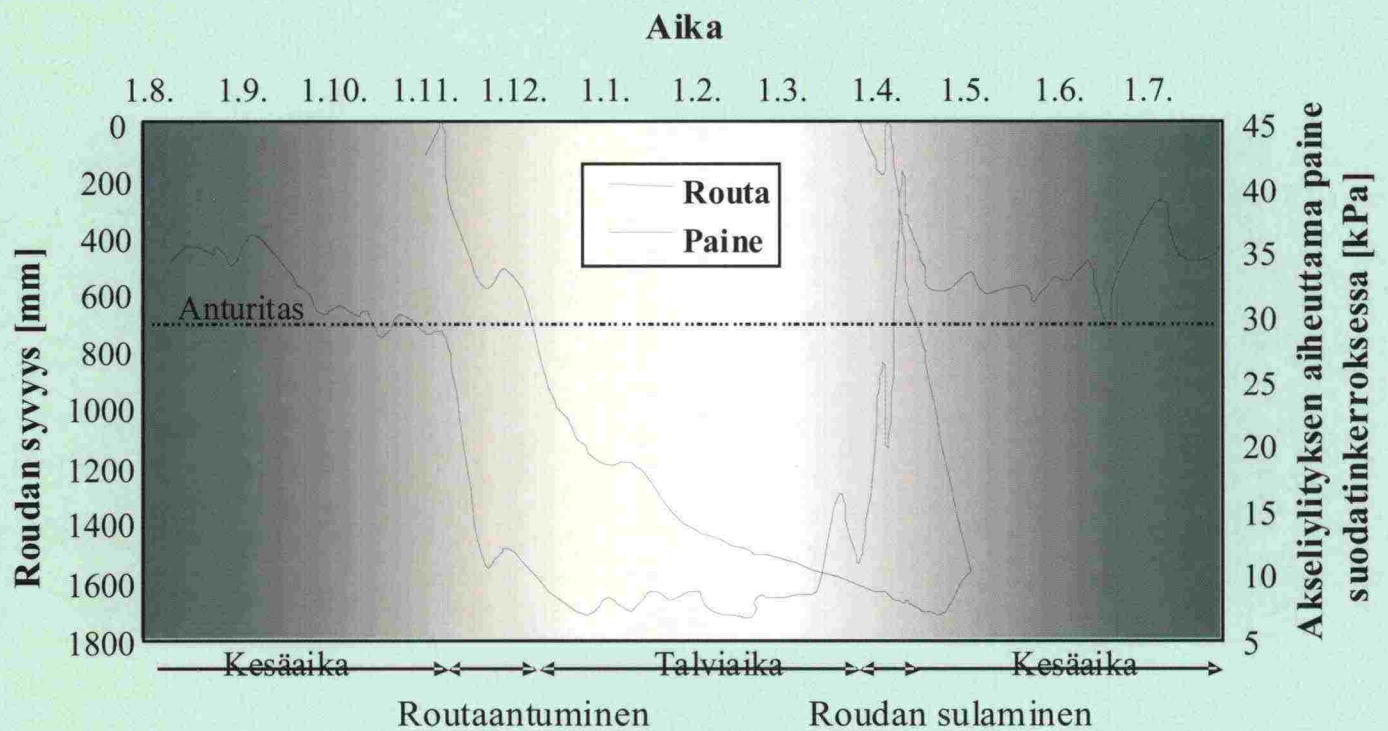


Mika Savolainen, Teuvo Ryyänen, Jouko Belt, Esko Ehrola

Temmeksen koetien tutkimukset 1996-2001

Yhteenvetoraportti

Tiehallinnon selvityksiä 69/2001



Mika Savolainen, Teuvo Ryyänen, Jouko Belt, Esko Ehrola

Temmeksien koetien tutkimukset 1996-2001

Yhteenvetoraportti

Tiehallinnon selvityksiä 66/2001

ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-825-4
TIEH 3200715

Edita Oyj
Helsinki 2001

Julkaisua myy/saatavana:
Tiehallinto, julkaisumyynti
faksi 0204 22 2652
e-mail julkaisumyynti@tiehallinto.fi
www.tiehallinto.fi/julk2.htm

TIEHALLINTO
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 150

Mika Savolainen, Teuvo Ryyänen, Jouko Belt, Esko Ehrola: Temmeksen koetien tutkimukset 1996-2001: Yhteenvetoraportti. Helsinki 2001. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 69/2001. 33 s. ISSN 1457-9871. ISBN 951-726-825-4. TIEH 3200715.

Asiasanat: tierakenne, liikenne, kuormitus, jännitykset, mittausten menetelmät
Aiheluokka: 32

TIIVISTELMÄ

Temmeksen koetiekohteessa on mitattu liikennekuormitusten tierakenteeseen aiheuttamia vasteita ja ympäristöolosuhteita vuodesta 1997 lähtien. Jatkuvat mittaukset aloitettiin toukokuussa 1998. Kesällä 2000 kohteeseen asennettiin laser-etäisyydenmittaukseen perustuva ajotapamittausjärjestelmä. Mittaustuloksia on arkistoitu elokuuhun 2001 mennessä yli 35 gigatavua 80 CD:lle.

Koetietutkimus on tällä hetkellä vaiheessa, jossa mittausten järjestelmän toiminta ja tulosten luotettavuus on varmistettu, mikä on ollut perusedellytys erilaisille pitkäaikaisen mittaustulosten perusteella tehtäville mallinnuksille. Mallinnukset edellyttävät tehokkaita ja luotettavia tulostenkäsittelymenetelmiä, jotta lähtöaineistoista saadaan mahdollisimman kattavia. Esimerkiksi lämpötila- ja ajotapatulokset käsitellään jo tällä hetkellä ohjelmallisesti siten, että jatkuvasti päivitettävän tietokannan ylläpitäminen on suhteellisen vaivatonta. Vastetulosten (paineet, muodonmuutokset ja venymät) käsittely vaatii vielä paljon työtä, koska jokaisen anturin tuloksille on määritettävä oma suodatusmenetelmä. Suodatinkerroksen paineiden tarkastelujen yhteydessä on kuitenkin osoitettu, että myös vastetuloksille on löydettävissä suhteellisen nopea ja vaivaton käsittelymenetelmä.

Temmeksen koetietutkimuksen puitteissa on julkaistu viisi tutkimusraporttia, joista ensimmäisen tarkoituksena oli löytää tutkimuksen kannalta parhaat instrumentit ja dokumentoida niiden toimintaperiaatteet, asennus ja käyttö. Lisäksi työssä esitettiin periaatteellisella tasolla mittausten järjestelmän toiminta. Toisessa ja kolmannessa raportissa keskityttiin tulosten luotettavuuden arviointiin testimittausten perusteella. Neljännessä raportissa osoitettiin ympäristöolosuhtemittausten luotettavuus ja mallinnettiin mm. päällysteen lämpötilaa ja roudan etenemistä tierakenteessa. Viimeisimmässä raportissa tarkasteltiin pitkän ajan painemittaustuloksia ja esiteltiin menetelmä, jolla voidaan määrittää koetiealueen yli ajaneiden ajoneuvojen etuakselimassat. Lisäksi on tehty paljon erilaisia vertailumittauksia (PPL, akselimassamittaukset, ajolinja-anturien kalibrointimittaukset jne.), joiden tuloksia käytetään erilaisiin mittausten järjestelmän ja -tulosten tarkistuksiin ja arviointeihin.

Tähän mennessä tehtyjen tutkimusten perusteella Temmeksen koetiekohteesta on saatavissa hyvin paljon tietoa, jota voidaan käyttää hyväksi uusien, entistä perustelumpien tierakenteen suunnittelu- ja mitoitusmenetelmien kehittämisessä. Tuloksista on luotavissa erittäin kattava lähtöaineisto, jossa on akseli- ja ajoneuvo-kohtaiset tulokset sekä kuormituksista, olosuhteista että tierakenteen vasteista. Tämä mahdollistaa erilaisten tierakenteen kuormituskäyttäytymiseen liittyvien mallien rakentamisen. Mallien pohjalta voidaan simuloida esimerkiksi kuormitus- ja olosuhtemuutosten vaikutuksia tierakenteen rasitukseen ja sitä kautta vaurioitumiseen.

Mika SAVOLAINEN, Teuvo RYYNÄNEN, Jouko BELT, Esko EHROLA: *Temmeksen koetien tutkimukset 1996-2001: Yhteenvetoraportti*. [Temmes Test Road Project 1996-2001: Summation report]. Helsinki 2001. Finnish Road Administration. Finnra Reports 69/2001. 33 p. ISSN 1457-9871. ISBN 951-726-825-4. TIEH 3200715.

Keywords: pavement, heavy vehicle, axle load, stress, measurement, test road

ABSTRACT

Records of environmental conditions at the test road in Temmes and responses of the road structure to traffic loads are available for the whole period since the completion of the road in autumn 1997, and measurements of the driving lines and traffic velocity based on laser sensors were started in summer 2000. The amount of the data collected before August 2001 reaches over 35 gigabytes at 80 compact discs.

Five reports have been published considering the test road in Temmes. The aim of the first study published in 1997 was to find out the most suitable instruments for road structure instrumentation and to document the operating principles, installation and appliance of the instruments. Two followed reports published in 1998 and 1999 dealt with the reliability of the data and operation of the instruments by using data measured in special loading tests arranged in summer 1997 and 1998. The fourth report considered with the environmental conditions and variations between May 1998 and October 1999. Among other things the pavement surface temperatures and the frost penetration depth were modelled. The last study considered with the pressures measured in the sand layer under the sub-base. The main result of the last study was the method for defining the front axle loads. There have also been arranged special tests at the test road, for example with FWD, for getting reference results used when verifying the magnitude of the measured response results.

The measuring system and sensors have proved reliable, which is the basic precondition for using the measurement results. Efficient and reliable methods to process the data are needed to create the databases comprehensive enough. The temperature data, for example, is processed by using software, which makes it quite easy to update the database. When processing the response data a different filtering method is needed for every response instruments used because of the varying noises in signals. It is, however, possible to find methods for processing the response data efficiently, which has been proved by processing the pressure data measured in the sand layer under the sub base.

On the basis of surveys done the Temmes test road provides a good basis for improving the methods for defining the performance of the road structure under various loading and environmental conditions. The measurement results provide a basis for creating a comprehensive and reliable database containing results of loadings, environmental conditions and responses of the road structure from every axle measured. The database makes it possible, for example, to determine the impact of different factors on the critical responses and thereby on the deterioration of the road structure.

ALKUSANAT

Tämä raportti on Oulun yliopiston ja Oulun tiepiirin vuonna 1996 käynnistämän Temmeksen instrumentoitu koetie -tutkimuksen yhteenvetoraportti. Projektia ovat rahoittaneet Oulun ja Lapin tiepiirit sekä Tiehallinto. Temmeksen koetietutkimus on samalla yksi S4:n pääprojektin Tien pohja- ja päällysrakenteen tutkimusohjelman (TPPT) tavoitteita tukemaan perustetuista projekteista. Projektia on ohjannut S4:n johtoryhmän puheenjohtaja tutkimusjohtaja Jukka Isotalo Tiehallinnosta sekä DI Aarno Valkeisenmäki Tieliikelaitoksesta.

Temmeksen koetieltä mitataan automatisoidusti reaaliliikenteen tierakenteeseen aiheuttamia vasteita sekä ympäristöolosuhteisiin ja ajotapatietoihin liittyviä tekijöitä. Koetietutkimuksen tavoitteena on selvittää liikenne- ja ympäristökuormitusten vaikutuksia tierakenteen rasitukseen ja sitä kautta tuottaa perustietoa tierakenteen suunnittelumenetelmien kehittämiseen.

Tässä raportissa esitellään Temmeksen koetiekohteen nykytila ja tehdään tiivis yhteenveto projektin puitteissa kesään 2001 mennessä tehdyistä tutkimuksista ja niistä saaduista päätuloksista.

Raportti on tehty Oulun yliopiston Rakentamisteknologian tutkimusryhmässä. Raportin ovat laatineet DI Mika Savolainen, DI Teuvo Ryytänen, TkL Jouko Belt ja professori Esko Ehrola.

Oulussa lokakuussa 2001

Sisältö

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLTÖ

	9
<u>1 JOHDANTO</u>	11
<u>2 KOETIE</u>	12
2.1 <u>Koetiekohteen sijainti, liikennetiedot ja rakenne</u>	12
2.2 <u>Koetiekohteen instrumentointi</u>	15
2.3 <u>Mittausjärjestelmä</u>	18
<u>3 TEHDYT TUTKIMUKSET</u>	19
<u>4 PÄÄTULOKSIA</u>	21
4.1 <u>Vasteantureiden toiminta</u>	21
4.2 <u>Ympäristötekijät</u>	22
4.3 <u>Ajotapatulokset</u>	25
4.4 <u>Liikennekuormitusten määrittäminen</u>	26
4.4.1 <u>Lähtökohta</u>	26
4.4.2 <u>Suodatinkerroksen paineisiin vaikuttavat tekijät</u>	27
4.4.3 <u>Akselimassan määrittäminen</u>	29
4.5 <u>Vastetulosten vertailu teoreettisiin laskelmiin</u>	32
4.6 <u>Koetierakenteen kunto</u>	33
4.7 <u>Pudotuspainolaitemittaukset</u>	34
<u>5 JOHTOPÄÄTÖKSET</u>	36
<u>LÄHTEET</u>	38

1 Johdanto

Temmeksen koetietutkimus aloitettiin Oulun yliopiston ja Oulun tiepiirin yhteisprojektina vuonna 1996. Varsinaiset vasteiden ja olosuhdetietojen jatkuvat mittaukset ja mittaustulosten arkistointi käynnistettiin toukokuussa 1998. Ajotapamittaus aloitettiin Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa kehitetyllä menetelmällä kesällä 2000. Kuormitusten määrittämiseksi on kehitteillä vastemittaukseen perustuva järjestelmä, jolla akselimassat määritetään käyttämällä pitkäaikaisten mittausten pohjalta luotuja kuormitus-paine -malleja. Arkistoituja mittaustuloksia oli heinäkuussa 2001 yli 35 gigatavun verran 80 CD:llä.

Koetietutkimuksen tavoitteena alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaan oli:

- Selvittää yksittäisten liikennekuormitusten aiheuttamat rasitukset tierakenteessa eri ympäristöolosuhteissa.
- Selvittää liikennekuormitusten ja ympäristötekijöiden vaikutukset tierakenteen rasitusten muutoksiin ja tien vaurioitumiseen eli tierakenteen kuormituskestävyyteen.
- Tuottaa perustietoa tierakenteiden suunnittelumenetelmien kehittämiseen.

Koetietutkimus on tällä hetkellä vaiheessa, jossa mittausjärjestelmän toiminta ja tulosten luotettavuus on varmistettu, mikä mahdollistaa erilaiset mallinnukset pitkäaikaisten mittaustulosten perusteella. Rasitusten mallinnukset edellyttävät tehokkaita ja luotettavia tulostenkäsittelymenetelmiä, jotta lähtöaineistoista saadaan mahdollisimman kattavia. Esimerkiksi lämpötila- ja ajotapatulokset käsitellään jo tällä hetkellä ohjelmallisesti siten, että jatkuvasti päivitettävän tietokannan ylläpitäminen on suhteellisen vaivatonta.

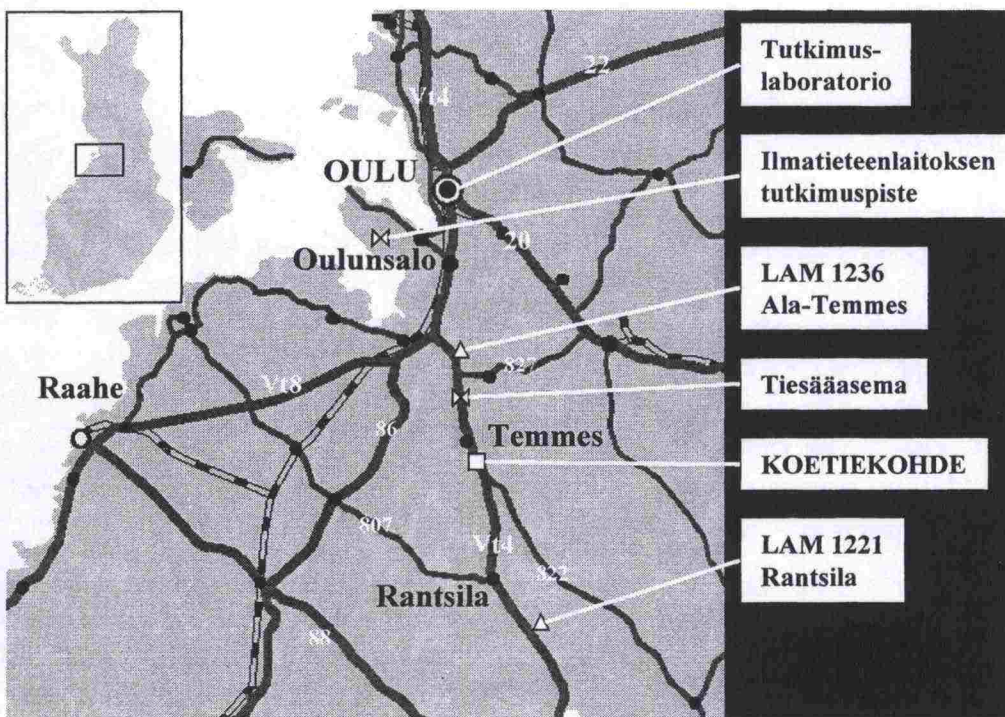
Tierakenteen rasitusten ja vaurioitumisen yhteyden tarkastelu koetietutkimustulosten perusteella voidaan periaatteessa aloittaa vasta, kun vaurioituminen on edennyt riittävän pitkälle. Koska koetierakenteen vaurioituminen on vielä hyvin vähäistä, tähän mennessä mitattuja tuloksia voidaan käyttää kuvaamaan vaurioitumattoman rakenteen toimintaa. Määrittämällä erilaisten kuormitus- ja olosuhdetekijöiden vaikutukset vaurioittoman rakenteen vasteisiin voidaan jatkossa erottaa syntyneiden vaurioiden vaikutukset kuormitus-vaste -suhteisiin.

Tässä raportissa esitellään lyhyesti Temmeksen instrumentoitu koetiekohde ja mittausjärjestelmä sekä sen piirissä kesään 2001 mennessä tehdyt tutkimukset ja niistä saadut päätulokset.

2 Koetie

2.1 Koetiekohteen sijainti, liikennetiedot ja rakenne

Koetiekohte sijaitsee Vt4:llä tieosalla 358 Temmeksen kylätaajaman eteläpuolella noin 50 km Oulusta etelään (kuva 1). Koetien läheisyydessä sijaitsee kaksi liikenteen automaattista mittauspistettä, tiesääasema sekä ilmatieteenlaitoksen tutkimuspiste, joiden tuloksia on käytetty vertailuaineistona pääasiassa mittaustulosten luotettavuuden varmistamiseksi.



Kuva 1. Temmeksen koetiekohteen sijainti.

Koetieosuus sijaitsee tasaisella peltoaukealla, joten sitä eivät varjosta maaston muodot, rakennukset tai puusto. Kaikki mittausanturit on sijoitettu tieosoitteen kasvun suunnassa katsottuna vasemmalle kaistalle eli mittaukset tehdään etelään menevästä liikenteestä. Koetiekohteen keskimääräinen liikennemäärä on hieman alle 4000 ajoneuvoa vuorokaudessa, josta raskasta liikennettä on noin 19 %. Mittaussuunnassa raskaan liikenteen määrä on keskimäärin hieman alle 400 ajoneuvoyhdistelmää vuorokaudessa.

Viimeisimmän akselimassatutkimuksen tulosten perusteella määritettyjen ajoneuvotyyppien kuormitusvastaavuusarvojen mukaan koetien valmistumisesta alkaen (4 vuotta) kertynyt kuormituskertaluku on syksyllä 2001 hieman yli 0,8 miljoonaa. Laskennassa käytettiin kesän 2000 aikana mitattujen koalueen eteläpuolella sijaitsevan Rantsilan LAM-pisteen (1221) tuloksia, joiden perusteella määritettiin keskimääräinen vuorokauden kuormituskertaluku (leveyskerroin 0,5). Kuormitusvastaavuus-

vuuksiin perustuvaa kuormituskertalukua tullaan käyttämään vertailuarvona määrittäessä erilaisia kriittisiin vasteisiin perustuvia rasitussummia, joilla pyritään kuvaamaan liikenteen rasitusvaikutuksia koetiekohteessa.

Koetierakenteeksi on valittu perinteisesti käytetty rakennevaihtoehto, jossa bitumilla sidottujen kerrosten alapuolella on sitomattomista materiaaleista tehty kantava, jakava ja suodatinkerros (taulukko 1). Pohjamaa on hienojakoista ja herkästi routivaa materiaalia, minkä vuoksi routimattomista materiaaleista tehty tierakenne on toteutettu routamitoituksen periaatteita noudattaen lähes kaksi metriä paksuna. [Lämsä, V.P., 1998]

Taulukko 1. Koetierakenteen kerrospaksuudet ja -materiaalit.

Rakennekerros	Paksuus [mm]	Materiaalitunnus
Päällysteen yläosa (kulutuskerros)	50	AB 18 / 120 kg
Bitumilla sidottu kantavan kerroksen yläosa	50	ABK 14 / 120 kg
Kantava kerros	250	KaM 0/55 mm
Jakava kerros	350	KaM 0/100 mm
Suodatinkerros	1230	Hk
Pohjamaa	-	hkSi
Rakennekerrokset yhteensä	1930	

Instrumentoitu koetie on sijoitettu parantamistoimenpiteiden kohteena olleelle tieosuudelle, jossa muutettiin myös väylän linjausta. Linjauksen siirtyminen aikaisemmin rakentamattomaan kohtaan mahdollisti uusien materiaalien käytön koko tierakenteen syvyydellä. Koetiealueella kantavana kerroksena on sitomaton # 0-55 mm kalliomurske, kun muulla parannetulla tieosuudella kantava kerros on tehty stabiloituna kuonahiekan ja sementin avulla sekä vahvistettu teräsverkolla. Toisena erona on muuhun tierakenteeseen verrattuna koealueen 20 mm paksumpi ABK-kerros. Perusteluna päällystevahvuuden kasvattamiselle on ollut suojella päällysteen alapintaan ja kantavaan kerrokseen asennettavia antureita asennuksen aikaisilta vaurioilta. [Lämsä, V.P. 1998]

Koealueeksi valittiin noin 80 metriä pitkä tieosuus, vaikka mittausinstrumentteja sijoitettiin vain 14 metrin pituiselle matkalle. Instrumentoinnin etu- ja takapuolella on noin 30 metriä pitkä antureista vapaa alue. Tarkoituksena on ollut varmistaa, että instrumentoidulla alueella oleva ajoneuvo on kokonaisuudessaan rakenteeltaan homogeenisella rakenneosuudella. [Lämsä, V.P. 1998]

Sidottujen kerrosten ominaisuuksien määrittämiseksi Oulun yliopiston tie- ja liikenteetekniikan laboratoriossa on tehty kokeita rakentamisen jälkeen koealueelta otetuista poranäytteistä. Päällystekerrosten erilaisuudesta johtuen niitä on laboratoriokokeissa käsitelty kahtena eri materiaalina. Tien keskilinjalta otettuja poranäytteitä on käsitelty normaalin näytteenkäsittelymenettelyn mukaisesti saumanäytteinä ja ajokaistan reunaviivan kohdalta otettuja poranäytteitä kaistanäytteinä. Kaikki suoritettavat kokeet on tehty asfalttinenormien määrittelemillä tavoilla, päällystealan neuvotelukunnan (PANK ry) hyväksymiä näytteenotto, näytteenkäsittely- ja koeistumenetelmiä käyttäen. Testattujen materiaaliominaisuuksien perusteella päällystämateriaalit täyttävät normien kyseisille päällystetyypeille asettamat vaatimukset (taulukko 2). [Lämsä, V.P. 1998]

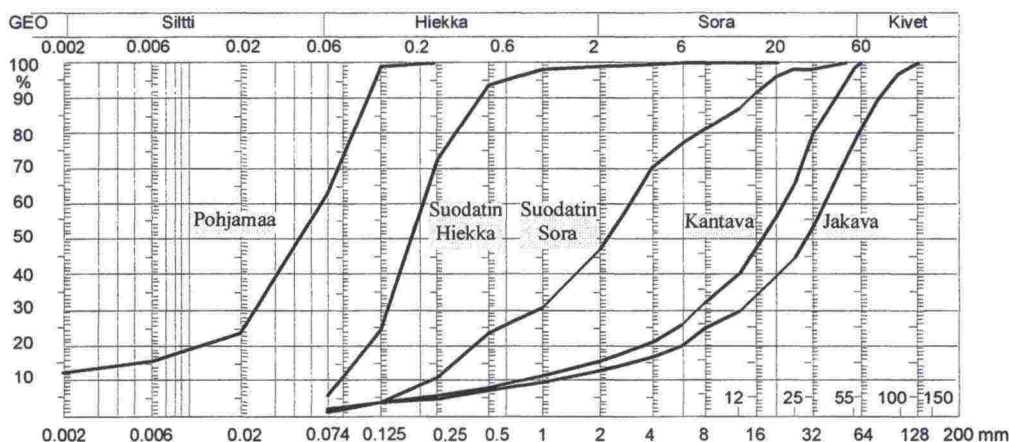
Taulukko 2. Koetierakenteen päällysteestä testatut materiaaliominaisuudet.

Suoritettu koeistus	Keskilinjan näytteet		Reunalinjan näytteet	
	yläosa	alaosa	yläosa	alaosa
Rakeisuus	-	-	-	-
AB-päällysteen tiheys PANK-4110 (kg/m ³)	2755	2324	2805	2346
AB-massan tiheys PANK-4109 (kg/m ³)	2869	2411	2869	2411
Tyhjätila PANK-4114 (%)	4.0	3.6	2.2	2.7
Sideainepitoisuus PANK-4101 (%)	5.75	5.79	5.74	5.75
Halkaisuvetolujuus +10 °C PANK-4202 (kPa)	1635.1	1652.7	1659.1	1663.9
Jäykkyysmoduuli +15 °C TIE-434 (MPa)	5057	4170	-	-

Kantavan ja jakavan kerroksen materiaaleille on tehty murskauksen suorittaneen urakoiijan ja tielaitoksen maa-aineslaboratorion toimesta murskauksen laadunvalvonnan yhteydessä rakeisuusmäärittämiä sekä kiviainestutkimuksia (taulukko 3, kuva 2). Suodatinkerroksen ja pohjamaan rakeisuudet määritettiin rakennusvaiheessa otetuista näytteistä (kuva 2).

Taulukko 3. Murskauksen laadunvalvonnan yhteydessä kantavan ja jakavan kerroksen materiaaleille tehdyt tutkimukset ja materiaaliominaisuudet.

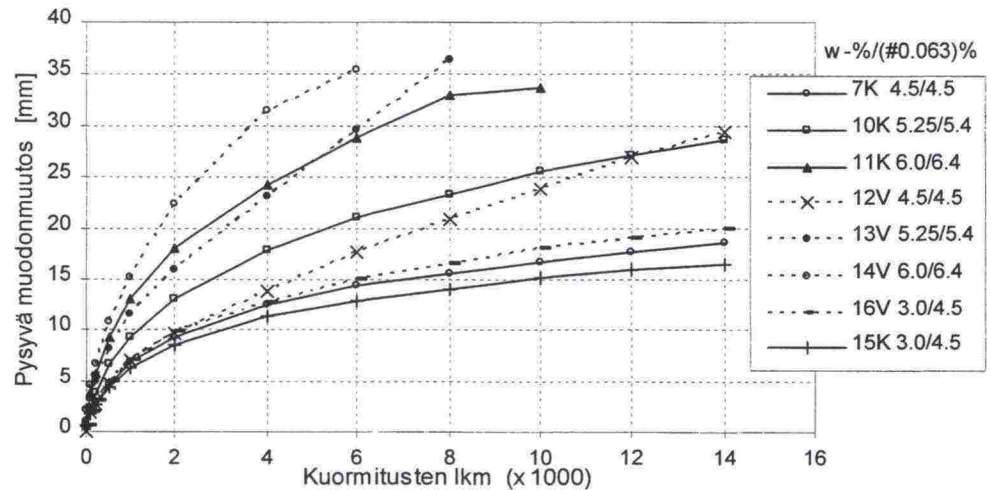
Materiaaliominaisuus	Kantava kerros KaM 0/55	Jakava kerros KaM 0/100
Tiheys TIE 235 (t/m ³)	2.65	2.62
Los Angeles-luku TIE 231 (%)	25.6	26.4
Kuulamylyarvo PANK 2208 (%)	16.3	-
Lujuusluokka	IV	IV
E-moduuli (MN/m ²)	285	260



Kuva 2. Koetien materiaalien rakeisuudet.

Kantava kerroksen murskeen muodonmuutoskäyttäytymistä on tutkittu Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa kehitetyn tierakenteen tutkimuslaitteen (TKT-laite) avulla. Tutkimuksessa verrattiin koetierakenteessa käytetyn Ketunmaan murskeen pysyvien muodonmuutosten kehittymistä kevätolosuhteissa toisen, geologisten arvioiden mukaan huonomman murskeen vastaaviin arvoihin (kuva 3). Pysyvät muodonmuutokset kehittyivät hitaammin koetiekohteessa käytetyillä

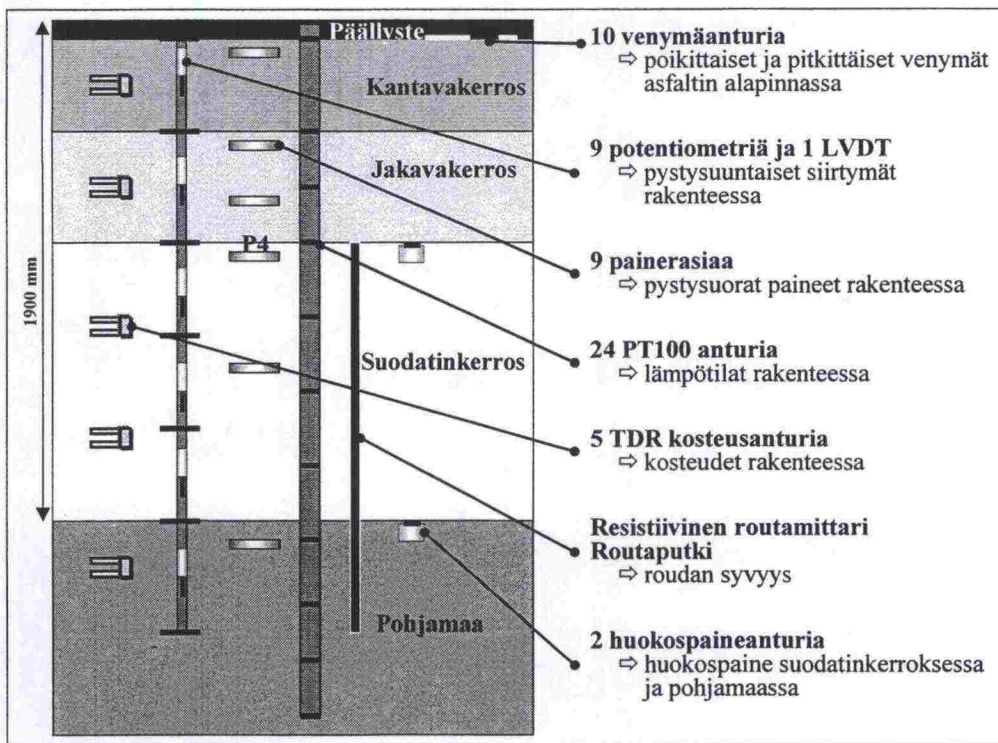
materiaalilla kuin vertailumurskeella. Geologien tekemien arvioiden mukaan koetiekohteessa käytetty murske on rakennustekniseltä laadultaan tyydyttävää. Kantavan kerroksen murskeen muodonmuutuskäyttäytymisestä kerrotaan tarkemmin lähteessä 1. [Belt J. ym. 2000]



Kuva 3. TKT-testeillä määritetyt kantavan kerroksen yläpinnan pysyvät muodonmuutokset Vittakankaan (V) ja Ketunmaan (K) murskeilla erilaisilla kosteus- ja hienoainespitoisuuksilla. [Belt, ym. 2000]

2.2 Koetiekohteen instrumentointi

Koetiehen asennettiin tien rakentamisen yhteydessä yhteensä 65 liikennekuormituksen synnyttämiä vasteita ja vallitsevia ympäristöolosuhteita mittaavaa instrumenttia (kuva 4). Osa Instrumenteista on kärsinyt vaurioita rakennusaikana ja myöhemmin materiaalin liikkumisesta yms. syistä johtuen, mutta suurin osa antureista toimii edelleen. [Sikiö, J. 1999]

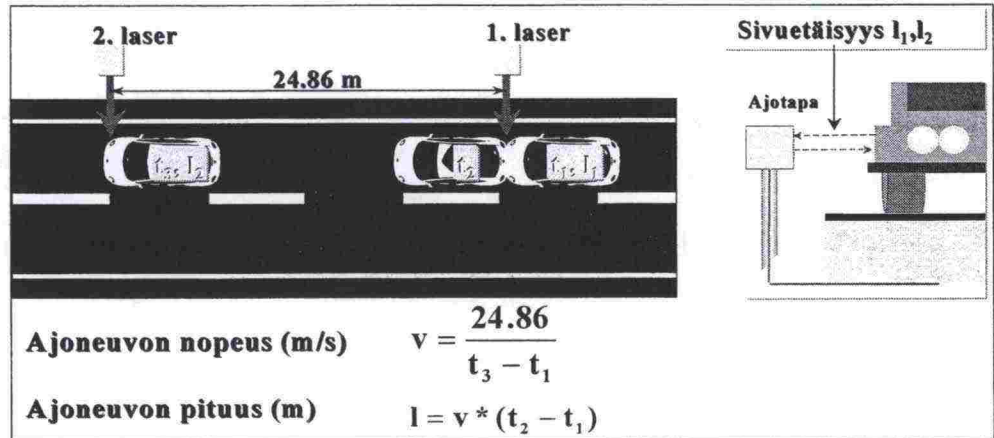


Kuva 4. Antureiden sijainti koetierakenteessa.

Mittausanturit jakaantuvat kolmeen pääluokkaan; liikenteen kuormitusvaikutuksia, olosuhdetekijöitä ja ajotapatekijöitä mittaaviin antureihin. Liikennekuormituksen tierakenteeseen aiheuttamia kuormitusvaikutuksia mitataan siirtymä-, paine- ja venymäantureilla. Olosuhdetekijöitä mittaavia antureita ovat lämpötila-, routa-, kosteus- ja huokospaineanturit sekä pohjaveden korkeusanturit. Ajotapa-antureina toimivat laser -etäisyydenmittausanturit, joiden avulla määritetään koealueen ylittäneiden ajoneuvojen nopeus, pituus ja ajolinja.

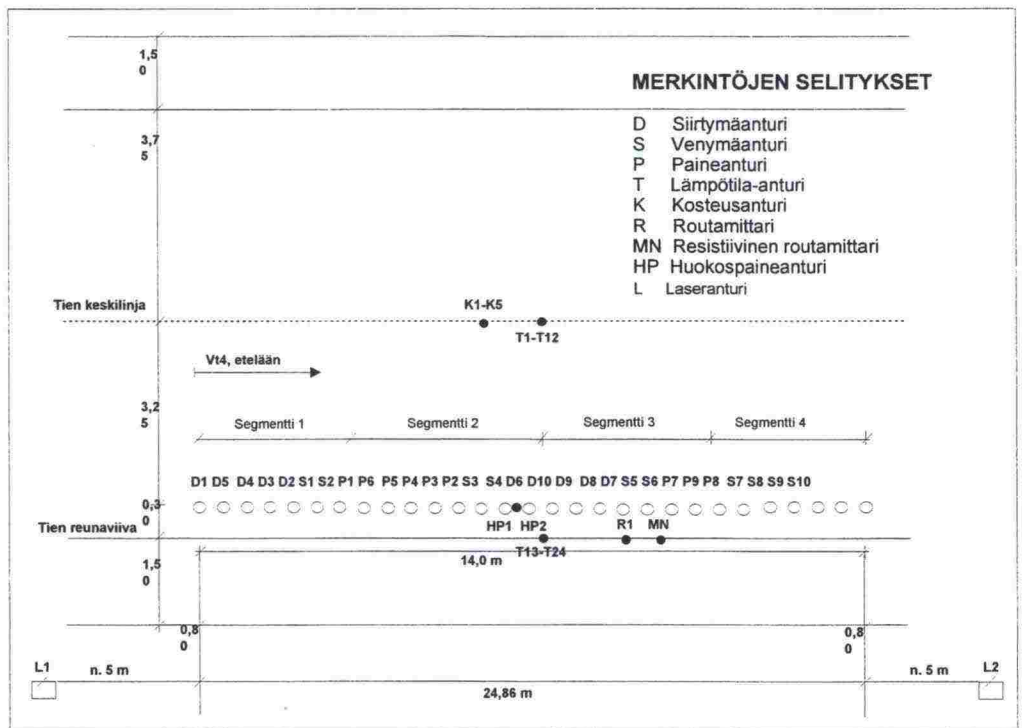
Siirtymä-, venymä- ja paineantureilla voidaan mitata yhtäältä koetiekohteen ylittävän yksittäisen ajoneuvon tierakenteeseen synnyttämät palautuvat muodonmuutokset ja jännitykset sekä toisaalta toistuvien kuormitusten synnyttämät pysyvät muutokset tierakenteessa ja sen toiminnassa. Havaittavat pitkäaikaiset muutokset ovat yhteydessä tierakenteen väsymiseen ja vaurioitumiseen, joita puolestaan seurataan tiekohteessa kunto- ja vauriomittauksilla. Ympäristötekijöitä mittaavilla antureilla saadaan tietoa olosuhteiden vaikutuksista tierakenteen kuormituskäyttäytymiseen. Yhdistämällä em. mittauksiin ajotapamittaus saadaan mukaan myös kuormituksen sijainti ja kuormitusaika, jolloin saadaan tarkempi kuva kuormitusten vaikutuksista.

Laser-etäisyydenmittaukseen pohjautuva ajotapamittausjärjestelmä asennettiin koetiekohteeseen kesällä 2000. Järjestelmän avulla voidaan määrittää ohittaneiden ajoneuvojen ajolinja, nopeus sekä pituus (kuva 5). Käytetty ajotapamittausjärjestelmä on osoittautunut toimivaksi ja siitä saatavat tulokset ovat kalibrointien ja pitkäaikaisen mittaustulosten alustavan tarkastelun perusteella luotettavia.



Kuva 5. Ajoneuvon nopeuden, pituuden ja ajolinjan määrittäminen ajotapamittauslaitosten perusteella.

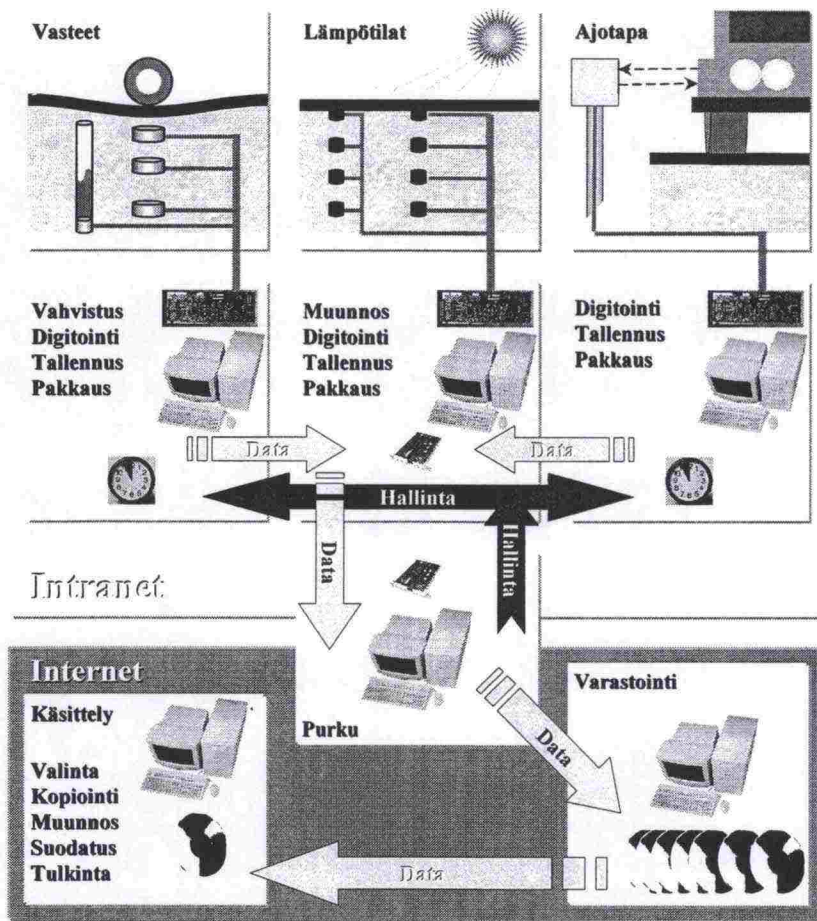
Vasteanturit ja huokosveden painetta mittaavat anturit on sijoitettu koetiekohteeseen puolen metrin välein noin 50 cm:n etäisyydelle reunaviivasta eli oletetun keskimääräisen oikean pyöräraun kohdalle (kuva 6). Lämpötila-anturit on asennettu sekä reuna- että keskiviivan kohdalle. Kosteusanturit on sijoitettu tien keskiviivan ja routamittausanturit reunaviivan kohdalle.



Kuva 6. Antureiden sijainti koetiealueella.

2.3 Mittausjärjestelmä

Koetiekohteessa on tehty suuri määrä mittauksia ja tehdään edelleen. Tämän vuoksi mittausten, mittaustiedon tallennuksen sekä käsittelyn automatisointi on ollut perusedellytys mittaustoimintojen ja tulosdatan hallitsemiseen. Kaikki liikennekuormitusten vaikutuksia mittaavat anturit sekä ajotapa-anturit ovat automatisoinnin piirissä (kuva 7). Ympäristötekijöitä mittaavista antureista osa joudutaan hoitamaan manuaalisesti. Automatisoitujen mittausten piirissä olevat tulokset pakataan ja siirretään kerran vuorokaudessa Oulun yliopistolle, jossa tiedot puretaan ja arkistoidaan viikoittain. Varsinainen tulosten käsittely tehdään arkistoitujen tulosten pohjalta.



Kuva 7. Mittausjärjestelmän toimintaperiaate.

Mittausjärjestelmä tuottaa jatkuvasti erittäin suuren määrän tietoa, jonka käsittely ja arkistointi edellyttävät jatkuvaa kehitystä siirto- ja tallennuskapasiteetin kasvaessa. Mittaustiedon käsittelyn yhtenä tärkeänä periaatteena on, että mittaustietoa suodatetaan mahdollisimman vähän ennen arkistointia. Tulokset pyritään siirtämään ja arkistomaan mahdollisimman täydellisinä, jotta mitään myöhemmin ehkä tärkeäksi havaittavaa tietoa ei kadotettaisi. Tulosten "raskaampi" suodatus tehdään vasta varsinaisen käsittelyn yhteydessä. [Savolainen, M. ym. 2000]

3 Tehdyt tutkimukset

Koetiekohteen puitteissa on tehty runsaasti työtä, jonka tulokset on koottu viiteen tutkimusraporttiin. Kolme ensimmäistä tutkimusta keskittyivät pääasiassa itse mittausjärjestelmän kehittämiseen ja kalibrointiin sekä tulosten luotettavuuden arviointiin. Kun tulosten luotettavuus tiettyjen anturien osalta saatiin varmistettua, on kahdessa viimeisimmässä tutkimuksessa voitu mallintaa pitkäaikaisista mittauksista saatujen tulosten avulla tierakenteen toimintaan ja olosuhteisiin liittyviä tekijöitä.

Ensimmäisessä tutkimusraportissa "Tierakenteen instrumentointi" (Kilponen, A. 1996) käsiteltiin kirjallisuustutkimuksena tierakenteen toimintaa teoreettisesti mittausten ja instrumentoinnin kannalta. Työssä esiteltiin dokumentoituja ja toteutettuja tapoja mitata liikennettä sekä tierakenteen toimintaa erilaisten liikenne- ja ympäristökuormitusten vallitessa. Työn tarkoituksena oli löytää tutkimuksen kannalta parhaat instrumentit ja dokumentoida niiden toimintaperiaatteet, asennus ja käyttö. Lisäksi työssä esitettiin periaatteellisella tasolla mittausjärjestelmän toiminta. [Kilponen, A. 1997]

Raportissa "Instrumentoidun tierakenteen mittaus- ja tutkimussuunnitelma" (Lämsä, V. P. 1998) esiteltiin koetierakenteelle tehdyt ja tehtävät materiaalitutkimukset ja tarkasteltiin erillismittausten avulla instrumentoinnin asennuksen onnistumista sekä verrattiin testimittauksista saatuja tuloksia teoreettisilla laskelmilla saatuihin arvoihin. Tutkimuksessa esitettiin lisäksi ensimmäinen versio toimivasta mittausjärjestelmästä (mittaus, tallennus, tiedonsiirto ja -arkistointi) sekä laadittiin koetiekohteen vaurioinventointisuunnitelma. [Lämsä, V.P. 1998]

Seuraavassa tutkimuksessa "Temmeksen instrumentoidun koetien havaintomittaukset" (Sikiö, J. 1999) tarkasteltiin mittaustulosten luotettavuutta ja instrumenttien toimintaa yhdeksänä päivänä kesän 1998 aikana tehdyistä testimittauksista saatujen tulosten avulla. Testeissä muutettiin ajoneuvon akselikuormia, ajolinjaa ja -nopeutta, millä pyrittiin selvittämään eri tekijöiden vaikutuksia liikennekuormitusten aikaansaamiin vasteisiin. Tuloksia verrattiin myös teoreettisilla laskelmilla saatuihin arvoihin. [Sikiö, J. 1999]

Raportissa "Instrumentoidun tierakenteen mittaukset: Ympäristötekijät" (Ryynänen, T. 2000) käsiteltiin lämpötiloja, pohjaveden asemaa, huokospaineita, rakennekerrosten kosteutta ja routaa. Lämpötilojen osalta mittausjärjestelmä ja tulokset todettiin luotettaviksi vertaamalla lämpötiloja aiempiin tutkimuksiin sekä ilmatieteen laitoksen mittauksiin. Päällysteen pintalämpötila mallinnettiin ilman lämpötilan sekä auringon säteilyn vuosi- ja päivävaihtelun avulla. Tutkimuksessa määritettiin päällysteen tarkka lämpötilajakauma koko vuoden ajalta. Jakauman perusteella voidaan määrittellä tarkasti mm. suunnittelu- ja mitoituskäytäntöä varten halutut lämpötilajaksot, joiden perusteella päällysteen jäykkyys määräytyy. Ympäristötekijätutkimukseen liittyen tehtiin lisäksi erillisselvitys, jonka puitteissa mallinnettiin päällysteen keskimääräinen lämpötila mitatun pintalämpötilan perusteella. Roudan syvyys mallinnettiin rakenteesta mitattujen lämpötilojen avulla. Mallin tekijöinä käytettiin pakkasmäärää ja maalajivakiota. [Ryynänen, T. 2000]

Viimeisimmässä koetiekohdetta koskevassa tutkimusraportissa ”Liikennekuormitusten määrittäminen tierakenteen vasteiden avulla” (Savolainen, M. ym. 2001) tarkasteltiin liikennekuormitusten suodatinkerroksen yläosaan aiheuttamia paineita ja niihin vaikuttavia ympäristö- ja ajotapatekijöitä (routa, päällysteen lämpötila, ajoneuvon ajolinja) pitkäaikaisten mittausten pohjalta. Tutkimuksen yhteydessä kehitettiin painemittaustulosten käsittelymenetelmä, jolla voitiin suhteellisen nopeasti muodostaa laaja lähtöaineisto, mikä mahdollisti erilaiset tilastolliset tarkastelut. Liittämällä painemittausten pohjalta tehtyyn aineistoon olosuhde- ja ajotapatiedot voitiin mallintaa mitattujen tekijöiden vaikutukset paineisiin ja luoda menetelmä, jolla voidaan määrittää mitatun paineen aiheuttaneen yksikköpyöräkuormituksen suuruus eli akselimassa. [Savolainen, M. ym. 2001]

Lisäksi koetiekohteessa on tehty tierakenteen vaurioiden inventointi kaksi kertaa vuodessa sekä erilaisia vertailumittauksia mm. pudotuspainolaitteen avulla. Koetierakenteen kuntoa on seurattu profilometrimittauksilla, vaaituksilla sekä inventoimalla päällysteen vauriot. Vaurioinventoinnin ja mittaustulosten tulkinnan on tehnyt jokaisella kerralla sama henkilö, millä on pyritty varmistamaan tulosten vertailukelpoisuus. Pudotuspainomittauksia on tehty viimeisen kerran syksyllä 1999.

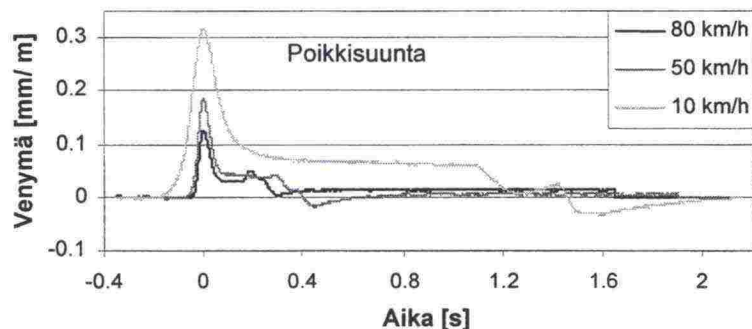
4 Päätuloksia

4.1 Vasteantureiden toiminta

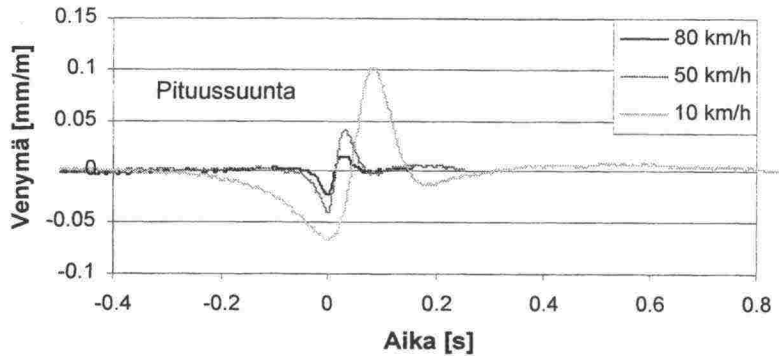
Mittausinstrumenttien toimintaa on tarkasteltu vuosien 1997 ja 1998 aikana tehtyjen testimittaus tulosten perusteella. Testimittauksissa ajettiin koetiealueen yli tunnetuilla kuormilla erilaisissa olosuhteissa varioimalla kuormituksen nopeutta ja sijaintia. Saatuja mittaus tuloksia verrattiin KenLayer -ohjelmalla Temmeksen rakennetta vastaavalle oletusrakenteelle laskettuihin teoreettisiin arvoihin sekä aiemmissa tutkimuksissa saatuihin vastaaviin tuloksiin.

Heti asentamisen jälkeen tehtyjen testimittauksen perusteella paine-, venymä-, huokospaineanturien ja pohjaveden pintaa mittaavan anturin todettiin toimivan erittäin hyvin ja niiden antamien signaalien olevan selkeitä. Muodonmuutosantureista antoi normaalin signaalin neljä anturia kymmenestä. Teoreettisesti lasketut ja mitatut paineet koko rakenteessa vastasivat yleisesti aika hyvin toisiaan. Kantavan kerroksen yläosasta mitatut palautuvat muodonmuutokset olivat 1.3-2.4 -kertaisia verrattuna laskettuihin arvoihin. Päällysteen alapinnalta mitatut palautuvat venymät olivat 0.54-0.87 -kertaisia verrattuna laskettuihin arvoihin. [Lämsä, V.P. 1998, Sikiö, J. 1999]

Kesän 1998 aikana tehtyjen havaintomittauksen tulokset osoittivat mittausjärjestelmän toimivan hyvin ja tulosten olevan aiempien teorioiden ja tutkimustulosten mukaisia. Päällysteen lämpötilan vaikutus paineeseen pieneni siirryttäessä alaspäin rakenteessa. Ajonopeuden kasvu pienensi sekä mitattuja paineita että venymiä (kuvat 8 ja 9). Pyörämässän kasvu kasvatti mitattuja paineita ja venymiä. Ajolinjalla oli suuri vaikutus kaikkiin mitattuihin vasteisiin. Suurimmat vasteet mitattiin, kun pyörä kulki tarkalleen anturin yläpuolelta. Ajolinja vaikutti eniten rakenteen yläosasta mitattuihin vasteisiin. Yksikköpyörän ja paripyörän vaikutus vasteisiin tuki myös teoriaa. Paripyörä jakoi kuormitukset laajemmalle alueelle kuin yksikköpyörä. Paripyörällä painehuiput olivat pienempiä ja painekuvion leveydet tien poikkisuunnassa olivat suurempia kuin yksikköpyörällä. Suodatinkerroksessa ja sitä alempana rakenteessa rengastuksen vaikutus paineeseen oli vähäinen. [Sikiö, J. 1999]



Kuva 8. Akseliylityksen aikana mitatut päällysteen alapinnan poikkisuuntaiset venymät eri ajonopeuksilla. Akselimassa 7000 kg.



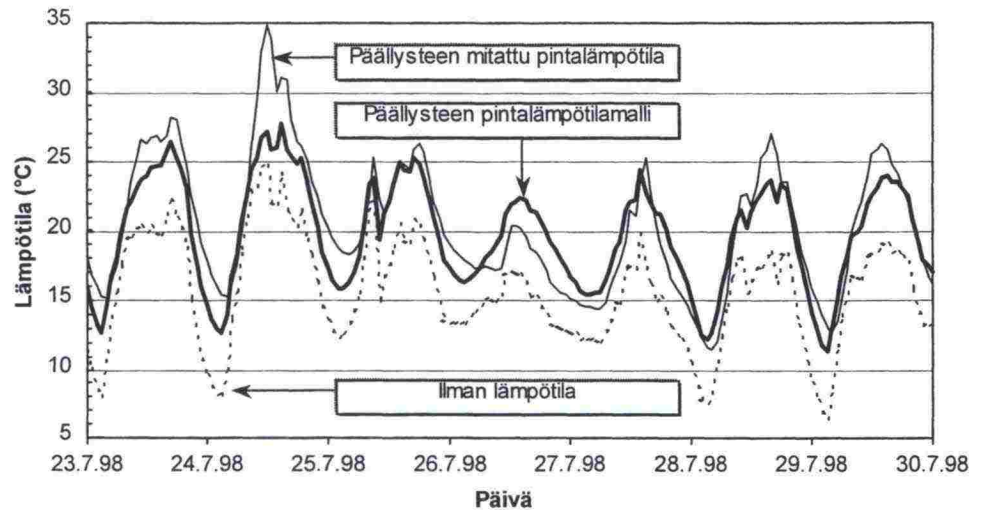
Kuva 9. Akseliylityksen aikana mitatut päällysteen alapinnan pituussuuntaiset venymät eri ajonopeuksilla. Akselimassa 7000 kg.

Jatkossa on tarkoitus tehdä anturien toimintakunnon ja pitkäaikaisten vastemuutosten selvittämiseksi tarkastelu, johon valitaan tulokset yhdeltä vuorokaudelta jokaiselta kuukaudelta mittausten alusta nykyhetkeen. Näin saadaan esiin esimerkiksi eri anturien antamien tulosten lepotasojen ja kuormitusten aiheuttamien vasteiden vuodenaikavaihtelut. Alustavissa pitkäaikaisiin mittauksiin perustuvissa tarkasteluissa on esimerkiksi havaittu, että testimittausten perusteella oletetut epäloogisuudet palautuvissa muodonmuutostuloksissa voidaan ainakin osittain selittää sitomattomissa kerroksissa tapahtuneiden muutosten avulla.

4.2 Ympäristötekijät

Ympäristöolosuhteita ja niitä mittaavien antureiden toimintaa tarkasteltiin laajasti tutkimuksessa "Instrumentoidun tierakenteen mittaukset: Ympäristötekijät" (Ryynänen, T. 2000). Lämpötilojen mittausjärjestelmän todettiin kokonaisuudessaan toimivan luotettavasti ja tulokset olivat tarkkoja. Ilmatieteen laitoksen Oulunsalossa mitaamat ilman lämpötilojen vuorokausikeskiarvot olivat käytännössä yhtä suuret kuin Temmeksen järjestelmästä mitatut vuorokausikeskiarvot. Etäisyys Temmeksen ja Oulunsalon välillä on noin 35 km. [Ryynänen, T. 2000]

Tutkimuksessa mallinnettiin päällysteen pintalämpötila käyttäen tekijöinä ilman lämpötilaa sekä aikaan perustuvaa auringon säteilyn vuosi- ja päivävaihtelua (kuva 10). Jaksolliset vaihtelut otettiin huomioon käyttämällä mallin pohjana sinikäyrää, jonka vaihe muuttuu vuorokauden ja vuodenajan mukaan (kaavat 1 ja 2). Talvi-aikaan auringon säteilyn päivävaihtelua ei otettu huomioon. Mallin selitysaste on 96.89 % ja mallilla laskettu päällysteen pintalämpötila poikkeaa todellisesta enintään ± 3.3 °C 90 prosentissa tapauksista. [Ryynänen, T. 2000]



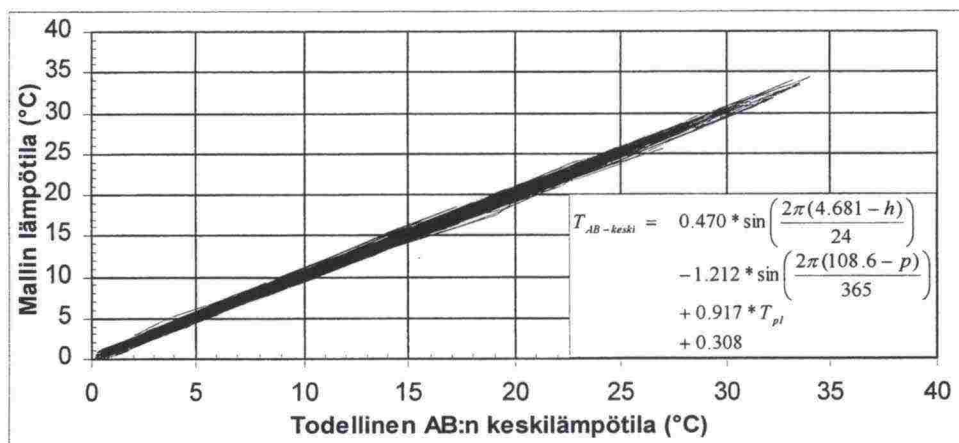
Kuva 10. Ilman lämpötilä sekä mitattu ja mallin perusteella laskettu päällysteen pintalämpötilä heinäkuussa 1998. [Ryynänen, T. 2000]

$$t_{pl} = 1.981 * \sin\left(\frac{2\pi(h-10)}{24}\right) + 6.655 * \sin\left(\frac{2\pi(p-97)}{365}\right) + 0.702 * t_i + 2.49 \quad (1)$$

$$t_{pk} = 6.655 * \sin\left(\frac{2\pi(p-97)}{365}\right) + 0.702 * t_i + 2.49 \quad (2)$$

- missä
- t_{pl} = pintalämpötilä lämpimällä kaudella 31.3-15.10.
 - t_{pk} = pintalämpötilä kylmällä kaudella 16.10-30.3.
 - h = vuorokauden tunti
 - p = mittauspäivän järjestysnumero. Vuoden ensimmäisen päivän järjestysnumero on 1 ja viimeisen 365.
 - t_i = ilman lämpötilä

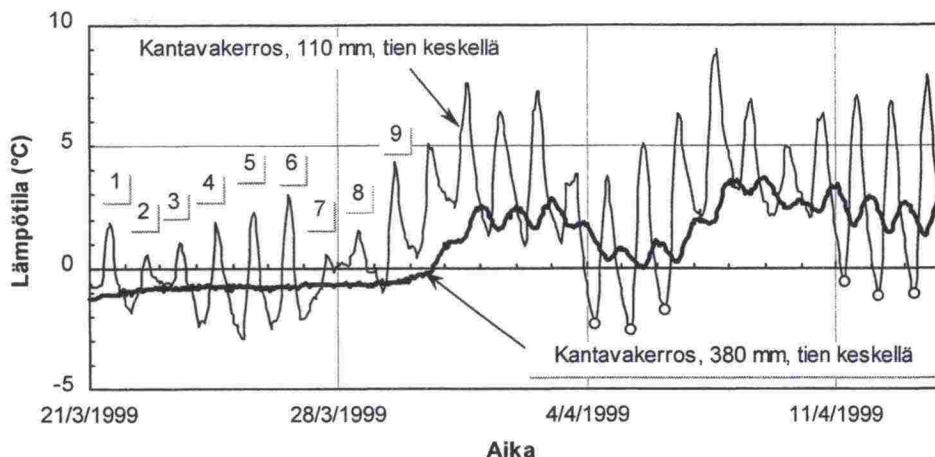
Ympäristötekijätutkimukseen liittyvässä lisäselvityksessä määritettiin vastaavat kaavat (kuva 11), joilla voidaan laskea päällysteen keskimääräinen lämpötilä mitatun pintalämpötilan perusteella. Kaavojen merkinnät vastaavat kaavoissa 1 ja 2 käytettyjä merkintöjä. Ottamalla mukaan jaksolliset tekijät voidaan päällysteen pintalämpötilan perusteella laskea päällysteen keskimääräinen lämpötilä erittäin tarkasti. Mallia voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi pudotuspainomittauksen yhteydessä laskehtaessa päällysteen keskilämpötilaa mitatun pintalämpötilan perusteella. Lämpötila-aineistosta on helposti määritettävissä myös esimerkiksi mitoituksessa käytettävien periodien keskilämpötiloja. [Ryynänen, T. 2000]



Kuva 11. Vuorokausi- ja vuosivaihtelun perusteella mallinnettu ja mitattu päällysteen keskilämpötila. $n = 4508$. [Ryynänen, T, 2000]

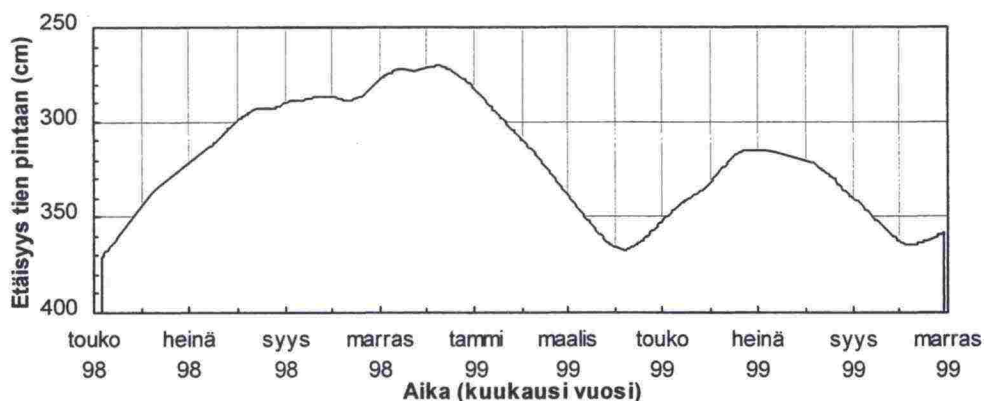
Roudan syvyys mallinnettiin pakkasmäärän neliöjuuren ja maalajivakion perusteella. Routa oli talven 1999-2000 (pakkasmäärä 27161 Kh) aikana alimmillaan 1.99 metrin syvyydessä tien keskellä ja 1.78 metrin syvyydessä tien reunaviivan kohdalla. Mitoituspakkasmäärällä ($F_{10} = 40500$ Kh) routa olisi muodostetun mallin mukaan edennyt 2.42 m syvyyteen tien keskellä ja 2.21 m syvyyteen tien reunaviivan kohdalla. [Ryynänen, T, 2000]

Rakenne sulii yhtä aikaa sekä ylhäältä että alhaalta päin. Viimeksi routaa oli 1.6 metrin syvyydessä ja sulamisesta tapahtui 72-80 % ylhäältä päin. Sulamisaika oli 1999 keväällä 42 vuorokautta tien keskellä ja 21 vuorokautta tien reunassa. Tierakenne oli kokonaisuudessaan sula 8.5.1999. Rakennekerroksen sulaminen ei ole hetkellinen tapahtuma, vaan kerroksen tuntilämpötilat vaihtelevat sulamisen aikana selvästi 0 °C ylä- ja alapuolella (kuva 12). Kantavan kerroksen yläpinnan lämpötila oli yhdeksän vuorokauden aikana kahdeksan kertaa 0 °C ylä- ja alapuolella tien reunassa ja yhdeksän kertaa tien keskellä. Varsinaisen sulamisajan jälkeen lämpötila kävi yhdeksän kertaa 0 °C:n alapuolella tien reunassa ja kuusi kertaa tien keskellä. Sulamisaikana tien sitomattomissa rakennekerroksissa esiintyvän veden olomuodon vaihtelut heikentävät kerrosten lujuusominaisuuksia ja sitä kautta koko tierakenteen kuormituskestävyyttä. [Ryynänen, T, 2000]



Kuva 12. Kantavan kerroksen sulaminen tuntilämpötilojen perusteella tien keskilinjalla. [Ryynänen, T. 2000]

Pohjavedenpinnan korkeusvaihtelut olivat erittäin hitaita (kuva 13). Muutokset olivat suurimmillaan 1.7 mm vuorokaudessa. Pohjaveden korkeus oli alimmillaan 3.7 metriä ja ylimmillään 2.7 metriä päällysteen pinnasta. Pohjavesi ei noussut lainkaan tierakenteeseen asti vaan oli ylimmilläänkin 0.77 m pohjamaan pinnan alapuolella. Talviaikana pohjaveden pinnan ja routarajan välillä oli noin 1.5 m korkeusero, joka säilyi samansuuruisena roudan edetessä rakenteessa. [Ryynänen, T. 2000]

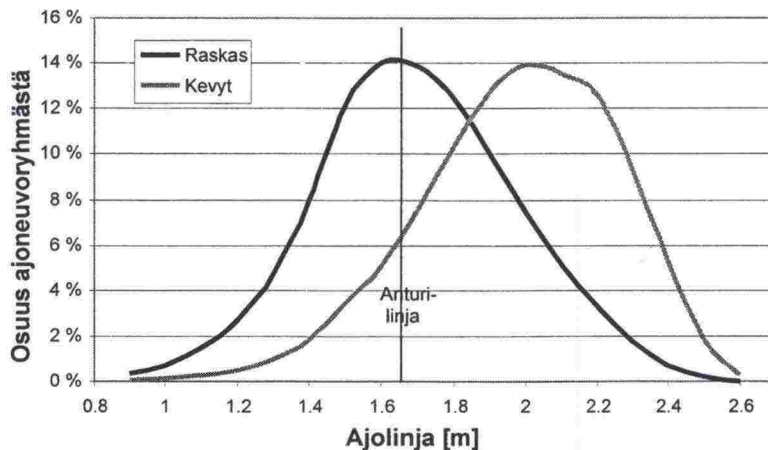


Kuva 13. Pohjaveden pinnan etäisyys päällysten pinnasta. [Ryynänen, T. 2000]

4.3 Ajotapatulokset

Ajotapamittaus aloitettiin Temmeksen koetiekohteessa kesällä 2000 laser-etäisyydenmittaukseen perustuvalla järjestelmällä. Tulosten käsittelemiseksi tehtiin ohjelmisto, jolla määritetään jokaiselle mitatulle ajoneuvolle nopeus, pituus sekä etäisyys päällysteen reunasta. Tiedot tallennetaan jatkuvasti päivitettävään tietokantaan.

Ajotapatietoja käytettiin 2001 valmistuneessa akselimassojen määrittäystä koskevassa tutkimuksessa. Esimerkiksi ajoneuvoyhdistelmän pituuden määrittäminen todettiin toimivan hyvin, kun tuloksia verrattiin painemittausten perusteella määritettyihin ajoneuvoyhdistelmien akselimääriin. Ajotapatuloksista määritettiin kesän 2000 aineiston pohjalta alustavia ajolinjakaukia (kuva 14) sekä raskaan liikenteen nopeutta kuvaavia tunnuslukuja. Ajotapamittaustulosten alustavissa tarkastelujen perusteella kuorma-autojen oikean pyörän ajourat osuvat hyvin lähelle anturilinjaa, mikä on ollut tarkoituskin anturien sijaintia suunniteltaessa. Kuorma- ja henkilöautojen vasen pyöräura noudattaa yleensä samaa ajolinjaa. Koska henkilöautot ovat kapeampia, niiden ajolinja eli oikean reunan etäisyys päällysteen reunasta painottuu hieman kesemmälle ajorataa. Raskaan liikenteen keskinopeus koetiekohteessa oli noin 85 km/h ja yli 80 % raskaista ajoneuvoista kulki 80-90 km/h nopeudella. [Savolainen, M. ym. 2001]



Kuva 14. Henkilö- ja kuorma-autojen ajolinjojen jakautuminen Temmeksen koetiekohteessa. [Savolainen, M. ym. 2001]

4.4 Liikennekuormitusten määrittäminen

4.4.1 Lähtökohta

Temmeksen koetiekohteessa mitataan liikennekuormitusten aiheuttamia vasteita, mutta itse kuormitusten (akselimassojen) mittaaminen on osoittautunut vaikeaksi. Kuormitusten tunteminen on kuitenkin tärkeä edellytys koetiekohteen tutkimuksille. Kun tunnetaan ajoneuvon nopeus, ajolinja ja akselimassat, periaatteessa kaikki kuormitustekijät (suuruus, sijainti ja kuormitus aika) ovat tiedossa. Kun lisäksi tunnetaan tierakenteen vasteet ja olosuhteet, voidaan laajan mittausaineiston avulla mallintaa tierakenteen toimintaa. Tämän perusteella voitaisiin esimerkiksi simuloida erilaisten olosuhde- tai kuormitusmuutosten vaikutuksia vasteisiin ja sitä kautta vaurioitumiseen. [Savolainen, M. ym. 2001]

Kesällä 1998 tehtyjen havaintomittaustulosten perusteella todettiin selkeä yhteys akselimassan ja sen aiheuttaman paineen kasvun välillä. Testimittausten aineisto oli

kuitenkin liian suppea, jotta sen perusteella olisi voitu tehdä tarkkoja massa-paine -malleja edes ympäristöolosuhteiden ollessa vakioita. Massa-paine -yhteyden määrittämistä käsiteltiin tarkemmin Temmeksessä tehtyjen pitkän aikavälin mittauksen perusteella tutkimuksessa ”Liikennekuormitusten määrittäminen tierakenteen vastaiden avulla” (Savolainen, M. ym. 2001). Tutkimuksen lähtökohtana oli, että akselimassan kasvaessa kuormituksen aiheuttama paine kasvaa, jos olosuhde- ja ajotapatekijät pysyvät vakioina. Eli kun tiedetään olosuhde- ja kuormitustekijöiden vaikutukset, voidaan mitatun paineen perusteella laskea akselimassa. [Savolainen, M. ym. 2001]

Tutkittavaksi anturiksi valittiin suodatinkerroksen yläosaan asennettu paineanturi P4. Anturin antamien tulosten on osoitettu olevan luotettavia ja selkeitä, mikä mahdollisti suhteellisen yksinkertaisen esikäsittelymenetelmän. Lisäksi P4-anturi reagoi kesäaikana kuormitukseen laajalla ajolinjaskaalalla ja tuloksista voidaan helposti erotella eri akselien vaikutukset. [Savolainen, M. ym. 2001]

Massa-paine -yhteyden vaikuttavien tekijöiden vaikutusten mallinnus edellytti laajaa mittausaineistoa ja joustavaa tulosten hallintaa. Lähtöaineistoksi käsiteltiin yli 22 000 ajoneuvoylityksen aikana mitatut P4-painetulokset vuoden 2000 kesältä ja syksyiltä. Tulokset tallennettiin tietokantaan, johon liitettiin ajotapa- ja päällysteen lämpötilatiedot (taulukko 4). [Savolainen, M. ym. 2001]

Taulukko 4. Akselimassa-paine -yhteyden määrittämisessä käytetyn tietokannan kuvaus. [Savolainen, M. ym. 2001]

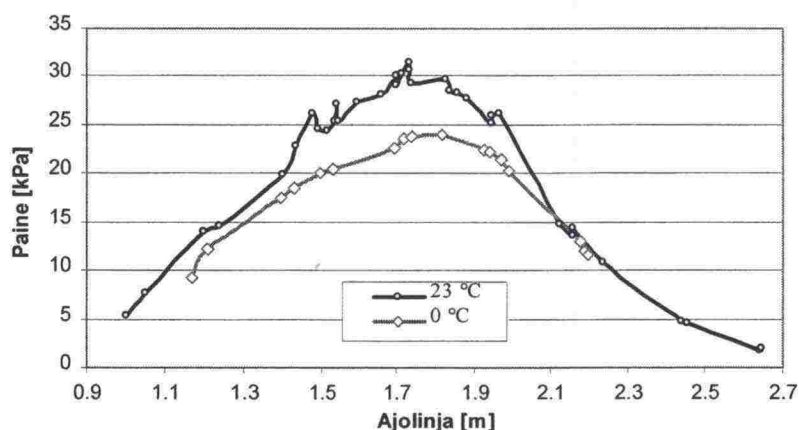
Kentän nimi	Tietotyyppi	Kuvaus
Päivä	Date/Time	Mittauspäivämäärä (pp/kk/vvvv)
Aika	Date/Time	Mittausaika (t:mm:ss)
1/1000_osat	Number	Mittausajan sekunnin tuhannesosat (0.000)
MAX (V)	Number	DasyLabissa suodatetut jännitteen huippuarvot (0.000)
MIN (V)	Number	Huippuarvoja seuraavat jännitteen minimiarvot (0.000)
Ajon_N:o	Number	Ajoneuvoyhdistelmien päivittäinen juokseva numerointi
Aks_N:o	Number	Akselin järjestysnumero ajoneuvoyhdistelmässä
Aks/Ajon	Number	Akselien lukumäärä ajoneuvoyhdistelmässä
Aks/Teli	Text	Ilmoittaa, onko akseli yksittäisakseli vai kuuluuko se teliin. Ilmoittaa myös järjestysnumeron telissä. (Y/T1/T2/T3)
Vert_arvo (V)	Number	Ajoneuvoyhdistelmän ensimmäistä huippuarvoa edeltävä minimiarvo, jota käytetään vertailuarvona. (0.000)
Dyn (V)	Number	Maksimi- ja vertailujännitteen erotus eli dynaaminen jännite (0.000)
Etäisyys 1	Number	Ajolinja laserin 1 kohdalla (m.00)
Etäisyys 2	Number	Ajolinja laserin 2 kohdalla (m.00)
Pituus	Number	Ajoneuvoyhdistelmän pituus (m.0)
Nopeus	Number	Ajoneuvoyhdistelmän nopeus (km/h.0)
T14	Number	Päällysteen alapinnan tuntilämpötila reunaviivan kohdalla

4.4.2 Suodatinkerroksen paineisiin vaikuttavat tekijät

Akseliylityksen suodatinkerroksen yläosaan aiheuttaman maksimipaineen suuruuteen vaikuttavat sekä kuormitukseen liittyvät tekijät että tarkastelupisteen yläpuolisen rakenteen jäykkyys. Kuormitustekijöitä ovat kuormituksen suuruus eli akseli-

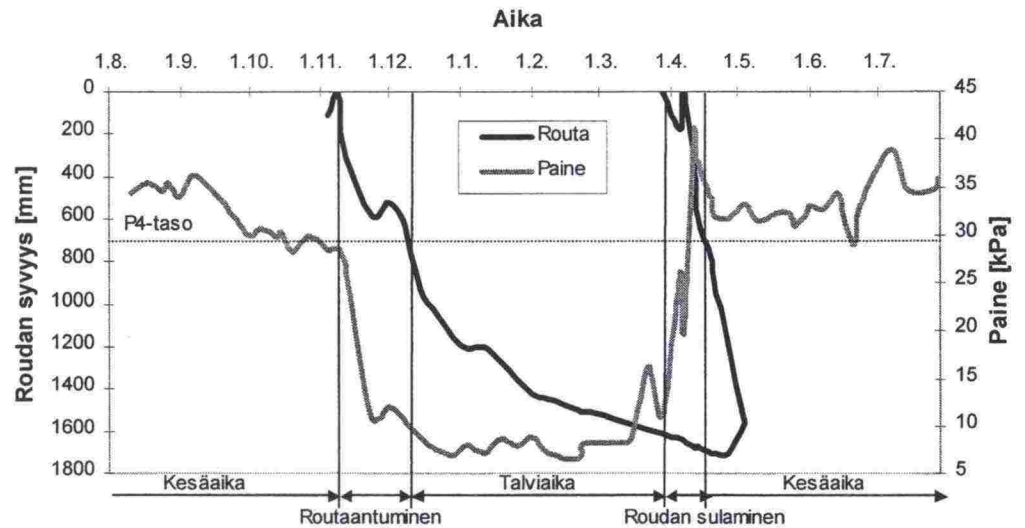
massa, kuormitusaika, mikä riippuu ajonopeudesta sekä kuormituksen sijainti eli ajolinja. Lisäksi kuormitustekijöihin voidaan lukea ajoneuvotekniset asiat kuten ren-
gastus, jousitus ja telirakenteet (akseliväli). Rakenteen yläpuoliseen jäykkyyteen vaikuttavat pääasiassa rouda, päällysteen lämpötila sekä sitomattomien kerrosten kosteusolosuhteet. [Savolainen, M. ym. 2001]

Kesän 1998 testimittaustulosten perusteella todettiin ajolinjan vaikutuksen suodatin-
kerroksen yläosan paineisiin olevan merkittävä (kuva 15). Testimittaukset osoittivat myös, että ajolinjalla ja päällysteen jäykkyydellä on selkeä yhteisvaikutus eli ajo-
linjan vaikutus muuttuu päällysteen lämpötilan muuttuessa. Kuormitusaika jätettiin pois paineisiin vaikuttavien tekijöiden tarkastelusta, koska ajonopeudet koetiekohte-
teissa vaihtelevat erittäin vähän. [Savolainen, M. ym. 2001]



Kuva 15. Ajoneuvon ajolinjan vaikutus paineisiin suodatinkerroksessa kahdella eri päällysteen lämpötilalla. Kuormituksena yksikköpyörä 3500 kg. [Savolainen, M. ym. 2001]

Tärkein liikennekuormitusten suodatinkerrokseen aiheuttamiin paineisiin vaikuttava ympäristötekijä on tierakenteen jäätyminen eli roudaantumisen. Talviaikana mitatut kuormituksen aiheuttamat paineet ovat vain noin 15 % vastaavan kuormituksen aiheuttamista kesäaikana mitatuista paineista (Kuva 16). Suurimmat paineet mitataan keväällä roudan sulamisen edettyä anturitasolle. [Savolainen, M. ym. 2001]

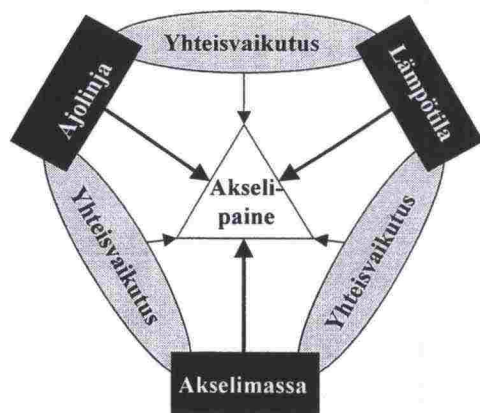


Kuva 16. Etuakseliylityksistä mitattujen P4-paineiden päivittäiset fraktiilia 98 vastaavat arvot ja roudan syvyys tien reunalinjalla. [Savolainen, M. ym. 2001]

Kesäaikana saman kuormituksen aiheuttamat paineet muuttuvat pääasiassa päällysteen lämpötilan muutosten seurauksena. Kun P4-akselipaineita eli akseliylitysten aikana mitattuja maksimipaineita tarkasteltiin luokittelemalla ne lämpötilan perusteella, voitiin havaita päällysteen lämpötilan vaikutuksen olevan lähes lineaarista samansuuruisen kuormituksen aiheuttamiin paineisiin. Toisaalta myös kuormituksen suuruudella oli vaikutusta lämpötilariippuvuuteen eli suurilla kuormituksilla lämpötilamuutoksen vaikutus oli suurempi kuin pienillä kuormituksilla [Savolainen, M. ym. 2001]

4.4.3 Akselimassan määrittäminen

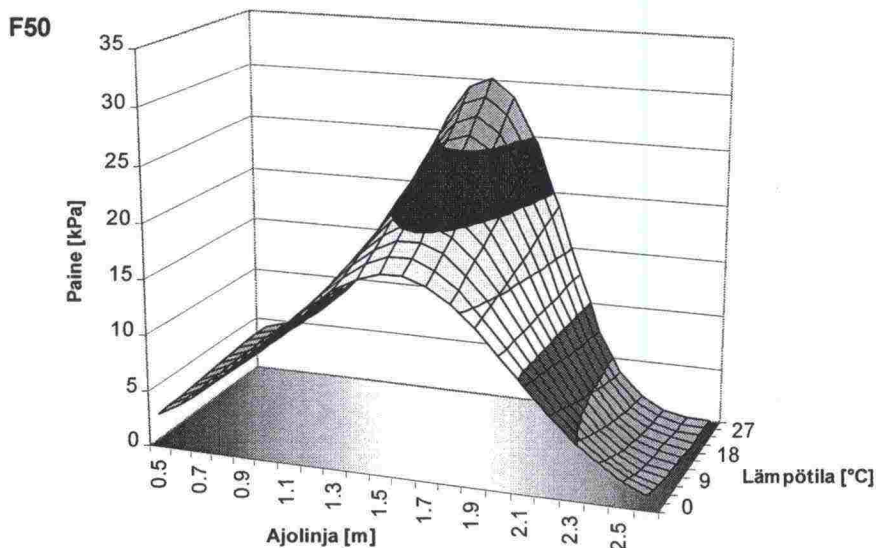
Kesäaikana Temmeksen koetiekohteessa tärkein akselimassan aiheuttamaan P4-akselipaineen suuruuteen vaikuttava ympäristötekijä on päällysteen lämpötila (kuva 17). Kuormitustekijöistä akselimassan lisäksi paineisiin vaikuttaa pääasiassa kuormituksen sijainti eli ajolinja. Päällysteen lämpötilalla ja ajolinjalla on olemassa myös selkeä yhteisvaikutus. Lisäksi akselimassan suuruudella on merkitystä päällysteen lämpötilan ja ajolinjan vaikutukseen. [Savolainen, M. ym. 2001]



Kuva 17. Akselipaineisiin kesäaikana vaikuttavat tekijät. [Savolainen, M. ym. 2001]

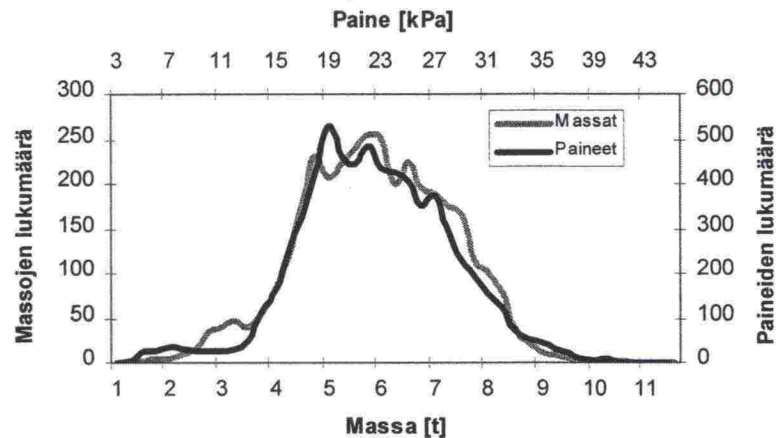
Ajolinjan ja lämpötilan vaikutukset vakioitiin paloittain jakamalla aineisto ajolinja- ja lämpötilaluokkiin. Tämän jälkeen jokaisen luokan painejakaumista määritettiin viiden eri fraktiilin arvot, joiden voitiin olettaa vastaavan saman akselimassan aiheuttamia paineita eri luokissa. Esimerkiksi mediaanipaine jokaisessa luokassa on aiheutunut mediaaniakselimassasta. Tässä yhteydessä otettiin huomioon mittaustekniikasta ja tulosten käsittelystä johtuvat luokittaiset erot tulosten karsiutumissa. [Savolainen, M. ym. 2001]

Kun luokittaisista painetuloista saatiin määritettyä samaa akselimassaa vastaavat arvot, voitiin mallintaa ajolinjan ja lämpötilan vaikutus paineeseen (kuva 18). Kun malli tehtiin viidellä eri fraktiilin arvolla, voitiin ottaa huomioon myös akselimassan muutosten vaikutus. [Savolainen, M. ym. 2001]



Kuva 18. Suodatinkerroksen yläosan pystysuoran paineen muuttuminen ajolinjan ja lämpötilan funktiona mediaanikuormitusta vastaavalla akselimassalla. [Savolainen, M. ym. 2001]

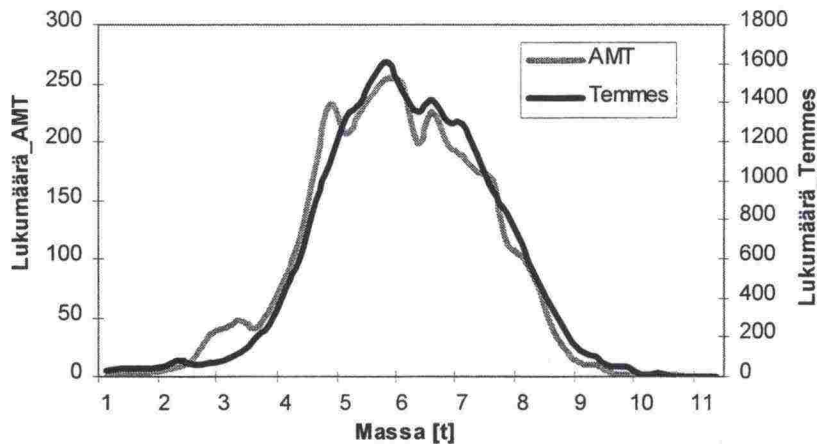
Valittuja fraktiilin arvoja vastaavat akselimassat määritettiin viimeisimmän akselimassatutkimuksen etuakselien massajakaumasta, jonka todettiin vastaavan P4-painejakaumaa (kuva 19). Itse akselimassojen laskentaa varten tehtiin Excel-pohjainen menetelmä, jolla voidaan laskea akselimassa antamalla ajolinja- lämpötila ja painetiedot. [Savolainen, M. ym. 2001]



Kuva 19. Koetiealueelta mitattujen paineiden sekä viimeisimmän akselimassatutkimuksen etuakselimassojen jakaumat. [Savolainen, M. ym. 2001]

Laskentamenetelmää testattiin koetiealueella kesällä 1998 tehtyjen testimittausten aineistolla. Kun luotettavuusvälinä (confidence interval) käytettiin 93,9 %:a poikkeamien maksimiarvoiksi saatiin $-12,9\%$ ja $+14,3\%$. Tämä vastaa eurooppalaisen tutkimusyhteisöelimen COST-323:n automaattisten akselipainovaakojen luokituksen mukaan luokkaa B(10) eli järjestelmän tarkkuus riittäisi etuakselien osalta yksityiskohtaisen tiedon keräämiseen liikenteestä. [Halonen, P. ym. 1993, Jacob, B. 1998, Savolainen, M. ym. 2001]

Laskentamenetelmällä määritettiin myös kesän 2000 aikana mitatuille yli 22 000 etuakselille massat ja niiden jakauma, joka vastaa suhteellisen hyvin akselimassatutkimuksen etuakselien massajakaumaa eli malli toimii lähtöoletusten mukaisesti (kuva 20). [Savolainen, M. ym. 2001]



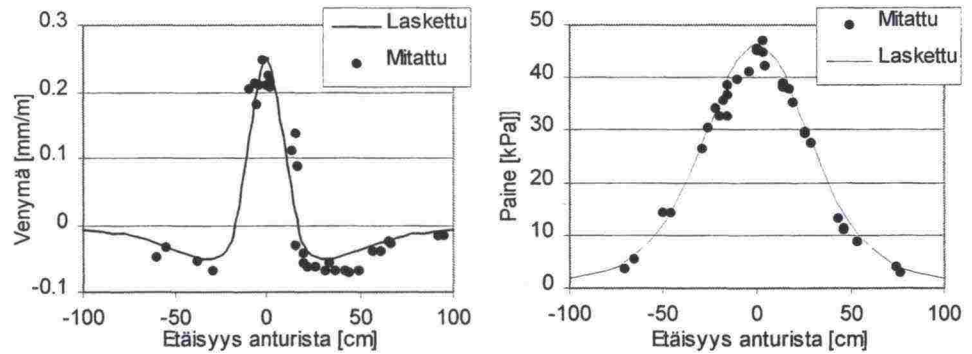
Kuva 20. Viimeisimmän akselimassatutkimuksen ja kesän 2000 aikana mitattujen Temmeksen tulosten pohjalta määritetyt etuakselien akselimassajakaumat. [Savolainen, M. ym. 2001]

Massan laskentaan on kehitteillä menetelmä, jossa käytetään akselimassalle muodostettua funktiota, jonka tekijöinä ovat ajolinja, päällysteen lämpötila ja P4-akselipaine. Tällöin menetelmä vaatii vähemmän resursseja kuin Excel-laskenta ja laskentafunktio on helpommin liitettävissä käsittelyohjelmistoon, jonka avulla massat voidaan laskea suoraan painetulojen käsittelyn yhteydessä.

Yksikköpyöräakselien massojen määrittämissä menetelmän pohjalta on kehitettävissä vastaava myös paripyörille ja teliakseleille.

4.5 Vastetulojen vertailu teoreettisiin laskelmiin

Koetiekohteesta saatuja tuloksia on verrattu useassa yhteydessä KenLayer -kerros-laskentaohjelmalla määritettyihin teoreettisiin arvoihin. KenLayer -ohjelma on osoittautunut käyttökelpoiseksi erityisesti siksi, että sillä tehdyissä laskelmissa voidaan ottaa huomioon sitomattomien rakennekerrosten moduulien jännitystilariippuvuus. Kun testimittauksissa saatuja tuloksia on verrattu teoreettisiin vasteisiin, paine- ja venymäanturien on todettu antavan tuloksia, jotka poikkeavat suhteellisen vähän laskennallisista arvoista (kuva 21). [Sikiö, J. 1999]



Kuva 21. Esimerkkikuvat laskennallisista ja mitatuista päällysteen alapinnan venymistä ja kantavan kerroksen paineista.

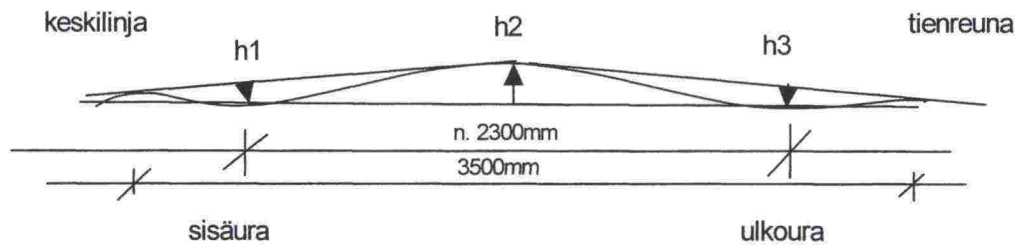
Muodonmuutosanturien tulosten vertailu on hankalaa, koska palautuvan muodonmuutoksen suuruus riippuu hyvin paljon rakenteen lähtötilasta. Saman kuormituksen aiheuttama palautuva muodonmuutos vaihtelee riippuen esimerkiksi edellisen ajoneuvon ajolinjasta tai siitä, kuinka kauan edellisestä ajoneuvoylityksestä on kulunut aikaa. Teoreettiset laskelmat antavat joka tapauksessa pohjaa Temmeksen tulosten tarkastelulle. Toisaalta koetiekohteen tulosten perusteella voidaan arvioida myös ohjelmiston lähtöoletusten ja laskentaperiaatteiden oikeellisuutta.

4.6 Koetierakenteen kunto

Koetiekohteen kuntoa on seurattu profilometrimittauksilla, vaaituksilla sekä inventoimalla päällysteen vauriot. Ensimmäinen vaurioseuranta tehtiin syksyllä 1998 ja viimeisin kesäkuussa 2001.

Tien pinnan keskimääräinen painuma koetiealueella on määritetty laskemalla 2,5 metrin välein tehtyjen vaaitustulosten keskiarvot erikseen tien reuna- ja keskilinjalla. Syksyjen 1998 ja 1999 välisenä aikana koealueen keskimääräinen painuma on kasvanut 4-5 mm. Kokonaispainuma on hiukan suurempi tien keskilinjalla kuin reunalalla. Pituussuuntaiset painumaerot ovat pieniä ja muuttuvat tasaisesti, joten pituus-suuntainen epätasaisuus on kasvanut erittäin vähän. Routanousun suuruus on kevään 2000 vaaitusten perusteella 3-4 millimetriä. [Savolainen, M. ym. 2001]

Uramittaukset on tehty profilometrimittauksina koetien reuna- ja keskilinjalle viiden metrin välein asennettujen mittaruuvien avulla. Profilometritulosten tulkinnessa on käytetty ns. harjannemenetelmää (Kuva 22). Urasyvytydet h1 ja h2 ovat vaaituspisteiden ja kaistan korkeimman kohdan kautta piirrettyjen suorien ja uran syvimmän kohdan etäisyyksiä. Harjanteen korkeus h2 mitataan kohtisuorasti urien syvimpien kohtien kautta piirretyltä suoralta. [Savolainen, M. ym. 2001]



Kuva 22. Profilometrimittausten tulkinta. [Savolainen, M, ym. 2001]

Profilometrimittauksia on tehty vuoden 1998 syksystä lähtien ja viimeisin mittaus tehtiin kesäkuussa 2001. Sisäuran syvyys on kasvanut kolmen vuoden aikana 3 - 5 mm ja ulkouran syvyys 2 - 2,5 mm. Harjanteen korkeus on pysynyt suhteellisen vakiona. [Savolainen, M. ym. 2001]

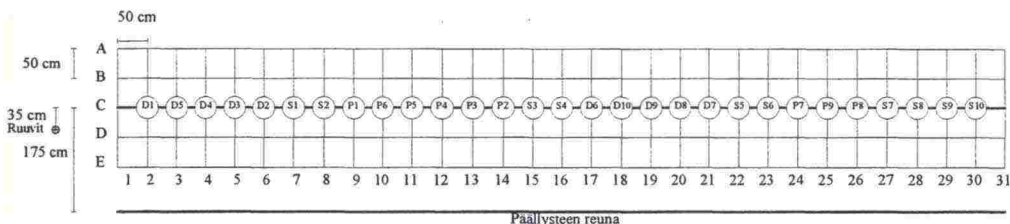
Päällysteen halkeamat on inventoitu silmämääräisesti. Koetiealueella oli kesäkuussa 2001 tehdyn kartoituksen mukaan muutamia pakkshalkeamia, joiden leveydet vaihtelevat hiushalkeamista noin viiteen millimetriin. Keskisauma oli auki koko matkalla ja sitä on paikattu vuosittain. Instrumentoidulla alueella oli vasta yksi noin metrin mittainen poikittainen hiushalkeama aivan alueen etureunassa.

Kaiken kaikkiaan koetien kunto on säilynyt hyvänä eli painumat, painumaerot, urautuminen sekä päällysteen vauriot ovat vielä erittäin vähäisiä.

4.7 Pudotuspainolaitemittaukset

Koetiekohteessa on tehty vertailumittauksia käyttämällä pudotuspainolaitetta. Käytetyn pudotuspainolaitteen kuormituksen on oletettu vastaavan kuormituspinnan alan, kuormitusajan ja kuormituksen suuruuden osalta 5 tonnin pyörämassaa noin 80 km:n tuntinopeudella. Mittaustuloksia ei ole liitetty edellä mainittuihin raportteihin, vaan niitä on käytetty pääasiassa erilaisiin koetierakenteesta mitattujen tulosten vertailuun.

Viimeisimmässä mittauksessa 6.10.1999 tehtiin pudotuksia puolen metrin välein sekä pituus- että poikkisuunnassa instrumenttilinjan molemmin puolin (kuva 23). Jokaisessa pisteessä tehtiin kaksi pudotusta.

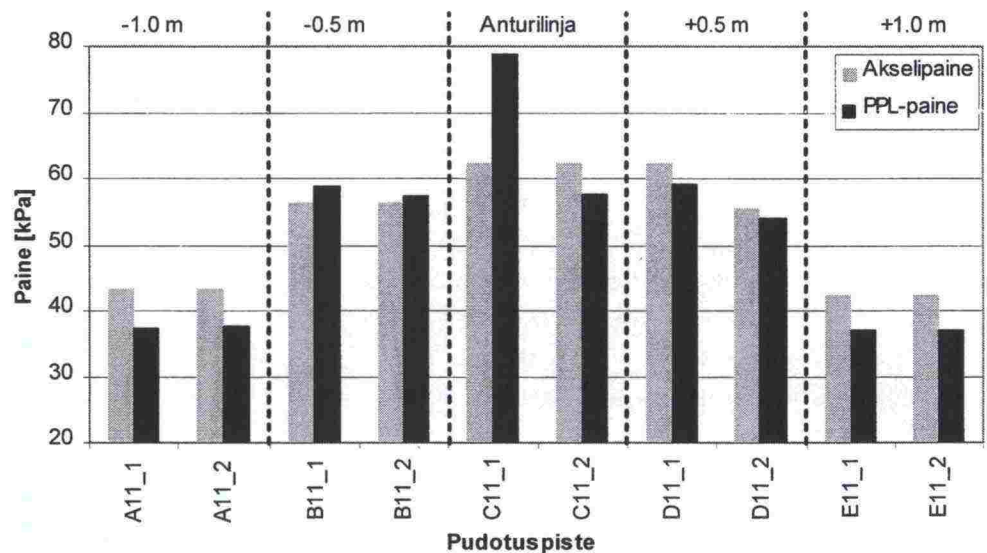


Kuva 23. 6.10.1999 tehtyjen pudotuspainomittausten suorituskaavio.

Päätuloksia

Pudotuspainolaitteen aiheuttamia vasteita on käytetty vertailuaineistona tarkasteltaessa ajoneuvoylitysten aikana mitattujen vastehuippujen vastaavuutta aiempien tutkimusten tuloksiin ja oletuksiin. Koska laajamittaisia analyysejä on tehty vasta suodatinkerroksen yläosan (P4) paineista, tarkkoja vertailuja on tehty vasta niiden osalta.

Pudotuspainotestien tuloksia verrattiin samoissa olosuhteissa määritettyihin noin kymmenen tonnin painoisten etuakselien aiheuttamiin P4-paineisiin (kuva 24). Akselikuormia vastaavat paineet laskettiin käyttämällä kesän 2000 aineiston pohjalta luotua painemallia, jossa tekijöinä ovat akselimassa, ajolinja ja päällysteen lämpötila. Paineet vastaavat suuruusluokaltaan suhteellisen hyvin toisiaan, joten ainakin huippupaineiden osalta pudotuspainolaitteen kuormituksen voidaan olettaa vastavan hyvin 5000 kg:n pyöräkuormitusta.



Kuva 24. Pudotuspainomittauksista määritetyt ja 10000 kg:n akselimassalla lasketut maksimipaineet viidellä eri ajolinja-arvolla.

5 Johtopäätökset

Tällä hetkellä mittausjärjestelmällä tuotetaan paljon tietoa, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi tierakenteen vaurioitumis- ja kestoikämallien lähtöaineistona. Mittaus-tulosten perusteella voidaan luoda tietokanta, jossa jokaisesta mitatusta akseliylityk-sestä tunnetaan tierakenteen toiminnan tarkastelun kannalta oleelliset tiedot ajoneu-vosta, kuormitusajasta, kuormituksen sijainnista ja kuormituksen suuruudesta sekä vallinneista olosuhteista. Liittämällä tuloksiin määritetyt vasteet on mahdollista mallintaa eri tekijöiden vaikutuksia tierakenteen rasitukseen ja sitä kautta vaurioitu-miseen. Temmeksen koetiekohteesta saadaan tulokset päivittäin hieman vajaasta 400 raskaasta ajoneuvoyhdistelmästä, joten koetiekohte antaa erinomaisen mahdollisuu-den koota erittäin laaja aineisto, jonka pohjalta voidaan perustellusti määrittää kuormitusten ja niiden aiheuttamien vasteiden yhteyksiä. Tämä on jo osoitettu vii-meisimmän tutkimuksen yhteydessä.

Yksityiskohtaiset vastetarkastelut vaativat tehokkaat tulostenkäsittelymenetelmät, jotta aineistoista saadaan tarpeeksi kattavat erilaisten kuormitus- ja olosuhdetekijöi-den vaikutusten määrittämiseksi. Koska eri anturien antamien tulosten käsittely vaa-tii erilaiset suodatusmenetelmät, täytyy periaatteessa jokaiselle anturille tehdä oma käsittelymenetelmä. Käsittelyn tulee olla tehokasta, mutta samalla suodatettujen tu-losten tulee olla luottavia, mikä edellyttää monenlaisia ohjelmallisia tarkistuksia. Koska vastetulosten käsittely on suhteellisen työlästä, tulee ennen käsittelyn aloitta-mista selvittää tarkasti, mitä haetaan ja kuinka tarkasti haettu tieto on saatavissa.

Lämpötila-anturien toiminta on osoitettu hyväksi ja niiden antamat tulokset luotetta-viksi. Mittaus-tulosten käsittelemiseksi on kehitetty tehokas ohjelmisto, jonka avulla tulokset saadaan suhteellisen helposti tietokantaan, josta ne ovat helposti käytettä-vissä. Myös roudan syvyyden määrittämisessä lämpötilamittaus-tulokset ovat osoit-tautuneet erittäin käyttökelpoisiksi. Kosteusmittaukset pyritään puolestaan jatkossa saamaan automatisoitujen mittausten piiriin.

Ajotapamittaus-tulokset ovat alustavien tarkastelujen perusteella luotettavia ja niiden käsittely on voitu ohjelmoida siten, että tarvittavat tulokset voidaan suodattaa suh-teellisen helposti. Ajotapatulokset vaativat kuitenkin vielä tarkasteluja, jotka voitai-siin tehdä samassa yhteydessä, kun tulosten perusteella aletaan määrittää erilaisia jakaumia ja vaihtelukertoimia. Tähän on jo olemassa alustava tutkimussuunnitelma.

Testimittausten perusteella tehdyissä tarkasteluissa on osoitettu koetiekohteesta mi-tattujen painetulojen olevan erittäin luotettavia ja vastaavat suuruudeltaan teoreetti-sia laskelmia. Paineet ovat myös helposti mallinnettavissa, koska niiden kuormitus-riippuvuus on hyvin selkeä. Myös päällysteen alapinnan venymiä mittaavien anturi-en tulokset ovat vastanneet suhteellisen hyvin teoreettisista laskelmista saatuja ar-voja. Sen sijaan sitomattomien kerrosten pystysuoria palautuvia muodonmuutostu-loksia on pidetty epäluotettavina tai ”väärinä”, koska mittausten perusteella määri-tetyt palautuvat muodonmuutokset ovat selvästi suurempia kuin lasketut arvot. Toi-mivien muodonmuutosantureiden antamat signaalit ovat kuitenkin erittäin selkeitä ja niistä on helposti eroteltavissa esimerkiksi ajoneuvon eri akseliryhmien aiheuttamat muodonmuutokset. Tämän vuoksi voidaan olettaa että ko. mittausantureiden toimin-

nassa ei sinänsä ole vikaa, vaan tulosten tulkinnassa ei ole otettu huomioon kaikkia tekijöitä, jotka vaikuttavat todellisten liikenne- ja ympäristökuormitusten alaisen tierakenteen muodonmuutuskäyttäytymiseen.

Koetierakenteen vaurioituminen on vielä vähäistä, joten pitkälle meneviä päätelmiä tien vaurioitumisen ja rasiitusten välillä ei voida vielä tehdä. Tähän asti mitattuja tuloksia voidaan käyttää aineistona, jolla kuvataan vaurioitumattoman tierakenteen toimintaa erilaisissa kuormitus- ja ympäristöolosuhteissa. Tuloksia voidaan verrata vaurioitumisen edetessä mitattuihin, jolloin saadaan tietoa vaurioiden vaikutuksista rasiitukseen. Koska instrumenttien kestävyys on osoittautunut hyväksi, voidaan olettaa, että mittaustuloksia saadaan vielä useita vuosia. Tämä edellyttää kuitenkin mittausjärjestelmän jatkuvaa ylläpitoa ja kehittämistä.

Jatkossa tulisi paneutua eri antureiden pitkän aikavälin tuloksiin ja selvittää instrumenttien toiminta ja signaalien käyttökelpoisuus. Selvityksen perusteella voitaisiin kartoittaa anturien mahdollisten toimintahäiriöiden syyt ja tehdä korjauksia. Anturit, joita ei enää saataisi toimimaan, voitaisiin poistaa mittausjärjestelmästä ja vapauttaa resursseja nykyisten tai mahdollisten uusien instrumenttien käyttöön.

Tähän mennessä tehtyjen tutkimusten perusteella Temmeksen koetiekohteesta on saatavissa hyvin paljon tietoa, jota voidaan käyttää uusien, entistä perustellumpien tierakenteen suunnittelu- ja mitoitusmenetelmien kehittämiseen. Tämä edellyttää kuitenkin panostusta, koska mittaustulosten jalostaminen selkeiksi tutkimustuloksiksi vaatii sekä asiantuntemusta, että täysipainoista paneutumista tulosten tarkasteluun.

Vaikka Temmeksen koetiekohteesta saadaankin tietoa vain ko. rakenteen toiminnasta Temmeksen olosuhteissa, voidaan tuloksia laajentaa kattamaan myös erilaisia rakenteita sekä ympäristö- ja liikenneolosuhteita käyttämällä vastemallien avulla tehtäviä simuloitteja. Toisaalta koetiekohteesta saadun kokemuksen pohjalta on luotavissa suhteellisen edullinen mittausjärjestelmä, joka voidaan asentaa myös muihin tierakenteisiin. Ennen uusien mittausjärjestelmien asentamista kannattaa kuitenkin selvittää mahdollisimman tarkasti, millaisia tuloksia Temmeksen koetieltä on kaiken kaikkiaan saatavissa.

Lähteet

Belt, J., Lämsä, V.P., Ehrola, E. Sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset. Tielaitoksen selvityksiä 60/2000. Helsinki 2000. 44 s. +liit.

Halonen, P., Huhtala, M., Laitinen, V. Dynaaminen rasitusindeksi (DRI). Helsinki 1993, Tielaitos, Tutkimuskeskus. Tielaitoksen selvityksiä 74/1993, 41 s. +liit.

Jacob, B., O'Brien, J. European Specification on Weight-In-Motion of Road Vehicles. 2nd European Conference. Lisbon 1998. pp 171-185.

Kilponen, A. Tierakenteen instrumentointi. Diplomityö. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Oulu 1997. 118 s.

Lämsä, V.P. Instrumentoidun tierakenteen mittaus- ja tutkimussuunnitelma. Diplomityö. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Oulu 1998. 101 s.

Ryynänen, T., 2000. Instrumentoidun tierakenteen mittaukset. Ympäristötekijät 1998-1999. Tielaitoksen selvityksiä, 42/2000. Helsinki 2000. 58 s.

Savolainen, M., Ryynänen T., Belt J., Ehrola, E. Liikennekuormitusten määrittäminen tierakenteen vasteiden avulla. Tiehallinnon selvityksiä 22/2001. Helsinki 2001. 67 s. + liitt. 5 s.

Sikiö, J. Temmeksen instrumentoidun koetien havaintomittaukset. Diplomityö. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Oulu 1999. 87 s.

ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-825-4
TIEH 3200715