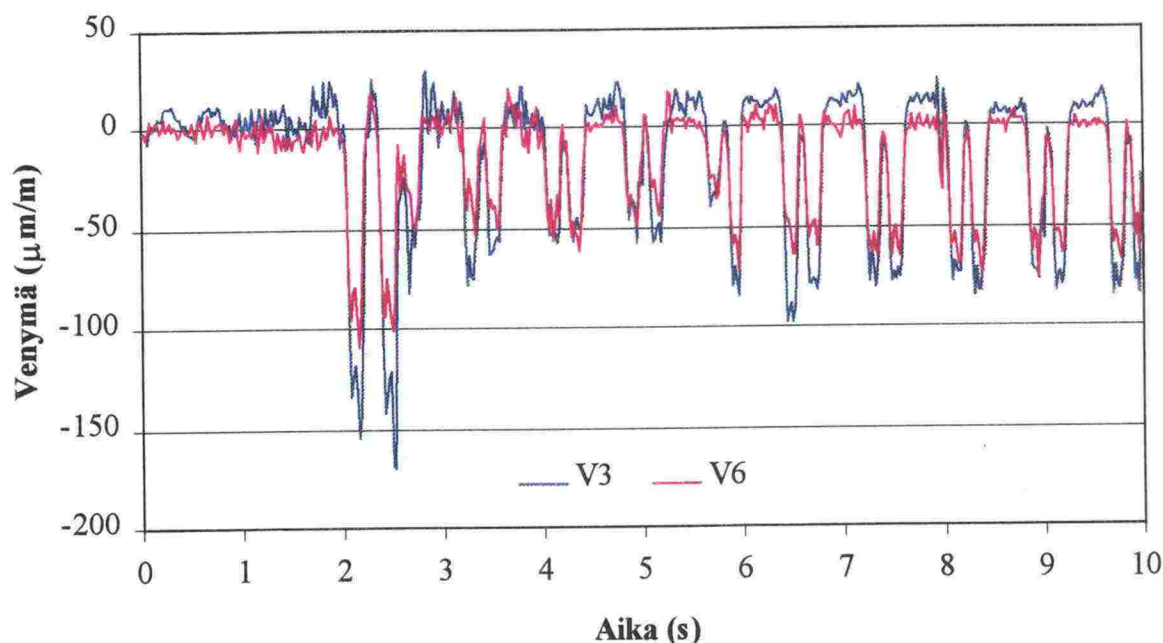


Kuva 3.4:4 Pölkyn yläpinnan venymä ajan funktiona.

Pölkyn yläpinnan venymäpiikeistä (kuva 3.4:4) voidaan havaita myös yksittäisten akselien vaikutukset, mutta ei läheskään yhtä selvästi kuin pyörän pystyvoiman tapauksessa (kuvat 3.4:1 ja 3.4:2).

3.4.3 Tukikerroksen alapinta -0,5 m -taso (Kv -1,1 m)

Penkereeseen asennettujen instrumenttien ylimmältä (Kv -1,1 m) asennustasolta antureilla V3 ja V6 mitatut pystysuuntaiset venymät ajan funktiona on esitetty kuvassa 3.4:5.

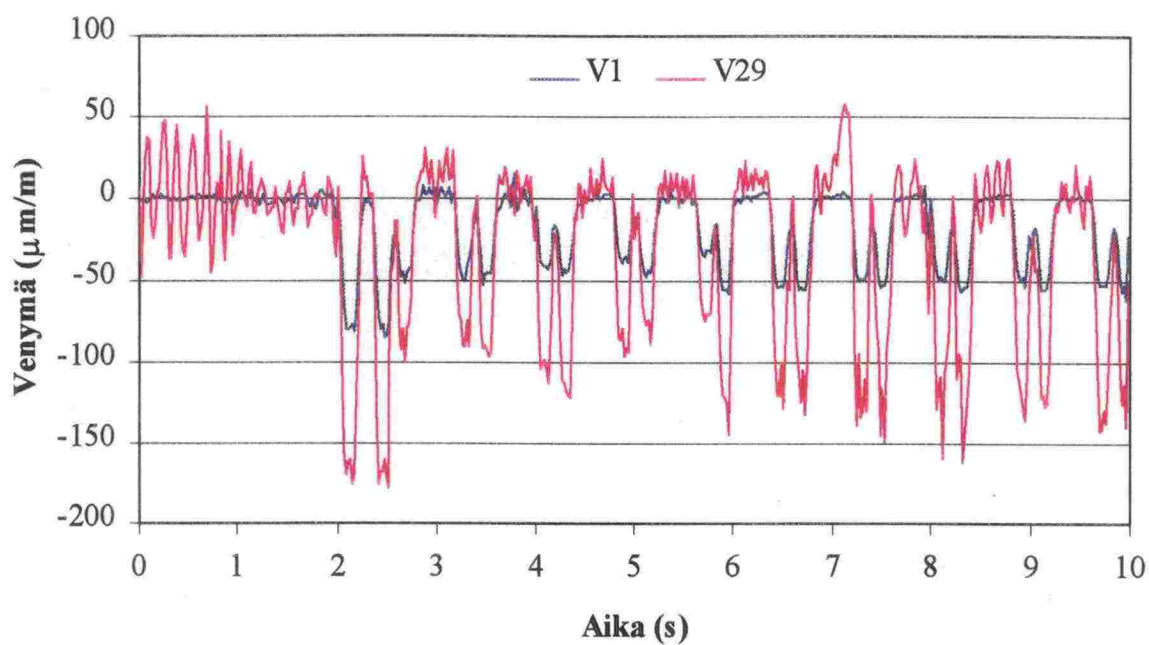


Kuva 3.4:5 Pystysuuntainen venymä ajan funktiona tasolla $K_v -1,1 \text{ m}$.

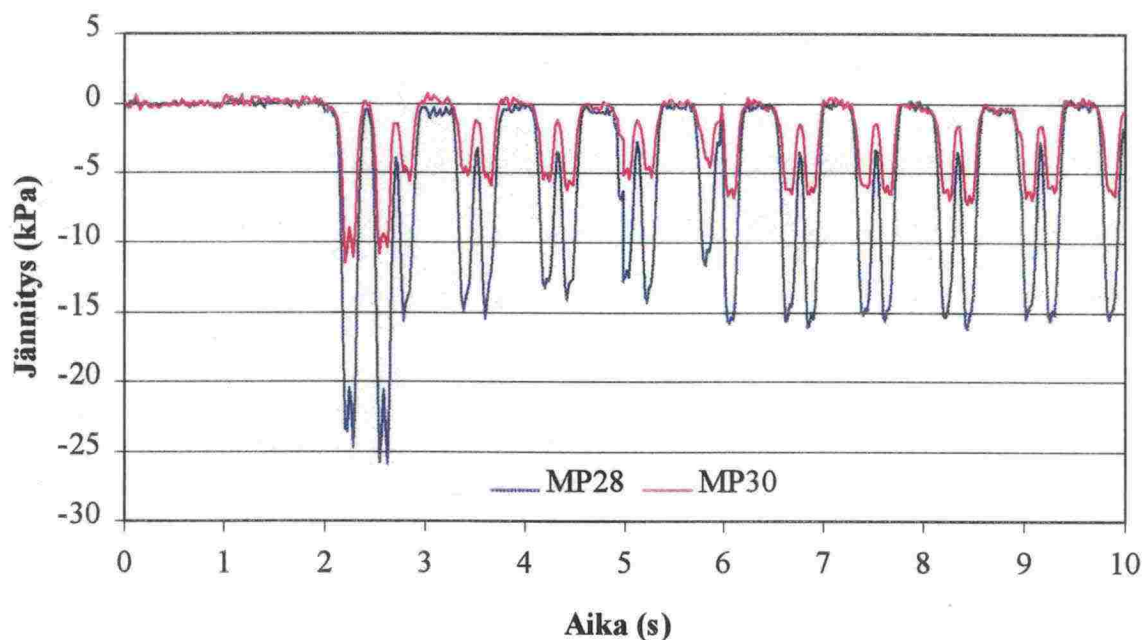
Kuvan 3.4:5 molemmat venymäanturit sijaitsevat pölkyn alla (kuva 2.5:4). Vaikka anturi V6 sijaitsee suoraan kiskon alla, anturista V3 on kuitenkin saatu suuremmat venymäsignaalit. Tämä selittynee penkereen epätasaisella tiiviydellä ja maa-aineksen epähomogeenisuudella.

3.4.4 Rummun yläpinta +0,4 m -taso ($K_v -1,7 \text{ m}$)

Penkereen keskimmaiselta ($K_v -1,7 \text{ m}$) tasolta pystysuuntaisilla maanpaineantureilla MP28 ja MP30 mitatut jännitykset ajan funktiona on esitetty kuvassa 3.4:6. Kuvassa 3.4:7 on esitetty samalta tasolta maan pystysuuntaisilla venymäantureilla V1 ja V29 saadut tulokset. Viimeisessä tältä tasolta tehtyihin mittauksiin liittyvässä kuvassa on esitetty vaakasuuntaisella venymäanturilla V10 saadut tulokset (kuva 3.4:8).

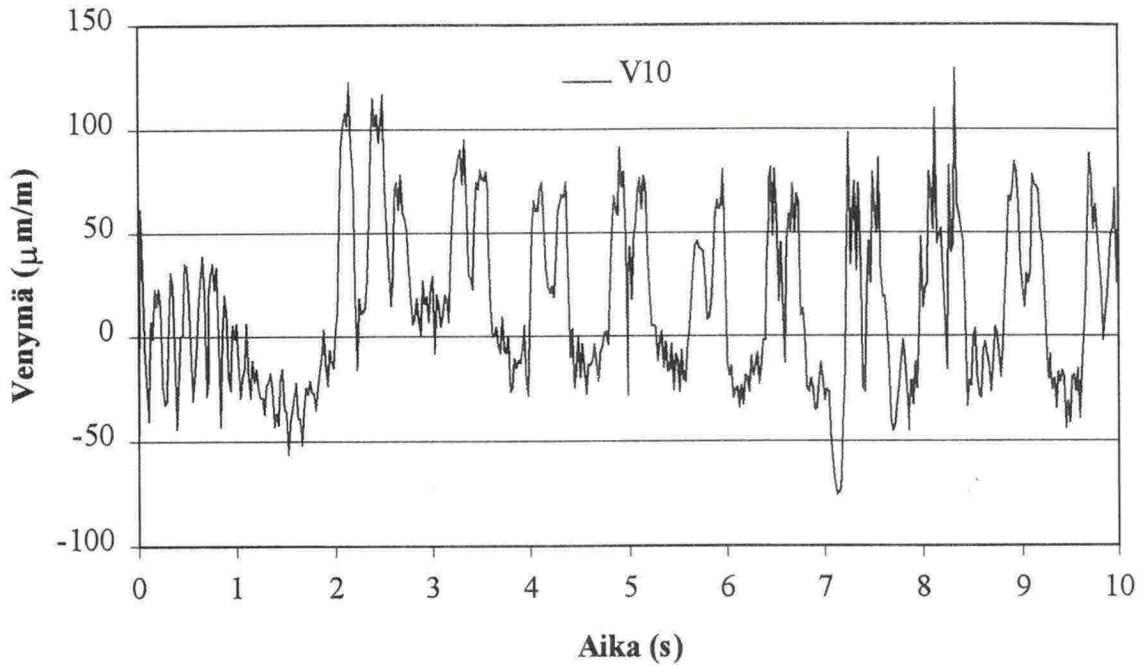


Kuva 3.4:6 Pystysuuntainen maanpaine ajan funktiona tasolla Kv -1,7 m.



Kuva 3.4:7 Pystysuuntainen venymä ajan funktiona tasolla Kv -1,7 m.

Kuvan 3.4:6 maanpaineanturien ja kuvan 3.4:7 venymäanturien antamien tulosten keskinäiset erilaisuudet selittynevät jälleen maan epähomogeenisuudella.

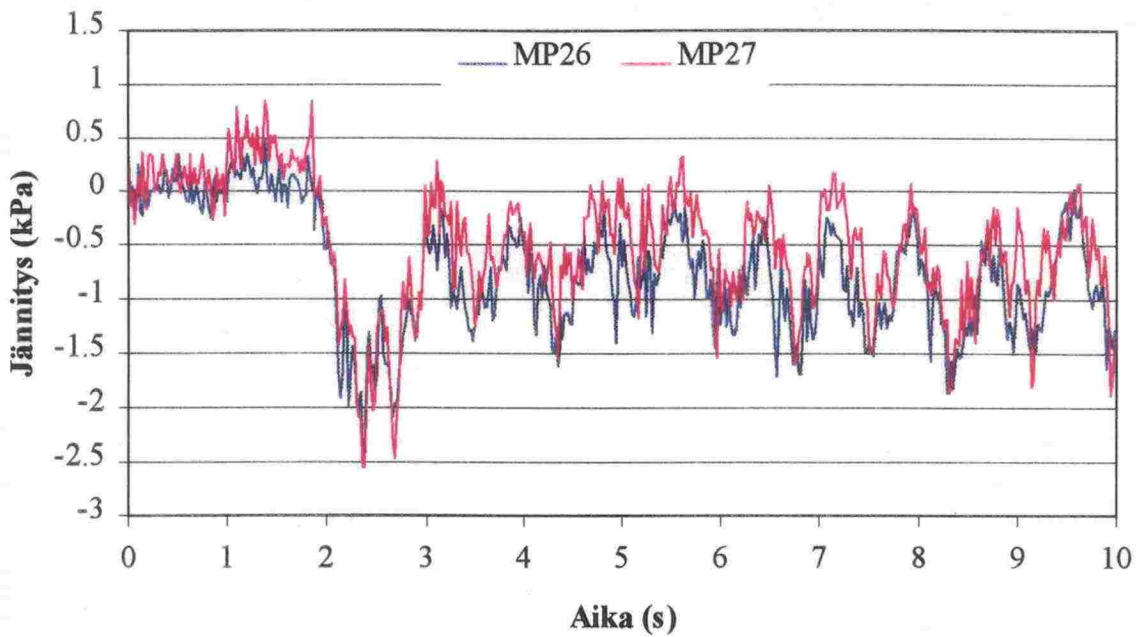


Kuva 3.4:8 Vaakasuuntainen venymä ajan funktiona tasolla $K_v -1,7$ m.

Kuvasta 3.4:8 nähdään maahan syntyvät sivuttaissuuntaiset positiiviset venymät eli maan joutuminen vetojännitysten alaiseksi sivuttaissuunnassa. Anturin V10 rinnakkaisanturi V25 (kuva 2.5:3) oli mittausajankohtaan mennessä vastaavasti kulkeutunut vetojännityksistä johtuen mittausalueensa ulkopuolelle. Sama ilmiö havaittiin kesällä 1999 Koriolla tehdyissä mittauksissa, jotka on esitetty RHK:n julkaisussa A5/2000: ”Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN ja 300 kN akselipainot”.

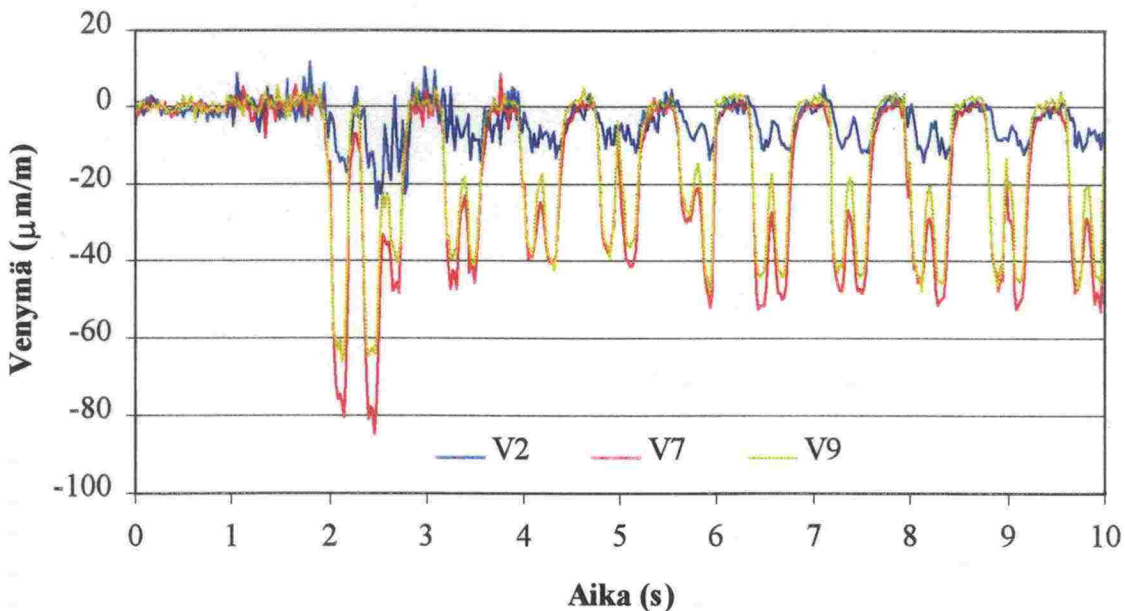
3.4.5 Rummun puolivälin taso ($K_v -2,5$ m)

Esimerkki rummun puolivälin tasolle vaakasuuntaan rummun pituussuuntaa vastaan kohtisuoraan sijoitettujen maanpaineanturien MP26 ja MP27 antamista mittaus-signaaleista on kuvassa 3.4:9. Kuvassa 3.4:10 on esitetty pystysuuntaan asennettujen venymäanturien antamia tuloksia ja kuvassa 3.4:11 vastaavasti vaakasuuntaan asennettujen venymäanturien antamia tuloksia. Vaakasuuntaiset venymäanturit on sijoitettu kiskojen suuntaisesti ratarumpua vastaan kohtisuoraan (kuva 2.5:2) kuten maanpaineanturitkin (kuva 3.4:9).



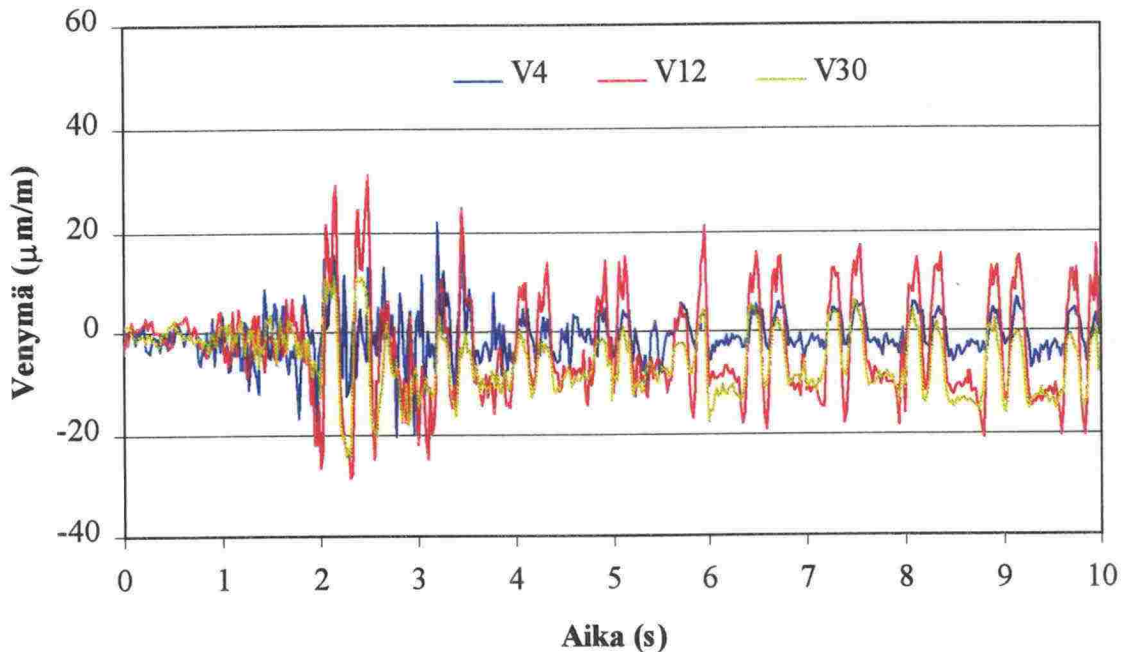
Kuva 3.4:9 Vaakasuuntainen maanpaine ajan funktiona tasolla Kv 2,5 m.

Kuvasta 3.4:9 selviää hyvin, kuinka junakuorma pyrkii painamaan rumpua sivusta päin eli aiheuttamaan puristusjännityksiä rummun sivuilla olevassa maassa. Maahan näyttäisi myös syntyvän lieviä vetojännityksiä hieman ennen veturin ensimmäisen akselin ylitystä. Tämä on nähtävissä ajanjakson 1–2 s aikana. Sama ilmiö toistuu hieman viimeisen akselin jälkeen. Tätä ei kuitenkaan ole mahdollista havaita kuvasta 3.4:9.



Kuva 3.4:10 Maan pystysuuntainen venymä ajan funktiona tasolla Kv -2,5 m.

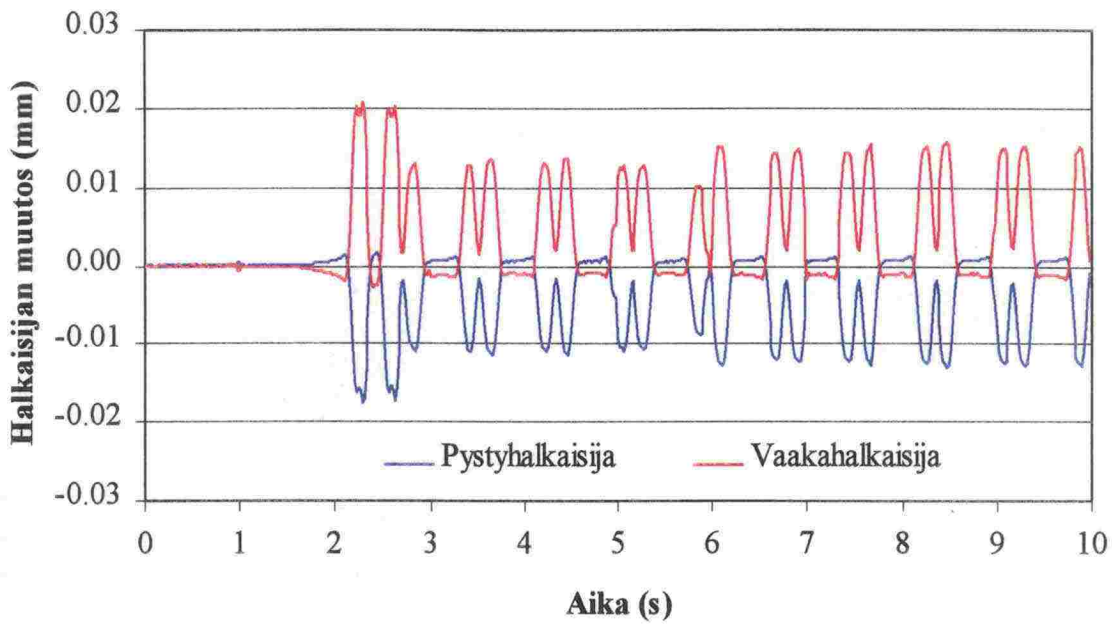
Kuvasta 3.4:10 nähdään, kuinka kiskoa lähinnä oleva pystysuuntainen venymäanturi V7 (kuva 2.5:2) antaa suurimmat maan venymäarvot. Arvojen vaihtelua ei kuitenkaan voida selittää tässä tapauksessa kiskojen läheisyydellä, vaan lähinnä maan epähomogeenisuudella kuten aikaisempienkin antureiden antamien tulosten tapauksissa.



Kuva 3.4:11 Maan vaakasuuntainen venymä ajan funktiona tasolla $K_v -2,5$ m.

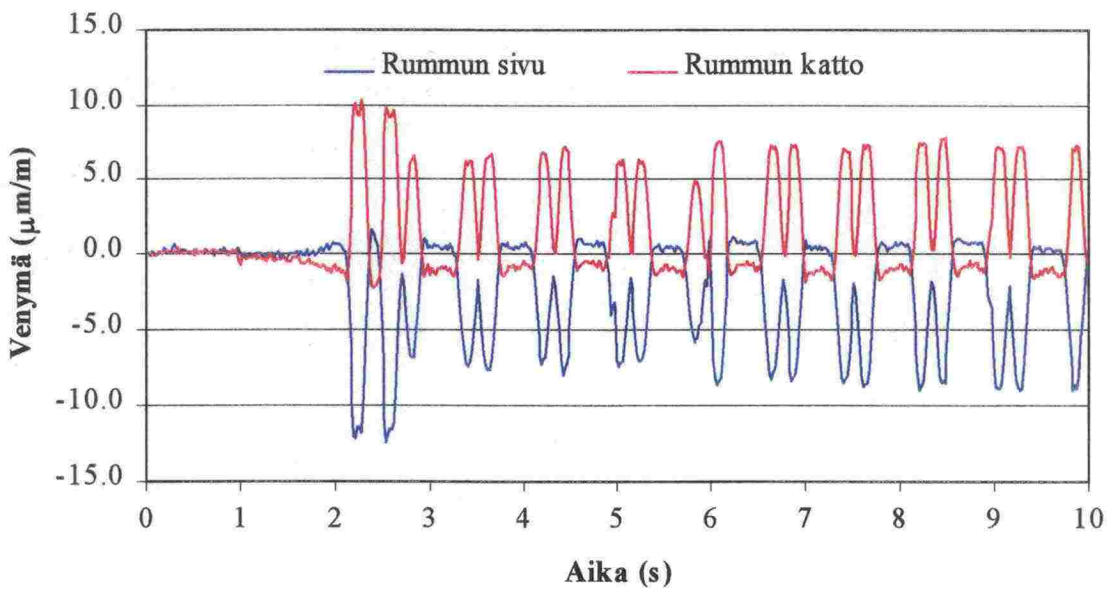
3.4.6 Ratarumpu

Ratarumpuun sijoitettujen instrumenttien mittaussignaaleista on esitetty rummun halkaisijan muutos ajan funktiona kuvassa 3.4:12. Rummun kehän suuntaisia venymiä on esitetty kuvassa 3.4:13. Rummun pituussuuntaisia venymiä taas on esitetty kuvassa 3.4:14 ja rummun sauman yli tapahtuvia siirtymiä viimeisessä ratarummuista saatuja mittaustuloksia käsittelevässä kuvassa eli kuvassa 3.4:15.



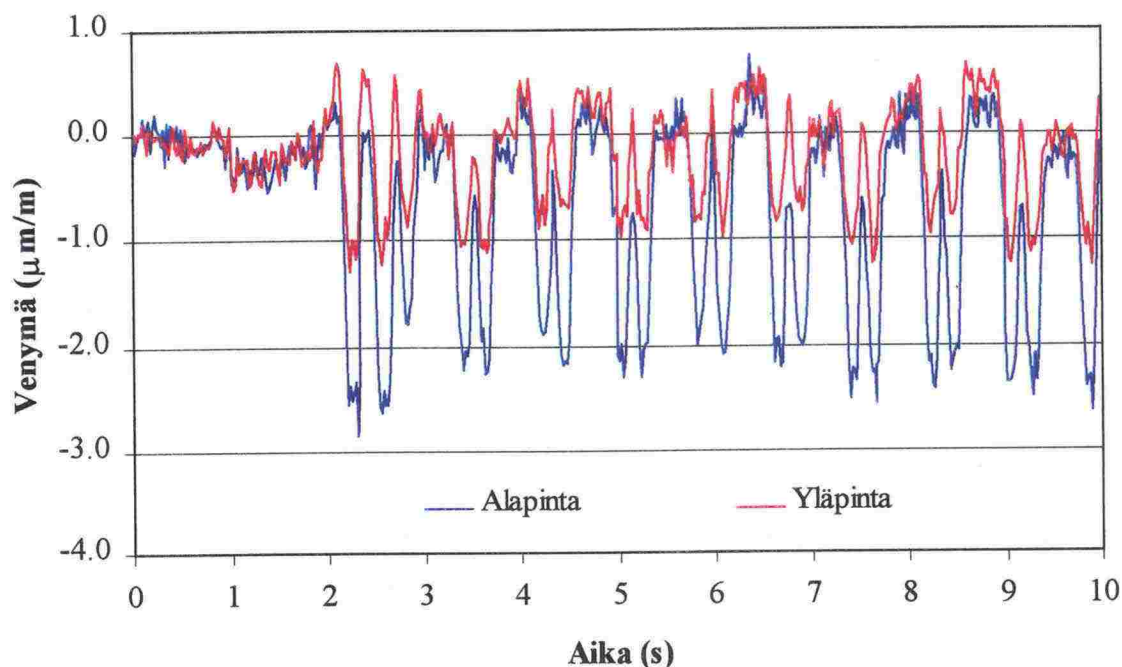
Kuva 3.4:12 Rummun halkaisijan muutos ajan funktiona.

Kuvasta 3.4:12 näkyvät telien aiheuttamat rummun pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutokset. Pystyhalkaisija pienenee ja vaakahalkaisija kasvaa telin ylittäessä rummun. Vaakahalkaisijan muutos näyttäisi olevan hieman suurempi kuin pystyhalkaisijan muutos.



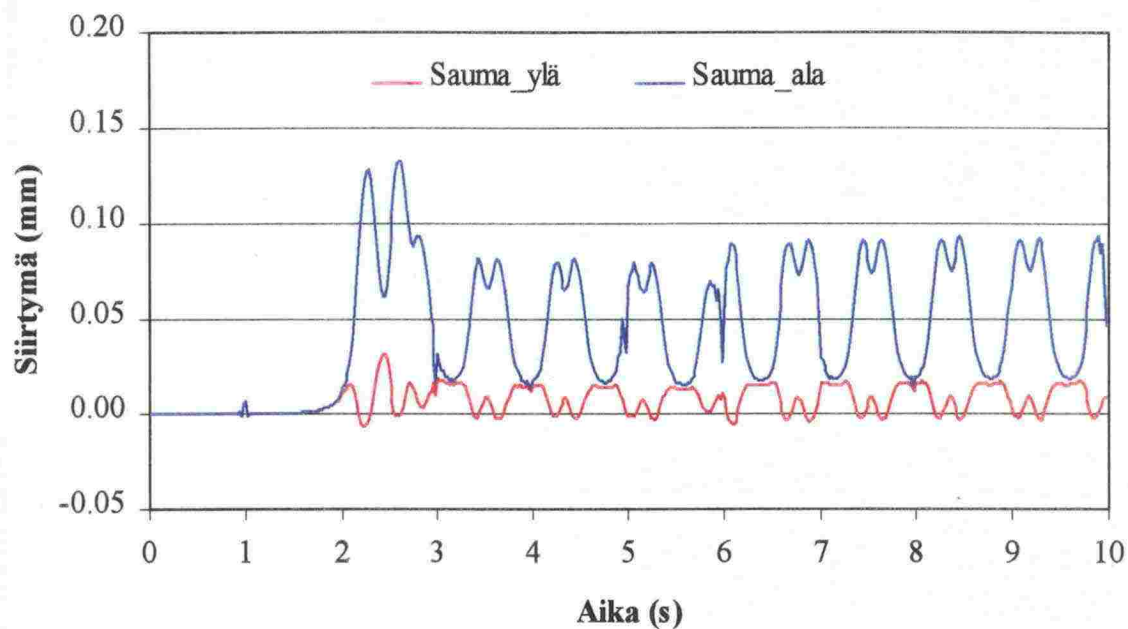
Kuva 3.4:13 Rummun kehän suuntainen venymä ajan funktiona.

Kuvasta 3.4:13 havaitaan, kuinka rummun katossa oleva anturi venyy ja rummun sivulla oleva anturi puristuu kokoon telien ylittäessä rummun. Rummun sivulla oleva anturi näyttäisi antavan hieman suurempia venymäarvoja kuin rummun katossa oleva venymäanturi.



Kuva 3.4:14 Rummun pituussuuntainen venymä ajan funktiona

Kuvasta 3.4:14 havaitaan rummun alapinnan suurempi puristuminen pituussuunnassa kuin rummun yläpinnalla. Pituussuuntainen puristuminen ei kuitenkaan aiheudu viereisten rumpuelementtien puristuksesta, sillä sauman yli tapahtuva liike on positiivista eli saumat aukenevat (kuva 3.4:15). Kaiken kaikkiaan rumpuelementin pituussuuntaisista venymistä voidaan myös todeta, että ne ovat absoluuttiarvoiltaan erittäin pieniä eli vain muutaman mikrostrainin suuruusluokkaa.



Kuva 3.4:15. Rumpuelementtien sauman yli tapahtuva siirtymä ajan funktiona.

Sauman yli tapahtuva siirtymä kuvassa 3.4:15 on sauman alapinnassa eli rummun pohjalla huomattavasti suurempaa kuin yläpinnassa eli rummun katossa. Alapinnassa rumpuelementit loittonevat toisistaan ja yläpinnassa telien kohdalla ne jopa lähestyvät toisiaan eli sauma kapenee. Rummun liikettä ja siitä aiheutuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia on vaikea arvioida pelkkien mittaustulosten perusteella, sillä rumpuelementtien saumakohtien liike ja rumpuelementeistä mitatut suureet eivät ole suoraviivaisesti yhdistettäviä asioita (vrt. kuvat 3.4:14 ja 3.4:15).

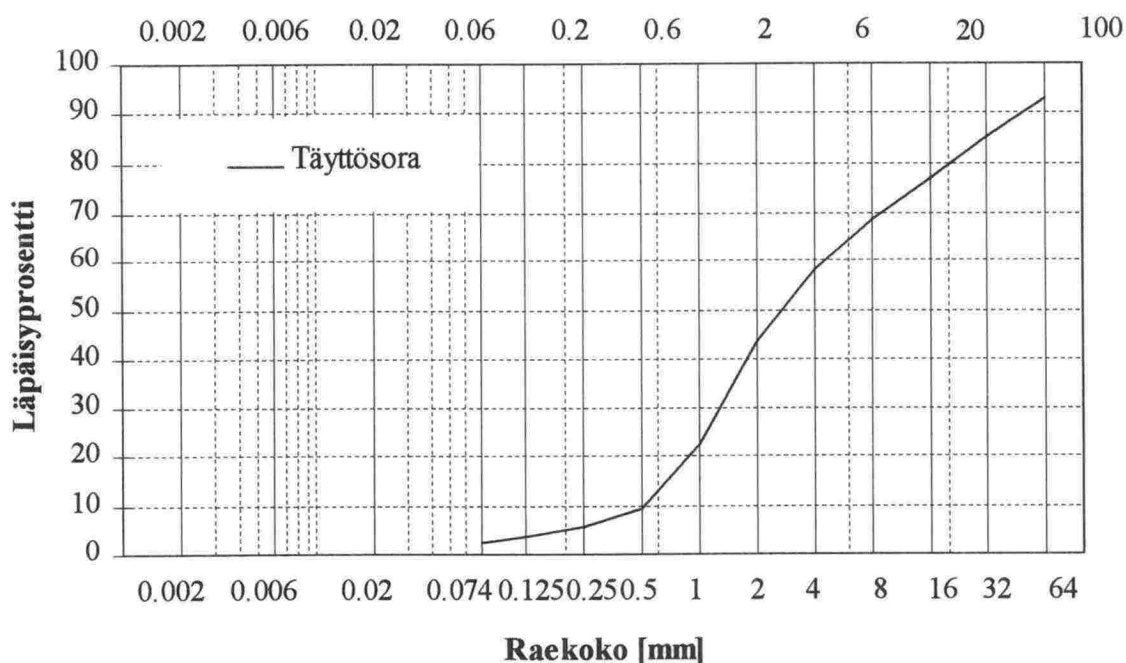
Akselipainon vaikutus mitattavissa suureissa on esimerkkien perusteella varsin ilmeinen, mutta eri suureitten riippuvuuksiin akselipainon suuruudesta palataan tarkemmin mallinnusraportin yhteydessä, kun mittaustuloksia verrataan mallinnuksen tuloksiin.

4. LABORATORIOTUTKIMUSTEN TULOKSET

4.1 Pengermaat

Rumpukohteen täyttömateriaalien palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä tutkittiin TTKK:n pohja- ja maarakenteiden laboratorioissa syklisellä kolmiaksaalilaitteistolla. Menetelmä on analoginen Korian koekohteen pengermaaterealeille vuonna 1999 sovellettuun mekaanisten ominaisuuksien määrittystapaan verrattuna. Tämä on esitetty RHK julkaisussa A 5/2000: ”Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot”.

Tutkitun täyttösoramateriaalin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 4.1:1. Syklisen kolmiaksaalikokeen tulokset on esitetty vastaavasti jäljempänä liitteessä 2.



Kuva 4.1:1 Tutkimuskohteessa käytetyn täyttösoran rakeisuusjakautuma.

Kuvan 4.1:1 mukaista täyttösoraa käytettiin rummun alapuolisessa sora-arinassa (kuvat 2.4:1 ja 2.4:2) sekä täyttösorana rummun sivuilla ja yläpuolella. Proctor-kokeella saatu täyttösoran maksimi kuivatilavuuspaino on 2260 kg/m^3 ja sitä vastaava vesipitoisuus on 8,3 %.

Tukikerroksessa olevan sepelien materiaaliparametrit tullaan mallinnuksen yhteydessä arvioimaan Koriolla vuonna 1999 tehtyjen mittausten tapaan TTKK:n pohja- ja maarakenteiden laboratorioissa aikaisemmin rakeisuudeltaan vastaavanlaisille materiaaleille tehtyjen määrittysten tulosten perusteella (Kolisoja 1997).

4.2 Pohjamaan materiaalit

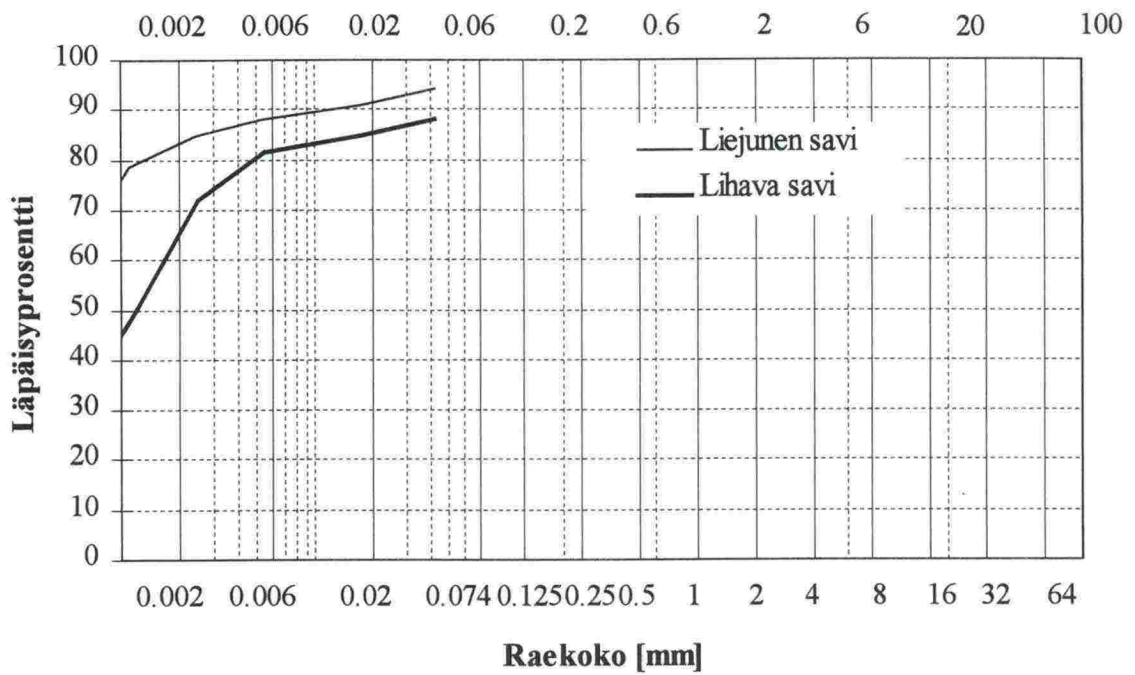
Pohjamaan kuivakuorisavelle ja syvemmällä sijaitsevalla pehmeämmälle savelle tehtiin tulevaa mallinnusta varten materiaalien palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä jännitystasosta riippuvana kuvaavien leikkausmoduuliarvojen määrittäminen. Määritykset tehtiin TTKK:n pohja- ja maarakenteiden laboratorion käytössä olevalla yhdistetyllä Resonant Column ja Bender Element (BERC) -laitteistolla. Laitteistoa ja moduuliarvojen määrittystapaa on käsitelty tarkemmin Souto et al. (1994) sekä RHK:n julkaisussa A 5/2000 ”Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot”.

Liitteessä 3 on esitetty pohjamaan materiaaleille tehtyjen Resonant Column ja Bender Element -mittausten tulokset. Leikkausmoduulit on määritetty kolmella eri sellipaineella, jotka olivat 30 kPa, 60 kPa ja 100 kPa. Tulevaa mallinnusta varten tarvitaan lähinnä muodonmuutosmoduuli E, joka saadaan laskettua leikkausmuodonmuutosmoduulista G. Tarvittavat leikkausmoduulien arvot mitattujen sellipaineiden välistä interpoloidaan leikkausmoduulin lisäksi. Pohjamaan materiaaleille määritettiin muutamia yleisimpiä geoteknisiä ominaisuuksia (taulukko 4.2:1), jotka saatiin kartio- ja areometrikokeilla.

Taulukko 4.2:1 Pohjamaasta otettujen näytteiden geoteknisiä ominaisuuksia.

| Ominaisuus ja mittayksikkö | Korkeustaso 83,9 – 83,7 m | Korkeustaso 82,6 – 82,4 m |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Maalaji | Lihava savi | Liejuinen savi |
| Tilavuuspaino [kN/m ³] | 17,19 | 14,53 |
| Vesipitoisuus [%] | 48,14 | 102,68 |
| Humuspitoisuus [%] | 1,93 | 3,49 |
| Kartiolujuus [kPa] | 21,60 | 20,90 |
| Sensitiivisyys | 31,43 | 8,57 |
| Hienousluku | 70,2 | 106,9 |

Kummaltakin korkeustasolta otettujen näytteiden areometrikokeen avulla määritetyt rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 4.2:1.



Kuva 4.2:1 Pohjamaan savien rakeisuusjakautumat.

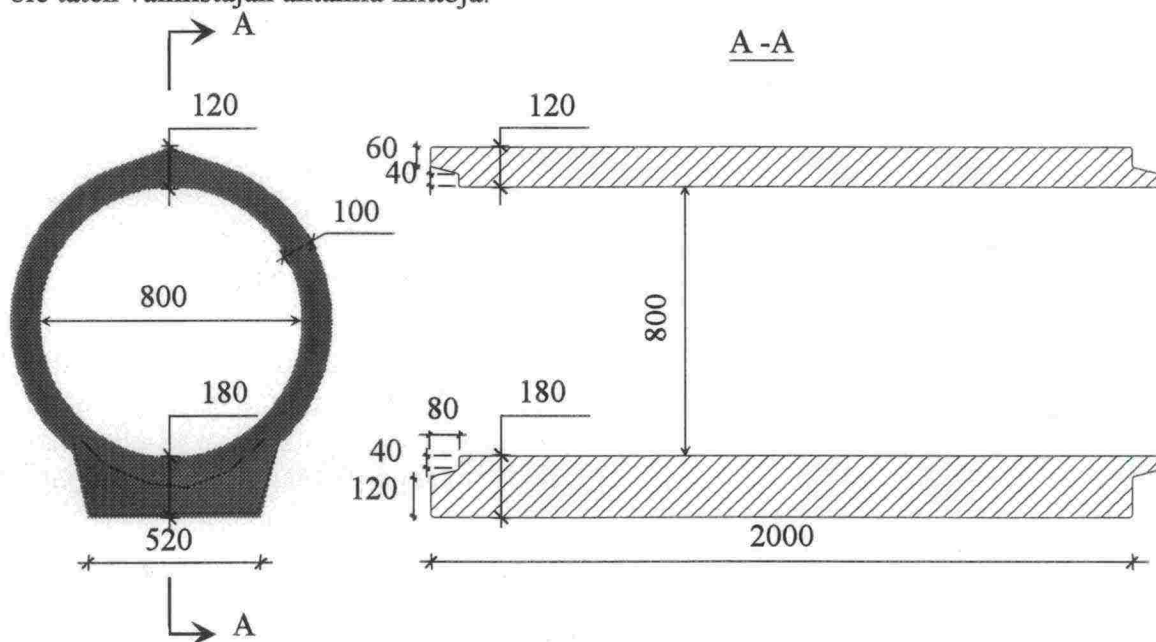
Kuvassa 4.2:1 paksummalla viivalla piirretty lihava savi edustaa pohjamaan kuivakuori-kerroksesta ja ohuemmalla viivalla piirretty liejuinen savi edustaa kuivakuorisaven alla olevaa pehmeämpää savikerrosta.

4.3 Rumpuputkien koekuormitukset

4.3.1 Koejärjestelyt

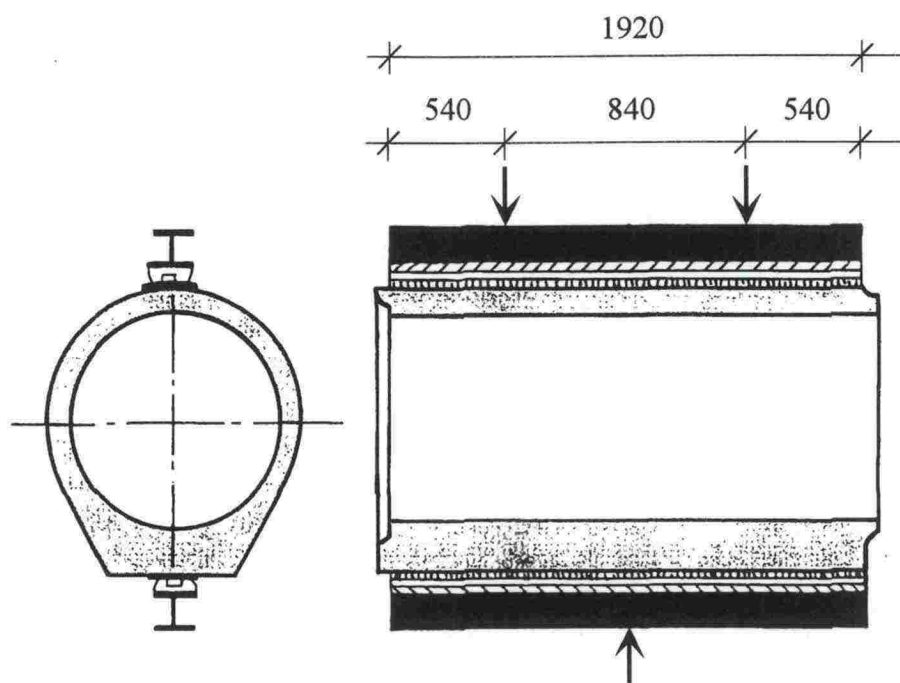
Rumpuputkien koekuormitukset tehtiin TTKK:n rakennustekniikan osaston koehallissa. Koekuormitusten tarkoituksena oli saada tietoa ratarumpujen käyttäytymisestä kimmoisella muodonmuutosalueella betoniputkinormien 1995 mukaisessa kuormituskojärjestelyssä. Kokeen tuloksia tullaan hyödyntämään tämän rumpuputkimuksen toisessa eli mallinnusosassa elementtimallin kalibroimisessa rummun osalta.

Koekuormitetut betoniset rumpuputket, joita oli kaksi kappaletta, olivat Iisalmen sahan valmistamia raudoitettuja betoniputkia. Niiden sisähalkaisija on 800 mm ja pituus 2000 mm. Kuvassa 4.3:1 on esitetty kuormitettujen betoniputkien tärkeimmät mitat. Mitat on todettu koerummuista TTKK:n koehallissa mittanauhalla mittaamalla, eivätkä ole täten valmistajan antamia mittoja.



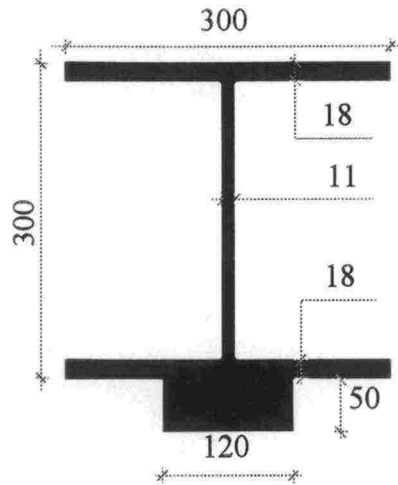
Kuva 4.3:1 Kuormitettujen rumpuputkien tärkeimmät mitat

Betoniputkinormien 1995 kestävyysvaatimusten mukaisessa kuormituskokeessa betoniputkirumpu kuormitetaan raudoitettujen rumpujen kyseessä ollessa aluksi särökuormaan (Q_h) ja tämän jälkeen myötökuormaan (Q_y) asti. Raudoittamattomien rumpujen tapauksessa kokeessa mitataan murtokuorma (Q_u). Nyt koekuormitus tehtiin raudoitetulle betoniputkelle ja se erosi betoniputkinormien 1995 kestävyysvaatimusten mukaisesta kuormituskokeesta siinä, että rumpua ei kuormitettu särökuormaan eli plastiselle alueelle asti. Kuormituskokeen skemaattinen järjestely kuormituksen ja tukireaktioiden suhteen on esitetty kuvassa 4.3:2.



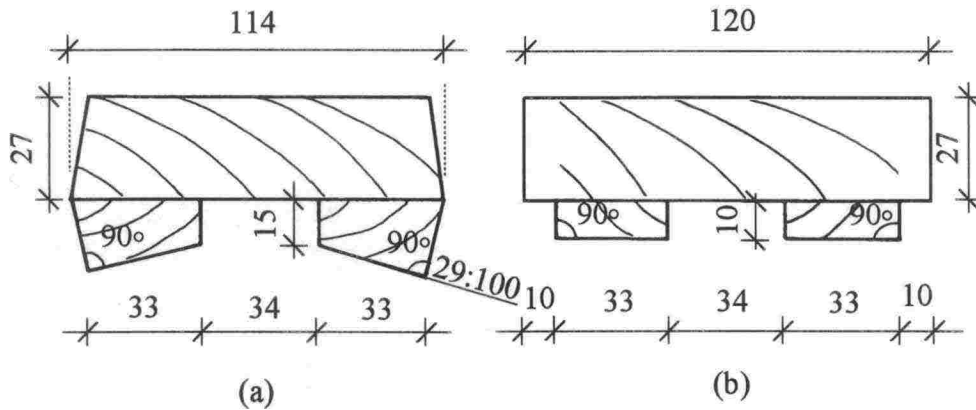
Kuva 4.3:2 Kuormitettujen rumpuputkien skemaattinen kuormitusjärjestely (Betoniputkinormit 1995).

Kuvassa 4.3:2 vasemmalla näkyy kuormitusjärjestelyt rumpuelementin päästä katsottuna. Tällöin ylimmäisenä on teräksinen I-palkki, jonka tehtävänä on jakaa piste-kuormat tasaiseksi kuormaksi palkin alla olevalle puosalle. Puosa jakaa kuormat pehmikkeen kautta rumpuelementille. Alapuolella rumpua sijaitsee pehmike, joka tasoittaa kuormat rumpuputken alapuolella olevalle puosalle. Alapuoliselta puosalta kuormat siirtyvät alapuoliselle palkille nauhakuormaksi, joita kuormittaa alapuolinen pistekuorma. Pistekuormien lukumäärää ja sijaintia ei ole määritetty normissa, joten kuormitetuille rumpuputkille käytettiin kuvan 4.3:2 oikean puoleisen kuvan mukaista pistekuormitusjärjestelyä kuvassa esitetyillä etäisyyksillä. Huomattavaa kuvassa 4.3:2 on se, että kuormitus ei ulotu uurteiden kohdalle. Suoritettussa rumpujen koe-kuormituksessa kuvassa 4.3:2 näkyvä alapuolinen I-palkki korvattiin tasaisella koehallin lattiapinnalla, sillä palkin tehtävänä on ainoastaan jakaa pistekuorma tasaiseksi nauhakuormaksi. Yläpuolisena I-palkkina käytettiin kuvan 4.3:3 mukaista teräspalkkia, jonka alalappaan oli hitsattu umpiteräksinen 120 mm leveä ja 30 mm paksu oleva lisäteräs. Teräspalkin pituus oli 2000 mm ja siihen oli lisätty kaksi kappaletta uuman vahvistuksia etäisyyksille 800 mm kummastakin päästä. Tällöin uuman vahvistuksien keskinäinen etäisyys oli 400 mm.



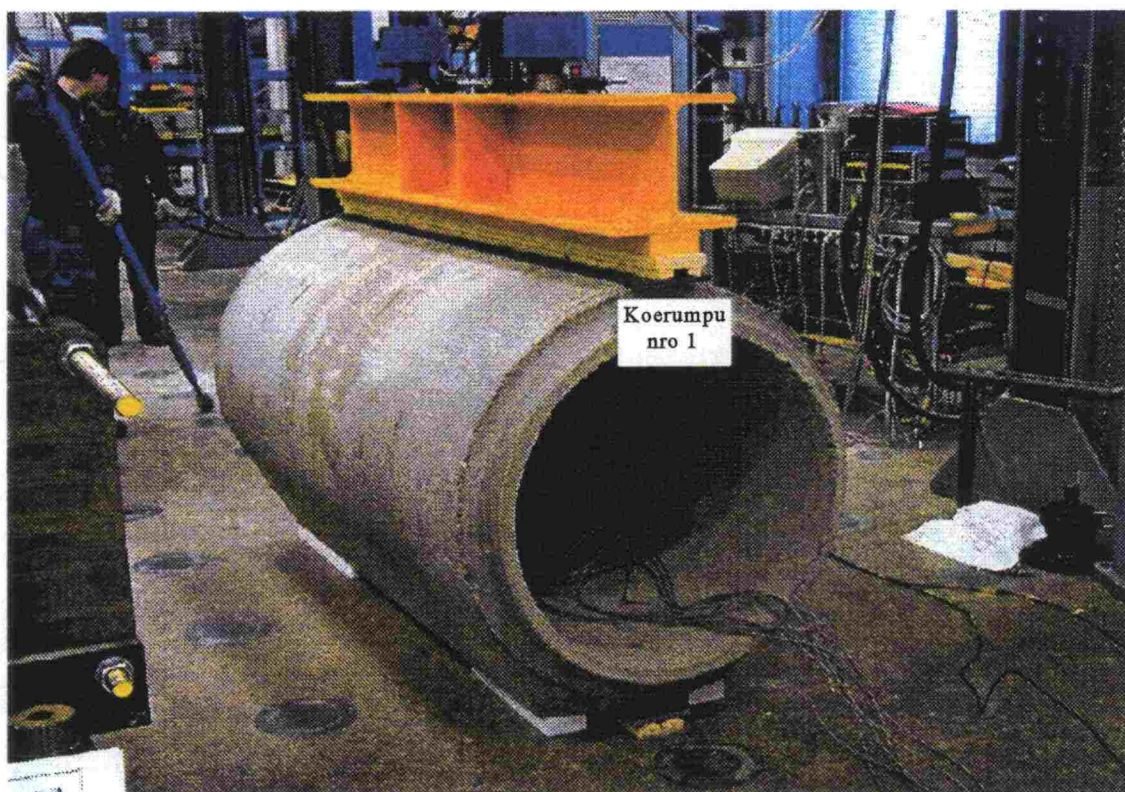
Kuva 4.3:3 Kuormituskokeessa käytetyn rummun yläpuolisen I-palkin mitat.

Sekä ylä- että alapuolinen puuosa oli tehty mahdollisimman vähäoksisesta puusta. Yläpuolisen puuosan mitat on esitetty kuvassa 4.3:4 a ja alapuolisen puuosan mitat vastaavasti kuvassa 4.3:4 b.



Kuva 4.3:4 (a) ylä- ja (b) alapuolinen puuosa (Betoniputkinormit 1995).

Puosien ja betonirenkaan välissä käytettiin pehmikkeenä solumuovilevyä, jonka paksuus kuormittamattomana oli 10 mm, leveys 150 mm ja pituus 2000 mm. Rummun yläpuoliseen teräspalkkiin vaikuttavat pistekuormat saatiin aikaan kahdella tunkilla, joiden maksimivoima oli 100 kN/tunkki. Kuvassa 4.3:5 on esitetty kuva koejärjestelystä.



Kuva 4.3:5 Kuormitettujen rumpuputkien kuormitusjärjestely

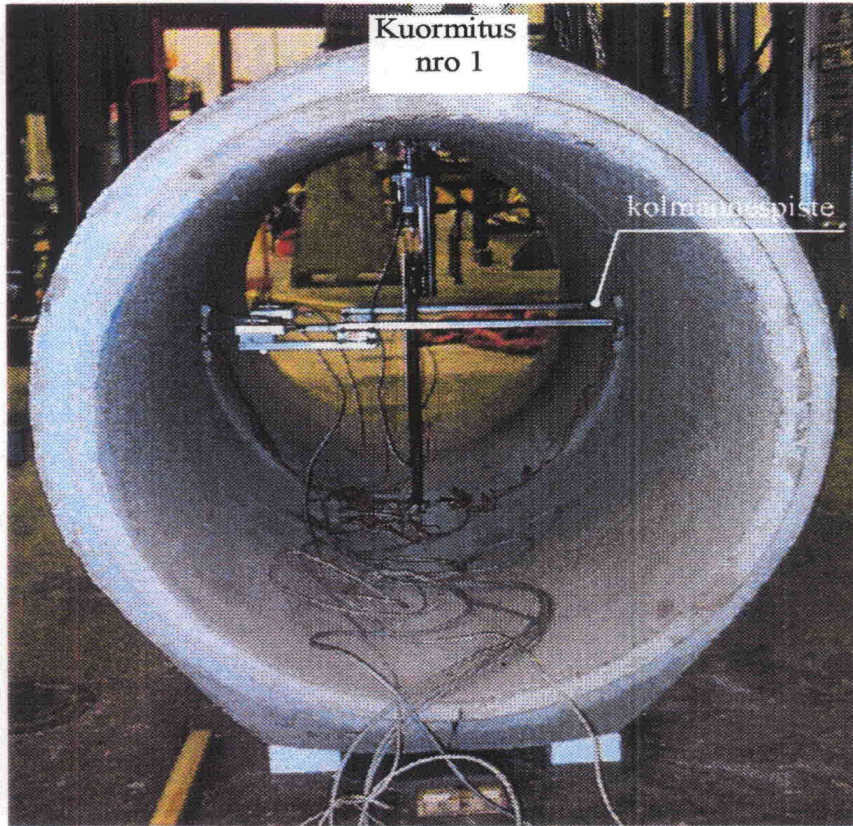
Kuvasta 4.3:5 havaitaan, kuinka alapuolisen puuosan lisäksi rummun alle oli lisätty neljä EPS-solumuovipalasta. Näiden palasten tarkoituksena oli estää rummun mahdollinen sivuttaisliike kokeen aikana, sillä alapuolinen puosa itsessään ei ollut riittävän stabiili tähän tarkoitukseen. Molemmat tunkit tuettiin myös sivuttaissuunnassa kuvassa vasemmalla laboratoriomestarin kädessä näkyvällä metallivarrella. Kuvasta 4.3:5 nähdään myös teräspalkin laipan vahvistukset.

4.3.2 Instrumenttien sijoittelu kuormitetuissa rumpuputkissa

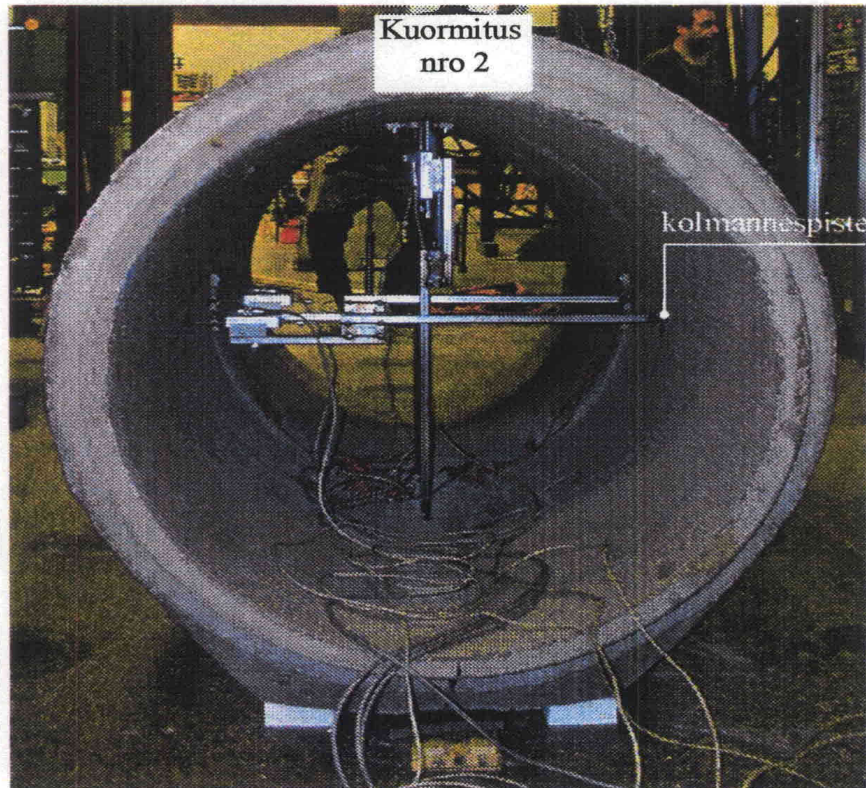
Kuormitettuihin rumpuputkiin sijoitettiin kuvaa 2.2:3 vastaavasti yhteensä neljä rummun kehän suuntaista venymäanturia. Nämä sijaitsivat rummun pituussuunnassa keskellä rummun katossa, pohjassa ja molemmilla sivuilla. Rummun halkaisijan muutoksen mittaamiseen käytettiin siirtymäantureita kuvan 2.2:3 venymäantureiden tapaan. Siirtymäanturit sijoitettiin ensimmäisellä kuormituskerralla rummun pituussuunnan puoliväliin ja kuvan 4.3:6 a mukaiseen kolmannespisteeseen. Toisella kuormituskerralla ensimmäisen kuormituskerran kolmannespisteeseen sijoitetut siirtymäanturit (kuva 4.3:6 a) vaihdettiin kuvan 4.3:6 b mukaiseen kolmannespisteeseen. Kehän suuntaiset venymäanturit olivat molemmilla kuormituskertoilla rummun pituussuunnan puolella välissä. Siirtymäantureiden paikan muuttamisella haluttiin tarkistaa kuormituksen tasaisuus. Epätasaista kuormitusta aiheutti tunkkien hieman erisuuruinen voima ja mahdolliset epäkeskisyydet kuormansiirtorakenteissa. Siirtymäantureilla varmistettiin koerummun halkaisijan muutoksen mittauksen onnistuminen siinäkin tapauksessa, että kokeissa olisi saavutettu särökuorma eli koerumpu olisi päässyt plastisoitumaan.

61

(a)



(b)

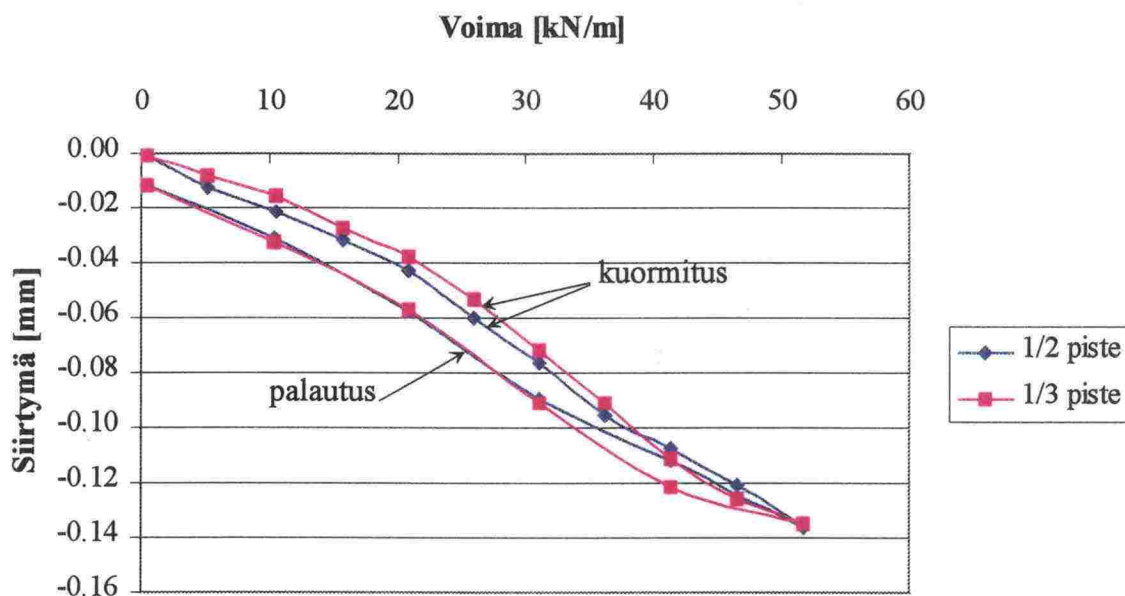


Kuva 4.3:6 Mittausinstrumenttien sijoittelu rummussa eri kuormituskerroilla.

Kuvissa 4.3:6 a ja b nähdään kaksi pysty- ja kaksi vaakatasoon asennettua siirtymäanturia. Rummun pituussuuntaiset kolmannespisteet on myös esitetty kuvissa 4.3:6 a ja b.

4.3.3 Mittaustulokset

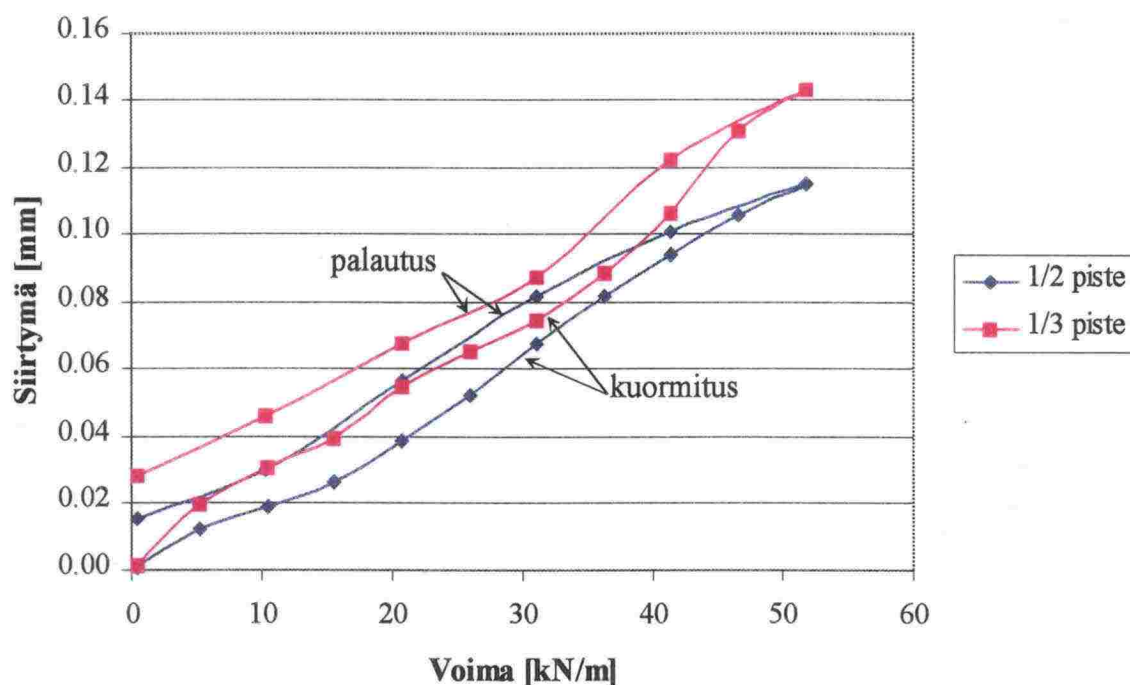
Rumpuputkia kuormitettiin koehallissa kaksi kertaa, joista ensimmäisellä kerralla maksimikokonaiskuormana oli 99,4 kN eli rummun tehollista pituusmetriä kohden 51,8 kN/m. Toisella kuormituskerralla maksimikokonaiskuormana oli 198,4 kN eli viivakuormana 103,4 kN/m. Kuormitus aiheutettiin rummulle teräspalkin oman painon sekä tunkkien avulla. Tunkkien antamat kuormat eivät olleet aivan samoja. Oletetulla 100 kN kuormituksella, mikä näkyi tunkkien ohjauskaapin näytöllä, toinen tunkki puristi 101,34 kN voimalla ja toinen tunkki 97,22 kN voimalla. Tunkkien voimien erisuuruisuus tasoittui teräspalkin matkalla ja täten sitä ei voitu havaita mittaustuloksissa. Molemmilla kuormituskerroilla kuormitusta lisättiin askeleittain 5 kN/tunkki, kunnes saavutettiin haluttu maksimikuormitus. Kuormituksen poisto tehtiin 10 kN/tunkki olevin portain. Siirtymä- ja venymäanturien mittaukset tehtiin kuormituslisäysten välissä, eli silloin kun kuormitusta oli vakio. Kuvassa 4.3:7 on esitetty ensimmäiseltä kuormituskerralta mitattu rummun pystyhalkaisijan muutos voiman (viivakuorman) funktiona kahdesta kohdasta eli rummun puolivälistä ja kuvan 4.3:6 a kolmannespisteestä mitattuna.



Kuva 4.3:7 Ensimmäisellä kuormituskerralla mitatut rummun pystyhalkaisijan muutokset.

Kuvasta 4.3:7 havaitaan kuormituksen lisäyksen ja poiston hystereesiluonne. Kuormituksen alun ja palautuksen lopun välinen plastinen muodonmuutos, jonka suuruus on noin 0,01 mm, johtuu betonissa tapahtuvasta mikrohalkeilusta. Kuormituksen ja siirtymän suhde ei ole aivan lineaarinen. Suuremmalla kuormituksella käyrien voidaan olettaa linearisoituvan paremmin, kunnes makrohalkeilua tai suurempaa alkaa tapahtua. Kuvan 4.3:7 molempien mittauspisteiden anturit saavat maksimikuormituk-

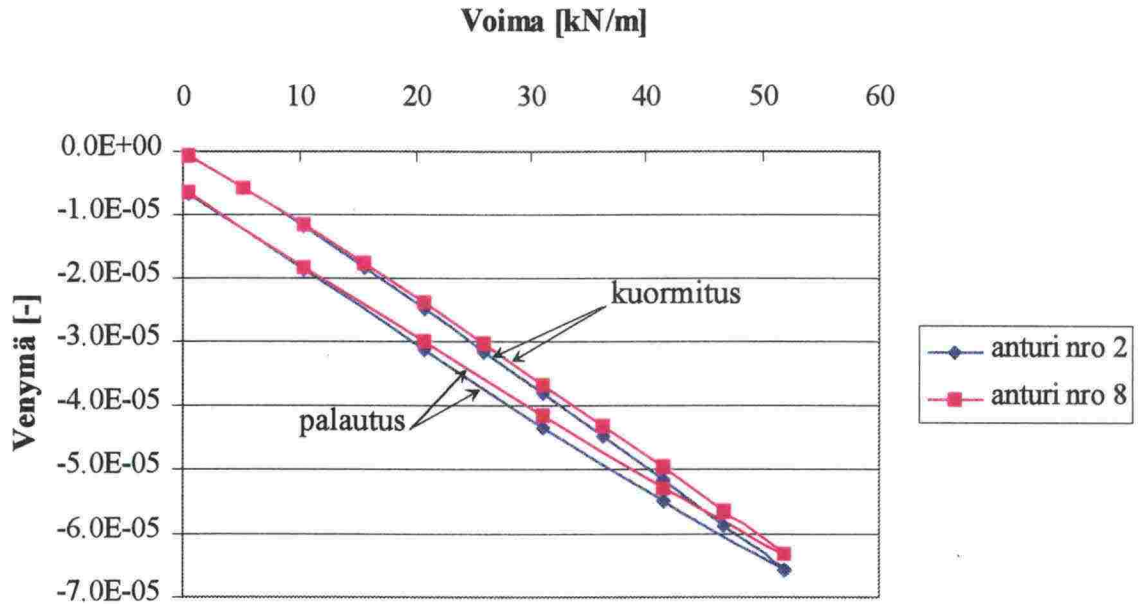
sella noin 0,13 mm siirtymän. Kuvassa 4.3:8 esitetään vastaavasti rummun vaakahalkaisijan muutos rumpuputkea kuormittavan voiman funktiona.



Kuva 4.3:8 Rummun vaakahalkaisijan muutokset.

Kuvassa 4.3:8 rummun vaakahalkaisijan maksimimuutos rummun puolella välissä maksimikuormituksella on hieman yli 0,11 mm, kun taas kolmannespisteessä vastaava arvo on reilut 0,14 mm. Ero johtunee materiaalin epähomogeenisuudesta eli esimerkiksi raudituksen sijainnista. Kuvissa 4.3:7 ja 4.3:8 havaittavat maksimisiirtymät, niin pysty- kuin vaakasuunnassakin, ovat suuruudeltaan samaa luokkaa eli noin 0,14 mm. Mikrohalkeilusta syntyneen plastisoitumisen osuus on molemmissa mittauspisteissä noin 0,02 mm luokkaa. Pystysuuntainen siirtymä on halkaisijan lyhenemistä ja vaakasuuntainen siirtymä vastaavasti halkaisijan pitenemistä.

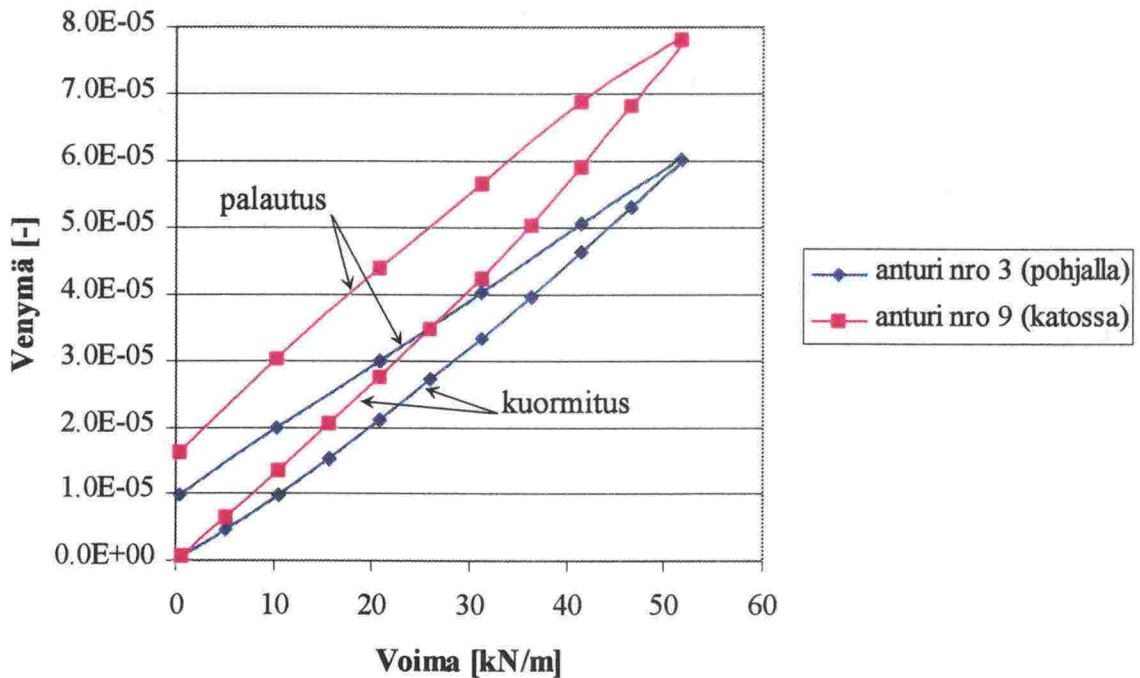
Kehän suuntaisia venymiä mitattiin venymäantureilla. Kuvassa 4.3:9 on esitetty rummun vasemmalle ja oikealle seinämälle pituussuunnan puoleen väliin asennetuilla venymäantureilla mitatut venymät rumpua kuormittavan voiman funktiona. Anturi nro 2 sijaitsee kuvissa 4.3:6 a ja b vasemmalla puolella ja vastaavasti anturi nro 8 oikealla puolella.



Kuva 4.3:9 Rummun kehän venymät rummun seinämän puolella välissä.

Rummun kehän venymä kummallakin seinämällä on lähes saman suuruinen eli reilut $6 \cdot 10^{-5}$. Plastinen venymä on suuruusluokkaa $5 \cdot 10^{-6}$.

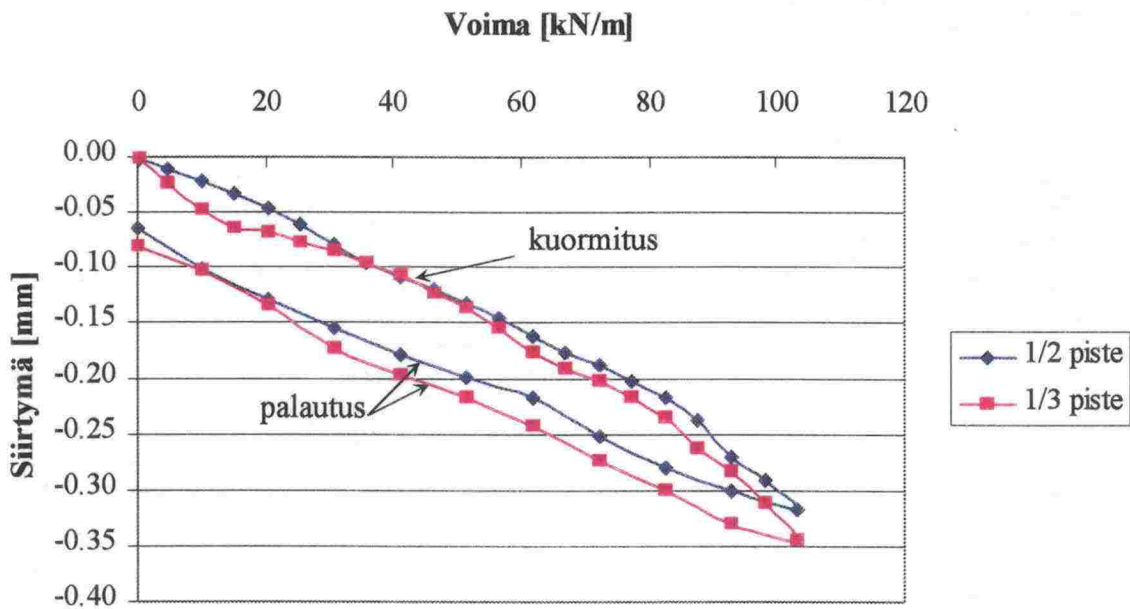
Kuvassa 4.3:10 on esitetty rummun kattoon ja pohjalle asennetuilla venymäantureilla mitatut venymät rumpua kuormittavan voiman funktiona.



Kuva 4.3:10 Rummun kehän venymät rummun katossa ja pohjalla.

Kuvasta 4.3:10 havaitaan, kuinka kehän suuntaiset venymät rummun katossa ovat suuremmat kuin rummun pohjalla. Tämä selittyy rummun pohjan suuremmalla paksuudella. Rummun pohjalle asennetun anturin nro 3 antamat tulokset ovat myös lineaarisempia kuin rummun kattoon asennetun anturin antamat tulokset.

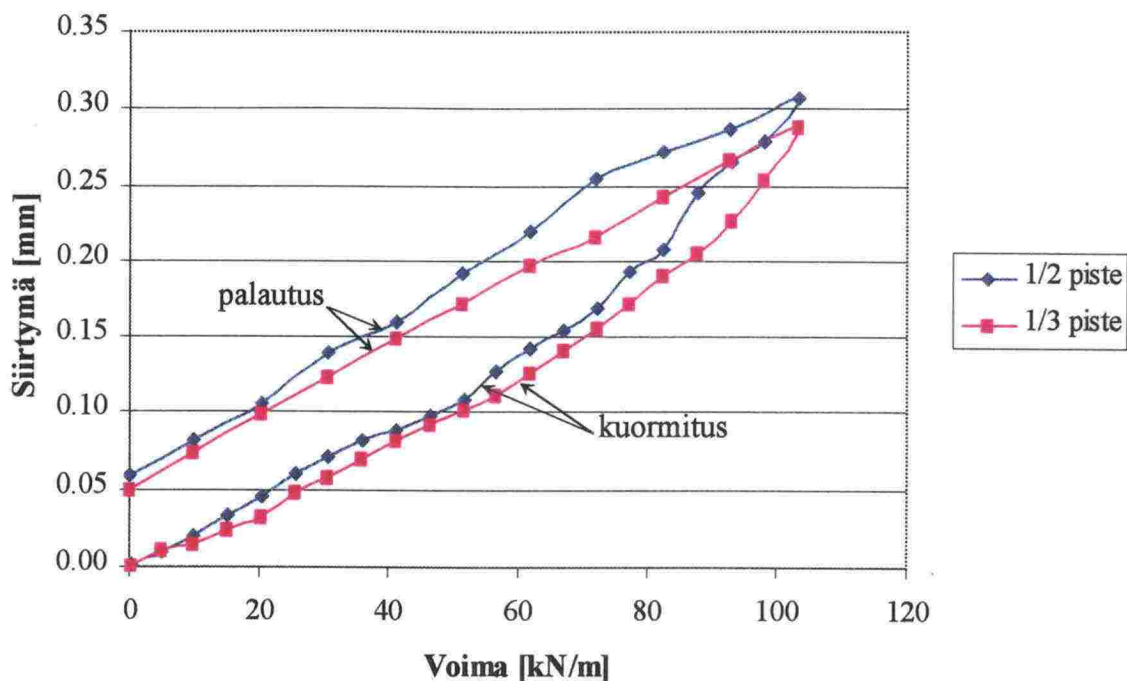
Toisella kuormituskerralla maksimikuormitus kasvatettiin kaksinkertaiseksi ensimmäiseen kuormitukseen verrattuna. Rummun halkaisijan muutosta mitattiin kuvan 4.3:6 b mukaisesta kolmannespisteestä. Kuvassa 4.3:11 on esitetty rummun pystyhalkaisijan muutos rummun pituussuunnan keskipisteessä ja kolmannespisteessä.



Kuva 4.3:11 Toisella kuormituskerralla mitatut rummun pystyhalkaisijan muutokset.

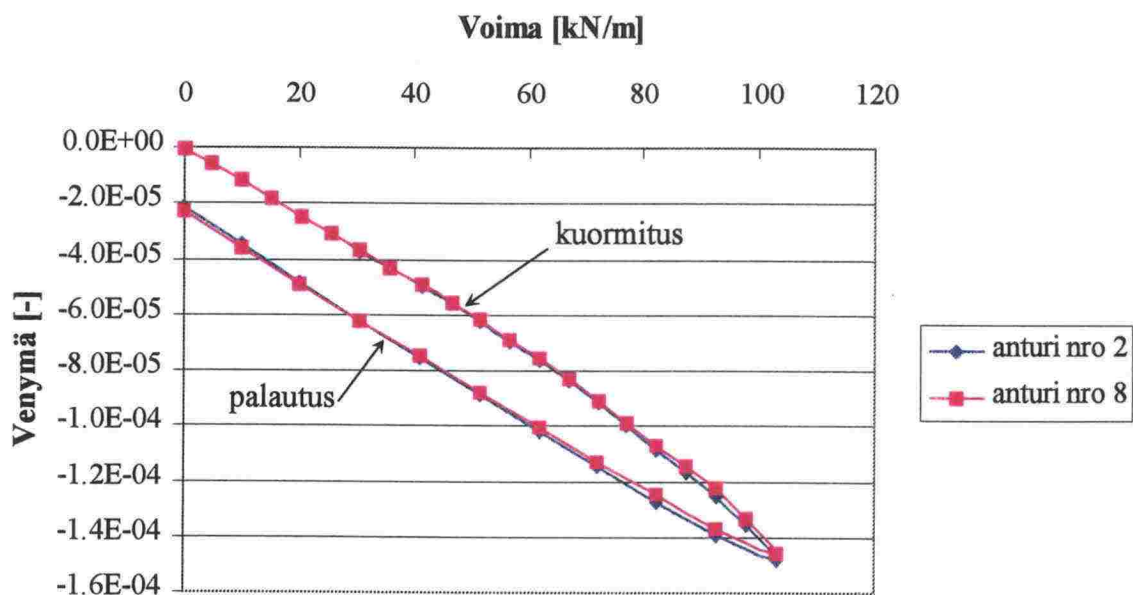
Kuvan 4.3:11 palautuskäyrä voidaan ajatella lineaariseksi molempien pisteiden osalta. Maksimisiirtymä on molemmissa mittauspisteissä hieman yli 0,3 mm, kun puolta pienemmällä kuormituksella (kuva 4.3:7) vastaava arvo oli alle 0,14 mm.

Toisella kuormituskerralla mitatut vaakahalkaisijan muutokset on esitetty kuvassa 4.3:12.



Kuva 4.3:12 Toisella kuormituskerralla mitatut rummun vaakahalkaisijan muutokset.

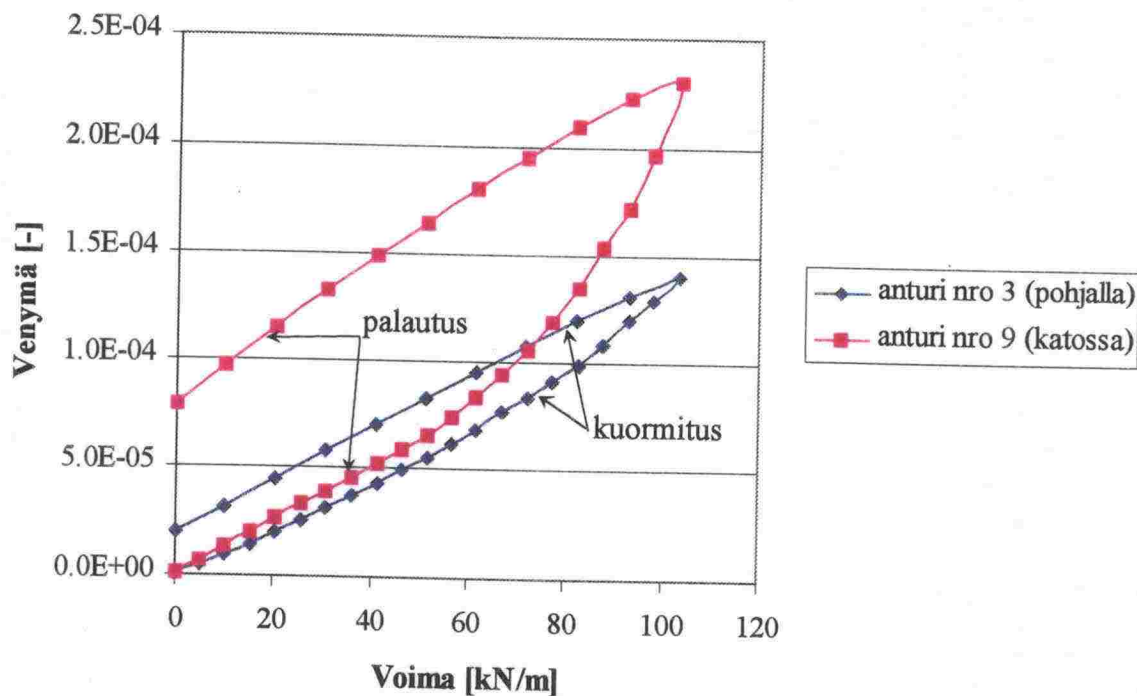
Kuvan 4.3:12 mukaan rummun vaakahalkaisijan muuttumista voiman funktiona voidaan pitää lineaarisena ainakin 80 kN/m kuormitukseen asti. Mikrosäröilyn aiheuttaman plastisen siirtymän suuruus on molemmissa mittauspisteissä noin 0,05 mm. Toisella kuormituskerralla mitatut rummun kehän suuntaiset venymät rummun sivuseinämiä keskikohdalla on esitetty kuvassa 4.3:13.



Kuva 4.3:13 Toisella kuormituskerralla mitatut rummun kehän venymät rummun seinämillä.

Kuvan 4.3:13 anturi nro 2 sijaitsee kuvissa 4.3:6 a ja b vasemmalla seinämällä ja anturi nro 8 vastaavasti oikealla seinämällä. Kuvassa 4.3:13 maksimivenymät ovat noin $1,5 \cdot 10^{-4}$, kun puolta pienemmällä kuormituksella (kuva 4.3:9) venymät olivat alle $7 \cdot 10^{-4}$.

Rummun kattoon ja pohjaan kiinnitettyjen venymäanturien antamia venymiä on vertailtu kuvassa 4.3:14.

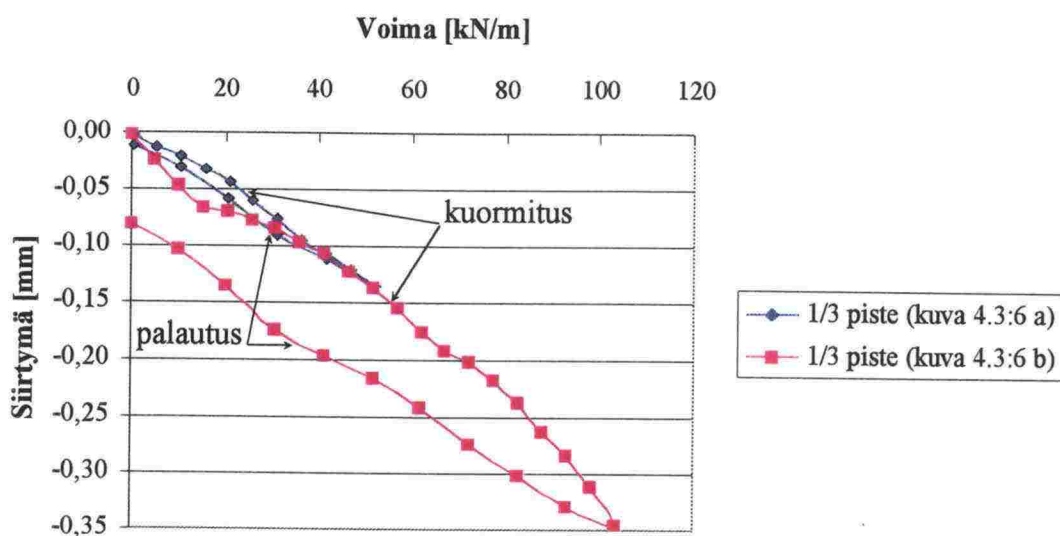


Kuva 4.3:14 Toisella kuormituskerralla mitatut rummun kehän venymät rummun katossa ja pohjalla.

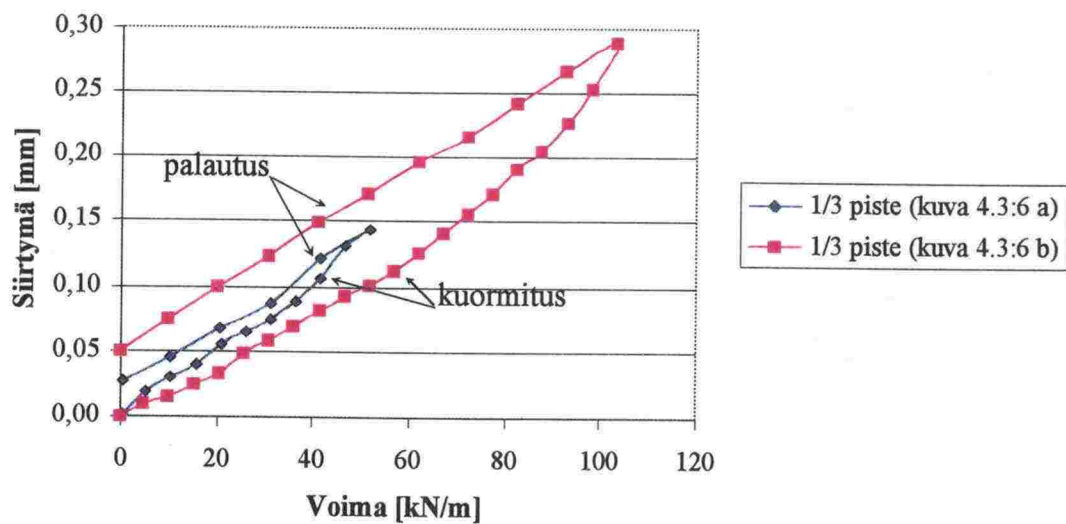
Kuvasta 4.3:14 havaitaan selvästi rummun katossa tapahtuva plastisoituminen/säröily, sillä kuormituskäyrä on huomattavan epälineaarinen verrattuna palautuskäyrään. Rummun pohjalta mitatuista venymistä ei sitä vastoin voida tehdä samanlaista johtopäätöstä.

Kahden kuormituskerran eroavaisuuksista kiinnostaa lähinnä kolmannespisteisiin sijoitetujen siirtymäanturien antamat erot sekä erot rummun kattoon sijoitetun venymäanturin nro 9 antamissa tuloksissa. Kuvissa 4.3:15 a ja b on esitetty pysty- sekä vaakasuuntaisten halkaisijan muutosten ero kahdella kuormituskerralla.

(a)

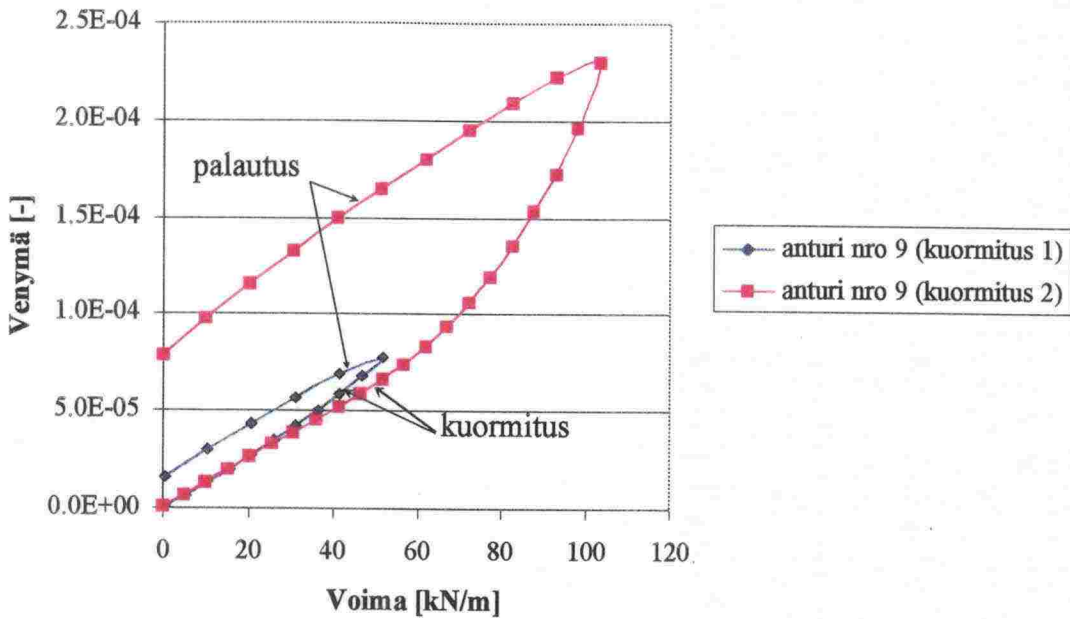


(b)



Kuva 4.3:15 Rummun halkaisijan muutokset (a) pysty- ja (b) vaakasuunnassa eri kuormituskerroilla ja eri kolmannespisteissä mitattuna.

Kuvista 4.3:15 a ja b havaitaan, kuinka kuorman kaksinkertaistamisen aiheuttama plastisoituminen näkyy enemmän pysty- kuin vaakahalkaisijan muutoksessa. Kuvassa 4.3:16 on esitetty rummun kattoon asennetulla venymäanturilla nro 9 mitattu voiman ja venymän välinen riippuvuus molemmilla kuormituskerroilla.



Kuva 4.3:16 Rumpuputken kattoon asennetulla venymäanturilla mitatut venymät eri kuormituskerroilla.

Kuvasta 4.3:16 havaitaan hyvin, kuinka ratarummun kattoon syntyy kuormituksen kasvaessa yhä suurempia mikrosäröjä, jotka aiheuttavat plastisoitumista. Kuormituksessa nro 1 samaa ilmiötä ei ole mahdollista vielä havaita. Plastisoitumisen voidaan olettaa alkaneeksi viimeistään 80 kN/m kuormituksella. Plastisoituminen havaitaan myös siitä, että kuorman kasvaessa kaksinkertaiseksi venymät kasvavat kolminkertaisiksi.

5. YHTEENVETO

5.1 Johtopäätökset koekohteen instrumentoinnista ja mittauksista

Toijalan ja Viialan välisellä rataosuudella sijainneessa instrumentointikohteessa syksyllä 2000 tehtyjen mittausten valmistelusta ja käytännön toteutuksesta voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Yleisesti ottaen mittaukset onnistuivat raiteesta, penkereestä ja ratarummusta ennako-odotusten mukaisesti raiteen tuennan jälkeisellä mittauskerralla. Mitattavien kanavien suuresta lukumäärästä johtuen kaikkia mittausinstrumentteja ei kuitenkaan voitu mitata samanaikaisesti (kappale 3.2). Raiteen osalta mittaustulokset jäivät lievästi epämääräisiksi ainoastaan kiskoon vaikuttavan vaakavoiman osalta, kuten Kouvolan ja Korian välisellä rataosuudellakin kesällä 1999 (Kolisoja et al. 2000). Ratapenkereen osalta ainoastaan yksi venymäanturi ei toiminut, sillä se oli siirtynyt mittaussajankohtaan mennessä mittaussalueensa ulkopuolelle. Rumpuun sijoitetuista antureista saatiin kaikista järkevältä vaikuttavia mittaussignaaleja.
- Kiskoihin sijoitetuilla venymäantureilla pyrittiin ensisijaisesti mittaamaan pystysuuntaisen pyöryvoiman suuruus, jossa onnistuttiin odotetulla tavalla (kuvat 3.4:1 ja 3.4:2). Ratapölkyn pystysuuntaiset siirtymät ja pölkyn yläpinnan venymät saatiin myös mitattua onnistuneesti (kuvat 3.4:3 ja 3.4:4).
- Penkereeseen sijoitettiin kolmelle tasolle mittausinstrumentteja eli noin 0,5 m tukikerroksen alapinnan alapuolella olevalle (Kv -1,1 m) tasolle, noin 0,4 m rummun yläpinnan yläpuolella olevalle (Kv -1,7 m) tasolle ja rummun puolivälin (Kv -2,5 m) tasolle. Ylintä instrumenttien asennustasoa alennettiin alkuperäisestä asennussuunnitelman tasosta eli tukikerroksen alapinnasta, koska tukikerroksen alapintaan oli sijoitettu routalevy, jota ei oltu huomioitu instrumenttien asennussuunnitelmassa. Keskimmaiselle instrumenttien asennustasolle sijoitettu penkereen vaakasuuntaista venymää mittaava anturi V25 (kuva 2.5:3) oli ajautunut mittaussalueensa ulkopuolelle. Muista penkereeseen asennetuista 15 instrumentista saatiin onnistuneita mittaussignaaleja (kuvat 3.4:5 – 3.4:11), joskin rinnakkaisilta antureilta saaduissa signaaleissa on jonkin verran keskinäisiä eroja. Venymä- ja maanpainemittausten tuloksia ja niiden luotettavuutta tulee tarkastella vasta kokonaisuutena koetulosten myöhemmän mallinnuksen yhteydessä.
- Ratarumpuun sijoitettujen rummun halkaisijan muutosta mittaavien siirtymäantureiden sijaintia muutettiin sisäkiskon alapuolelta ulkokiskon alapuolelle mittausten numero 51 kohdalla (taulukko 3.2:1). Rumpuelementtien pituus-suuntaiset venymät olivat erittäin pieniä. Muuten ratarumpuun sijoitetuista, kaikkiaan 12:sta venymä ja siirtymäanturista saatiin edustavia mittaustuloksia (kuvat 3.4:12 – 3.4:15).

5.2 Johtopäätökset koerummun laboratoriotutkimuksista

Rumpuelementtien koekuormituksista ja kuormitusten mittaustuloksista voidaan todeta tähänastisten tarkastelujen perusteella seuraavaa:

- Rumpuelementtien kuormitusjärjestelyt TTKK:n rakennustekniikkaosaston koehallissa vastasivat pitkälti betoniputkinormien 1995 mukaista kuormitusjärjestelyä. Eroavaisuudet löytyivät alapalkin korvaavasta tasaisesta lattiapinnasta ja työturvallisuuteen liittyvästä rummun sivuttaistuista (kuva 4.3:5). Kuormitustapa erosi betoniputkinormien 1995 kuormitustavasta siinä, että betoniputken ei annettu saavuttaa raudoitetuille putkille määriteltyä särökuormaa eli betoniputkesta ei voitu havaita kokeen aikana silmämääräisesti säröilyä.
- Rumpuelementeistä mitattiin kahdella kuormituskerralla rummun halkaisijan muutosta niin vaaka- kuin pystytasossakin (kuvat 4.3:6 a ja b). Rummun kehän suuntaisia venymiä mitattiin rummun vastakkaisilta pystyseinämillä, pohjasta ja katosta. Ensimmäisellä kuormituskerralla maksimikuormituksena oli 51,8 kN/m ja toisella 103,4 kN/m. Rummun kolmannespisteeseen sijoitettua halkaisijan mittausta kohtaa vaihdettiin ensimmäisien ja toisen kuormituskerran välillä.
- Rumpuelementtien voidaan todeta käyttäytyvän jo alhaisillakin kuormituksilla epälineaarisesti (kuvat 4.3:7 – 4.3:16). Tämä epälineaarisuus johtuu lähinnä betonissa tapahtuvasta mikrohalkeilusta sekä vähäisessä määrin betoniterästen mahdollisesta epätasaisesta jakautumisesta rummussa. Betonin, lähinnä sen runkoaineksen, epähomogeenisuus tietyissä kohdin rumpua saattaa myös aiheuttaa epälineaarisuutta.
- Rummun puolivälissä ja kolmannespisteessä mitatut rummun vaaka- ja pystyhalkaisijan muutokset näyttäisivät antavan samanlaisia tuloksia. Tästä voidaan päätellä, että kuormitusjärjestely oli onnistunut ja rummun ominaisuudet olivat samanlaiset rummun pituussuunnassa. Kuormituksen kaksinkertaistuessa siirtymät kasvoivat yli 2,5-kertaisiksi (kuvat 4.3:15 a ja b). Tämä viittaa betonin kasvavaan mikrohalkeiluun.
- Rummun vastakkaisille pystyseinämillä asennetut venymäanturit antoivat samanlaisia tuloksia kummallakin kuormituskerralla (kuvat 4.3:9 ja 4.3:13). Rummun pohjalla kuormituksen kaksinkertaistaminen aiheutti venymien noin 2,3-kertaisen kasvun (kuvat 4.3:10 ja 4.3:14). Rummun katossa vastaava kuormituksen kasvu lisäsi venymiä noin 2,9-kertaiseksi (kuva 4.3:16). Mikrohalkeilun aiheuttaman epälineaarisen käyttäytymisen todettiin lisääntyvän huomattavasti noin 60–80 kN/m kuormituksella (kuva 4.3:16).

KIRJALLISUUSLUETTELO

Betoniputkinormit 1995 (1995). Suomen kuntatekniikan yhdistys, julkaisu 1, Helsinki. 84 s.

Bomag 2000 [verkkodokumentti] [viitattu 18.12.2000]. Saatavissa:

http://www.bomag.de/english/products/technicaldata/lightequipment/index.asp?T=frame_top.htm&S=~/frame_left.htm&M=index_contents.htm&N=~/~/~/private/navigationbar.htm&L=nav.htm

Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisu nro 223. 214 s.

Kolisoja, P., Järvenpää, I., Mäkelä, E. & Levomäki, M. (2000). Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 5/2000. Ratahallintokeskus, Helsinki. 137 s.

Novotechnik 2000 [verkkodokumentti] [viitattu 10.1.2001]. Saatavissa:

<http://www.novotechnik.com/linear.html>

Rotator 2000 [verkkodokumentti] [viitattu 18.12.2000]. Saatavissa:

<http://www.rotator.fi/levyt.html>

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.

| Mitt. Nro | Pvm | Klo | Junan kulku-suunta | Junan tyyppi | Veturin tyyppi | HUOM ! |
|-----------|--------|-------|--------------------|--------------|----------------|--------------------------------------|
| 1 | 15.10. | 18:15 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 2 | 15.10. | 18:43 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 3 | 15.10. | 18:52 | Tre - Hki | P | Sähkö | Halk. mittaus ulkokiskon alta alkoi |
| 4 | 15.10. | 19:11 | Tre - Hki | T (RR) | | |
| 5 | 15.10. | 21:37 | Tre - Hki | P | | |
| 6 | 15.10. | 22:16 | Tre - Hki | T | | |
| 7 | 15.10. | 22:24 | Tre - Hki | T | | Halk. mittaus ulkokiskon alta loppui |
| 8 | 15.10. | 23:35 | Tre - Hki | Työ | | Ei halkaisijan mittausta |
| 9 | 16.10. | 00:48 | Tre - Hki | T | | Halk. mittaus sisäkiskon alta alkoi |
| 10 | 16.10. | 01:40 | Tre - Hki | T | 3×Diesel | |
| 11 | 16.10. | 01:59 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 12 | 16.10. | 02:21 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 13 | 16.10. | 02:46 | Tre - Hki | T | Diesel | |
| 14 | 16.10. | 03:14 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 15 | 16.10. | 03:23 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 16 | 16.10. | 03:48 | Tre - Hki | T | 3×Sähkö | |
| 17 | 16.10. | 03:57 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 18 | 16.10. | 04:26 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 19 | 16.10. | 05:05 | Tre - Hki | P | Sähkö | Mittauskytkennän vaihto* |
| 20 | 16.10. | 05:42 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 21 | 16.10. | 06:19 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 22 | 16.10. | 06:29 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 23 | 16.10. | 06:41 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 24 | 16.10. | 06:47 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 25 | 16.10. | 07:06 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 26 | 16.10. | 07:26 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 27 | 16.10. | 07:43 | Tre - Hki | H | Sähkö | |
| 28 | 16.10. | 08:03 | Tre - Hki | Työ | | |
| 29 | 16.10. | 08:11 | Tre - Hki | P | Sähkö | |

P = pikajuna, T = tavarajuna, T(RR)= tavarajuna (Rautaruukin Hämeenlinnan tehtaalle menevä kelajuna) H = henkilöjuna ja Työ = työkone

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

| Mitt. Nro | Pvm | Klo | Junan kulku-suunta | Junan tyyppi | Veturin tyyppi | HUOM ! |
|-----------|--------|--------|--------------------|--------------|----------------|--|
| 30 | 16.10. | 08:26 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 31 | 16.10. | 08:32 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 32 | 16.10. | 08:45 | Tre - Hki | T | 2xDiesel | |
| 33 | 16.10. | 08:52 | Tre - Hki | T | 2xDiesel | |
| 34 | 16.10. | 09:52 | Tre - Hki | Työ | | |
| 35 | 17.10. | | Tre - Hki | H | | |
| 36 | 17.10. | | Tre - Hki | P | | |
| 37 | 17.10. | 18:46 | Tre - Hki | P | | |
| 38 | 17.10. | 18:57 | Tre - Hki | P | | Anturi V5 irti |
| 39 | 17.10. | 19:30 | Tre - Hki | T | | |
| 40 | 17.10. | 20:24 | Tre - Hki | P | | Anturi V7 vaihto V10 |
| 41 | 17.10. | 21:24 | Tre - Hki | P | | Halk. mittaus sisäkiskon alta alkoi |
| 42 | 17.10. | 21:35 | Tre - Hki | P | | |
| 43 | 17.10. | 21:44 | Tre - Hki | P | | |
| 44 | 17.10. | ~22:15 | Tre - Hki | T | | |
| 45 | 17.10. | 22:30 | Hki - Tre | P | | Juna itäisellä raiteella |
| 46 | 17.10. | 22:31 | Tre - Hki | T | | |
| 47 | 17.10. | 22:45 | Hki - Tre | P | | Juna itäisellä raiteella |
| 48 | 17.10. | 22:55 | Hki - Tre | P | | Juna itäisellä raiteella |
| 49 | 17.10. | ~23:00 | Tre - Hki | P | | |
| 50 | 17.10. | 23:10 | Hki - Tre | T | | Juna itäisellä raiteella |
| 51 | 17.10. | 23:45 | Tre - Hki | P | | Halk. mittaus ulkokis. alk. ja V8 →V2; V9→V3 |
| 52 | 18.10. | 00:24 | Hki - Tre | P | | Juna itäinen raide; V10→Ch2/kone2; V4 →V1; V10→V7; V5→V11 |
| 53 | 18.10. | 00:35 | Tre - Hki | T | | V1 →V4; V11→V5 |
| 54 | 18.10. | 01:27 | Tre - Hki | T | Diesel | |
| 55 | 18.10. | 01:40 | Tre - Hki | T | Diesel | |
| 56 | 18.10. | 02:36 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 57 | 18.10. | 03:03 | Tre - Hki | T | | |

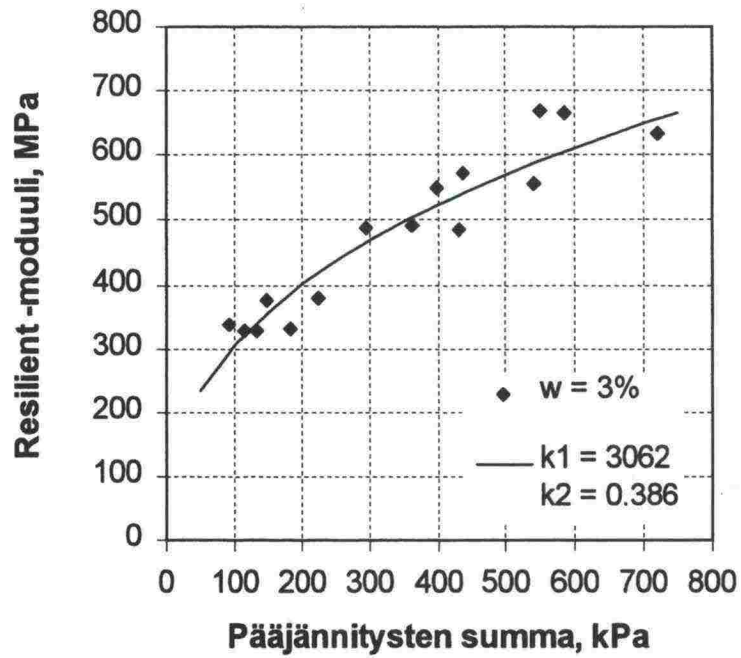
P = pikajuna, T = tavaraajuna, T(RR)= tavaraajuna (Rautaruukin Hämeenlinnan tehtaalle menevä kelajuna) H = henkilöajuna ja Työ = työkone

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

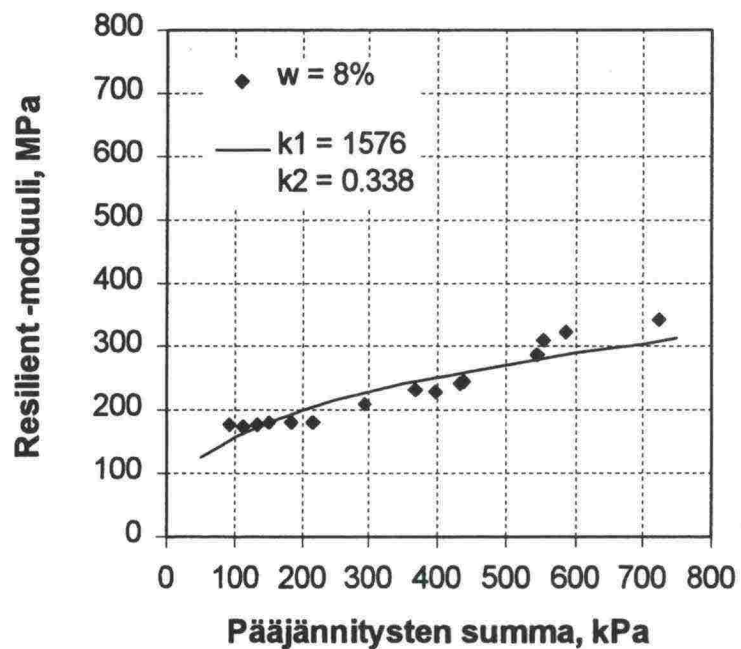
| Mitt. Nro | Pvm | Klo | Junan kulku-suunta | Junan tyyppi | Veturin tyyppi | HUOM! |
|-----------|--------|-------|--------------------|--------------|----------------|-------|
| 58 | 18.10. | 03:22 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 59 | 18.10. | 03:36 | Tre - Hki | T | Diesel | |
| 60 | 18.10. | 03:41 | Tre - Hki | T | | |
| 61 | 18.10. | 03:59 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 62 | 18.10. | 04:16 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 63 | 18.10. | 04:28 | Tre - Hki | T | Diesel | |
| 64 | 18.10. | 04:47 | Tre - Hki | T | | |
| 65 | 18.10. | 05:05 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 66 | 18.10. | 05:31 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 67 | 18.10. | 05:43 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 68 | 18.10. | 06:17 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 69 | 18.10. | 06:30 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 70 | 18.10. | 06:44 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 71 | 18.10. | 06:52 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 72 | 18.10. | 07:09 | Tre - Hki | T | Sähkö | |
| 73 | 18.10. | 07:45 | Tre - Hki | H | Sähkö | |
| 74 | 18.10. | 07:55 | Tre - Hki | V | Sähkö | |
| 75 | 18.10. | 08:13 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 76 | 18.10. | 08:27 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 77 | 18.10. | 08:39 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 78 | 18.10. | 08:44 | Tre - Hki | P | Sähkö | |
| 79 | 18.10. | 09:14 | Tre - Hki | T | Diesel | |

P = pikajuna, T = tavarajuna, T(RR)= tavarajuna (Rautaruukin Hämeenlinnan tehtaalle menevä kelajuna) H = henkilöjuna, Työ = työkone ja V = veturi

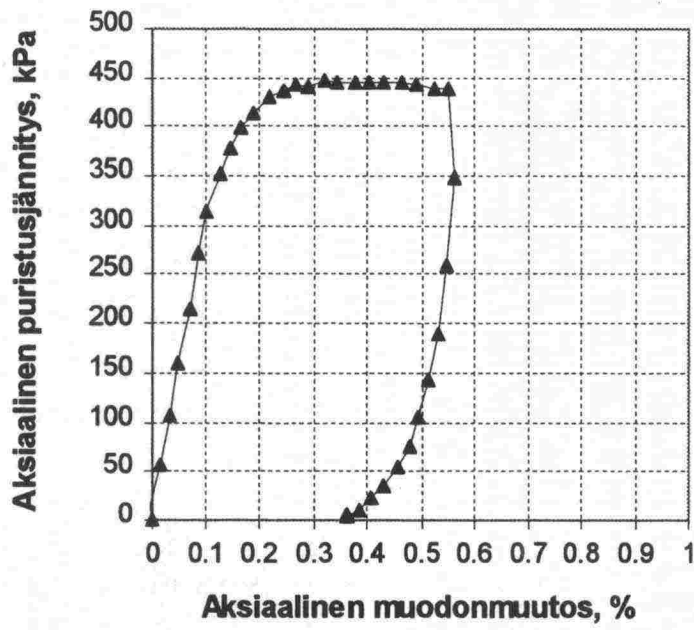
* Pölkyn yläpinnan venymää mitannut anturi korvasi maanpaineanturin nro 26, rummun kehän suuntainen venymäanturi nro 8 korvasi toisen vastaavan venymäanturin nro 2 ja rummun kehän suuntainen venymäanturi nro 9 korvasi vastaavasti toisen samanlaisen venymäanturin nro 3. Rummun pituussuuntaiset venymäanturit nro 1 ja 11 rumpujen välillä korvattiin vastaavilla antureilla nro 4 ja 5 toisessa saumassa. Instrumenttien numerointi ja sijainti radassa on esitetty kappaleissa 2.4 ja 3.3.



Kuva L2:1 Syklisen kolmiakselikokeen tulos noin 3 % vesipitoisuudessa olevalle pengertäytemateriaalille.

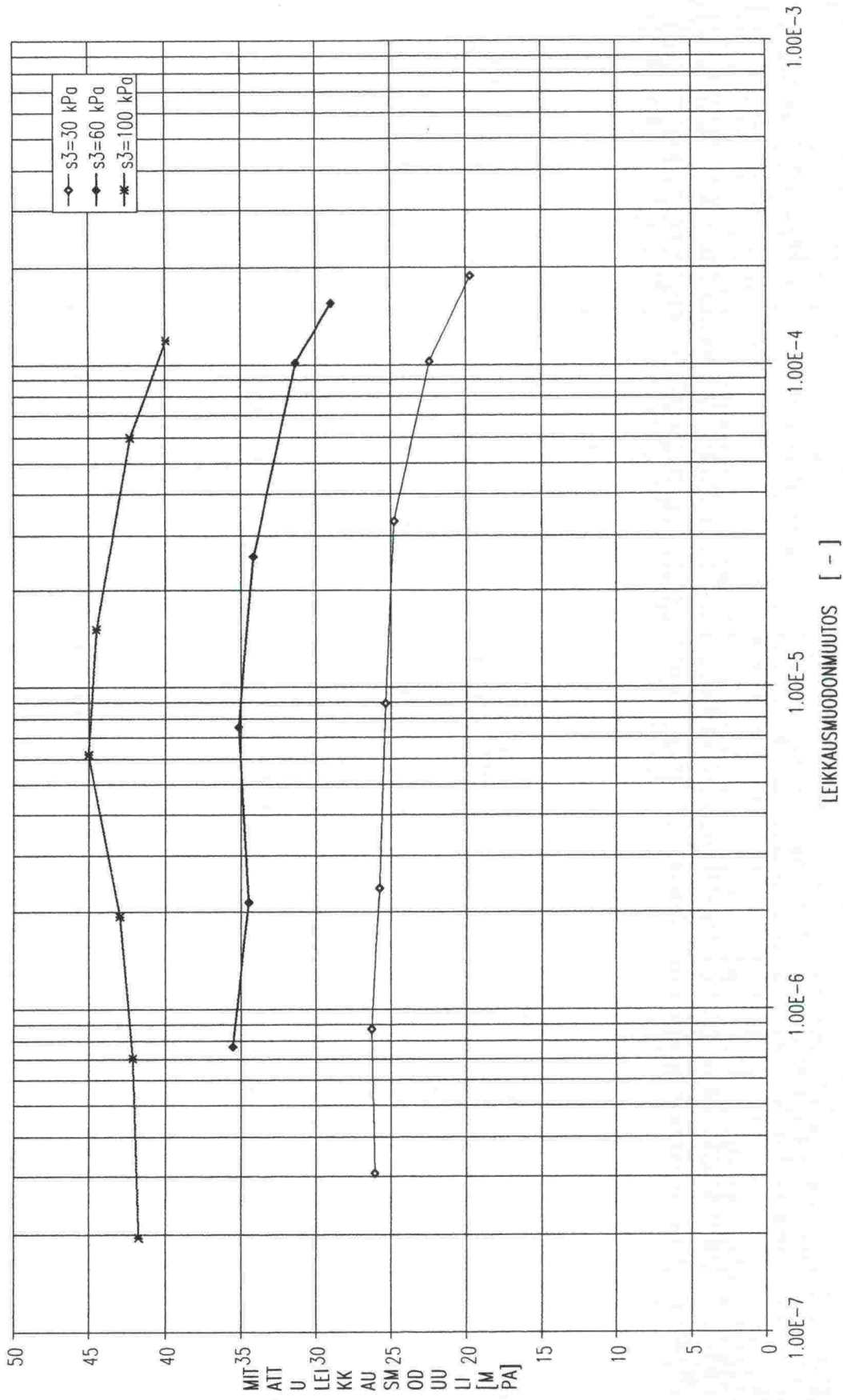


Kuva L2:2 Syklisen kolmiakselikokeen tulos veden kyllästämälle pengertäytemateriaalille.



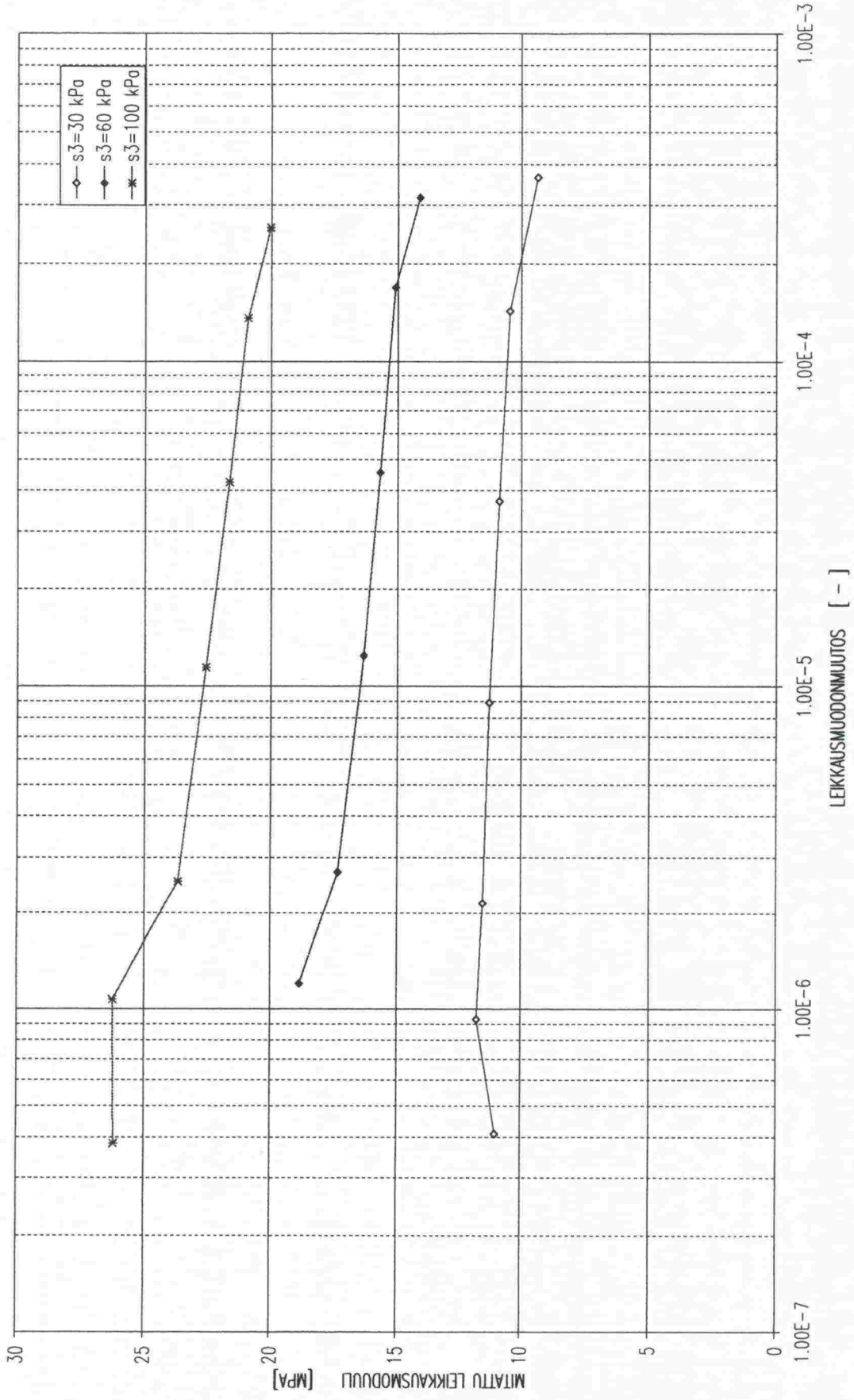
Kuva L2:3 Staattisen kolmiaksaalikokeen tulos noin 3 % vesipitoisuudessa olevalle pengertäytemateriaalille.

104_rc1/(syv 83.9-83.7 m)



Kuva L3:1 Leikkausmoduulin vaihtelu kuivakuorisavesta korkeustasolta 83,9 – 83,7 m pohjamaasta otetulla näytteellä.

104_rc2/(syv 82.6-82.4 m)



Kuva L3:2 Leikkausmoduulin vaihtelu savesta korkeustasolta 82,6 – 82,4 m pohjamaasta otetulla näytteellä.

- 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 ratahankkeissa
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. Kehittämisvaihtoehtojen vaikutustarkastelut
2/2000 Bantrum, 250 kN och 300 kN axellaster
3/2000 Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus
4/2000 Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään
5/2000 Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
6/2000 Väliraportti 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen ratateknisistä tutkimuksista
7/2000 Intermediate Report, 250 kN and 300 kN axle loads
8/2000 Ratatekniset määräykset ja ohjeet -julkaisun käytettävyydestä tutkimus
9/2000 Ratakapasiteetin perusteet
10/2000 Instrumentation and Modelling of Track Structure, 250 kN and 300 axle loads
11/2000 Rautatieonnettomuuksien sisäiset ja ulkoiset kustannukset
12/2000 Internal and External Costs of Railway Accidents
1/2001 Rataverkko 2020 -suunnitelma
2/2001 XPS-routaeristelevyt ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
3/2001 Raidetutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
4/2001 Radan kunnossapitokustannusten kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
5/2001 Loppuraportti 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen teknisistä tutkimuksista
6/2001 Final Report 250 kN and 300 kN axle loads
7/2001 Rautateiden maanvaraiset pylväsperustukset. Koekuormitusraportti

RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

KUNNOSSAPITOYKSIKKÖ

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 952-445-055-0
ISSN 1455-2604