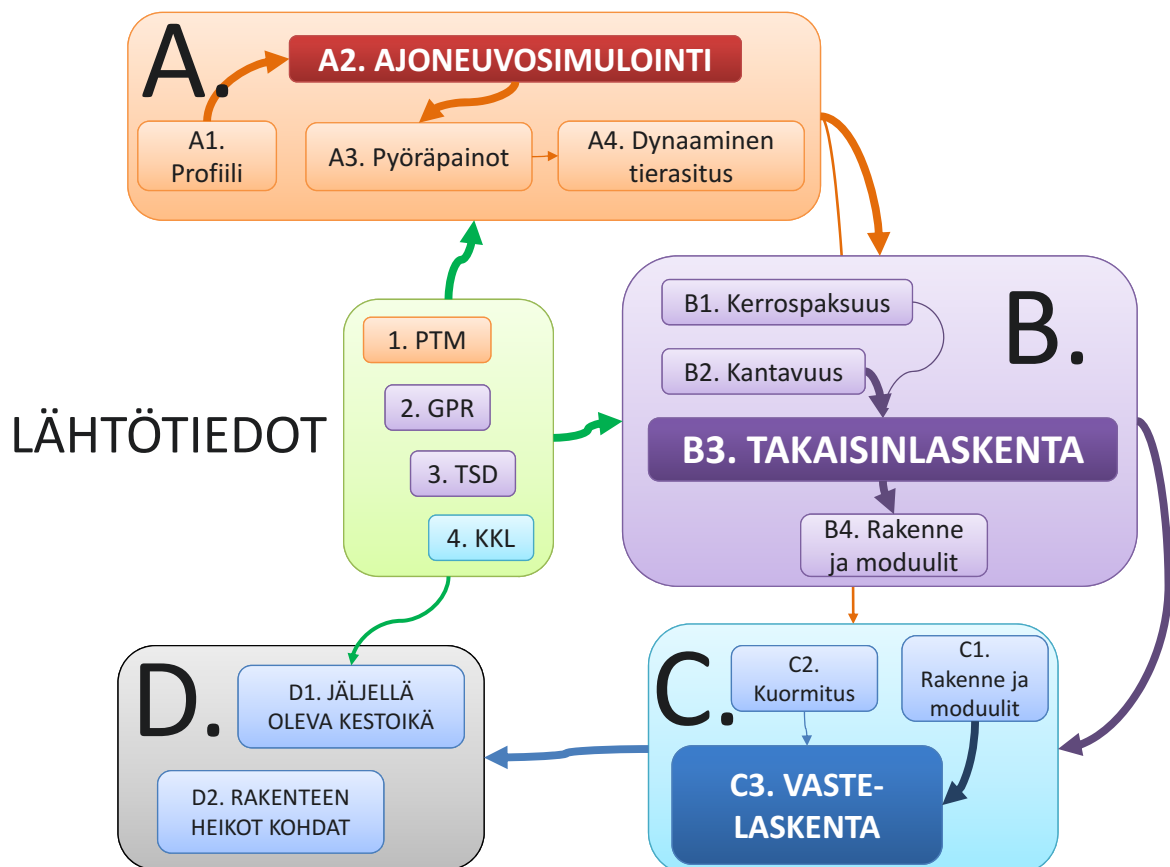


Pertti Virtala

Tien rakenteellisen kunnon hallinta

Laskennallisen kestävyystarkastelun periaatteet



Pertti Virtala

Tien rakenteellisen kunnon hallinta

Laskennallisen kestävyystarkastelun periaatteet

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 15/2016

Liikennevirasto

Helsinki 2016

Kannen kuva: Analysointikomponentit

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-317-231-9

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Pertti Virtala: Tien rakenteellisen kunnon hallinta. Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2016. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 15/2016. 93 sivua ja 6 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-231-9.

Avainsanat: tiet, kunto, rakenteet, kuormitus, kestävyys

Tiivistelmä

Tien rakenteellisen kunnon tunnusluvun problematiikkaa lähestyttiin mekanistis-empiirisestä näkökulmasta. Olemassa olevan tien mitattua kuntoa käytettiin hyödyksi tien sen hetkisen toimivuuden arvioimiseen. Olemassa olevien perinteisten kuntotietojen lisäksi oli käytettävissä tierakenteiden kerrospaksuustieto ja jatkuva taipumatieto. Kerrospaksuustieto tuotettiin maatutkalla. Taipumatieto tuotettiin TSD-laitteella. Teitä käsiteltiin yhden tieosan pituisina osina yksi kaista kerrallaan. Rakenteellisen kunnon tunnusluvun tuottamisessa käytettiin kolmea eri analyysiä, jotka olivat kuormitusanalyysi, rakenneanalyysi sekä vastelaskenta ja sen yhteydessä tehtävä kestävyysanalyysi.

Tietä rasittava dynaaminen kuormitus määritettiin simuloimalla kaksiakselisen kuorma-auton 50 kN:n painoisen taka-pyörän pyöräpainoa. Simuloinnissa käytettiin tien palvelutasomittauksista saatua pituussuuntaista profiilitietoa kummastakin ajourasta. Ajoneuvomallina oli 18 tonnin painoinen 7 vapausasteen perävaunun kuorma-auto. Simuloinnissa käytettiin kullekin kohteelle tien tyypillistä raskaiden ajoneuvojen nopeusrajoitusta. Pyöräpainot ja muut simuloinnista saatavat tulokset tuotettiin 1 m välein ja ne keskiarvoistettiin myöhemmin 10 m väleille. Simuloinnissa käytetyn ajoneuvon taka-akseli oli painoltaan samanlainen kuin taipumanmittausauton kuormittava akseli. Simuloinnin tarkoituksena oli tuottaa tien nykyistä pituusprofiilia vastaava dynaamisesti vaihtuva kuormitus. Kuormitusanalyysin mukaan tien oikeaa ajouraa kuormittaa pyöräpaino, joka ei ole vakio (50 kN), vaan siihen vaikuttaa tien sivukaltevuus ja epätasaisuus. Pyöräpaino vaihteli tyypillisesti välillä 40–60 kN, mutta vaihtelu oli hyvin epätasaisilla teillä jopa 30–70 kN.

Dynaaminen pyöräpaino toimi yhtenä lähtötietona tien rakenneanalyysille, jossa tien rakennekerroksille tuotettiin kimmomoduulit käyttäen tien jatkuvaa taipumatietoa ja kerrospaksuuksia. Kimmomoduulit kuvasivat syksyn ajankohtaa, sillä taipumamittauksetkin tehtiin syksyllä (2013). Kimmomoduulit tuotettiin lisäksi kolmelle muulle vuodenajalle kuvaamaan tien olosuhteita eri vuoden aikoina. Rakenneanalyysissä tarkasteltiin myös TSD:n ja pudotuspainolaitteen välisiä eroja ja mittaustarkkuuksia. Lisäksi tarkasteltiin takaisinlaskennan laskentatarkkuutta vertaamalla eri kerroilla saatuja kimmomoduuleja keskenään.

Vastelaskenta tehtiin käyttäen rakenneanalyysissä saatuja kerrosten kimmomoduuleja ja kuormitusanalyysissä saatua dynaamista pyöräpainoa. Vasteet laskettiin kymmenen metrin jaksoille kahdessa eri kohdassa neljälle eri vuodenajalle kunkin rakennekerroksen alapinnassa. Suurimmat vasteet saatiin kuormittavan paripyörän toisen pyörän alapuolelta yleensä kevätkauden tilanteessa. Kriittisinä vasteina tarkasteltiin alapinnan pystysuuntaista muodonmuutosta. Muodonmuutosta käytettiin väsymistarkastelussa vertaamalla sitä väsymissuoriin ja määrittämällä sen perusteella kerrosten kuormitusreservi.

Rakenteellisen kunnon tunnuslukuna on tierakenteen kestävyys neljään luokkaan luokiteltuna. Kerroksille laskettava kestävyys tuottaa koko tierakenteen lopullisen kestävyystiedon.

Pertti Virtala: Hantering av vägens strukturella skick. Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2016. Trafikverkets undersökningar och utredningar 15/2016. 93 sidor och 6 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-231-9.

Sammanfattning

Problematiken med nyckeltalet för vägens strukturella skick betraktades ur ett mekanistiskt-empiriskt perspektiv. Det uppmätta skicket av den existerande vägen utnyttjades för bedömningen av vägens dåvarande funktionalitet. Förutom de befintliga traditionella kvalitetsuppgifterna var även uppgifter om vägstrukturernas lagertjocklek och fortlöpande deflektionsuppgifter tillgängliga. Uppgifterna om lagertjockleken fastställdes med en georadar. Deflektionsuppgifterna fastställdes med ett TSD-fordon. Mätningar av vägarna genomfördes ett vägavsnitt och ett körfält åt gången. Vid fastställandet av nyckeltalet för vägens strukturella skick använde man sig av tre olika analyser: belastningsanalys, strukturanalys samt beräkning av resistens och hållfasthetsanalys i samband med detta.

Den dynamiska belastningen på vägen definierades genom att simulera hjulvikten av bakhjulet på 50 kN av en tvåaxlad lastbil. Vid simuleringen användes longitudinella profiluppgifter av båda körspåren från mätningar av vägens tjänstegrad. Fordonsmodellen var en 18 tons lastbil utan släpvagn med 7 frihetsgrader. Vid simuleringen användes vägens sedvanliga fartbegränsning för tunga fordon för varje objekt. Hjulvikterna och andra resultat från simuleringen producerades med 1 meters mellanrum och medelvärdet räknades senare ut med 10 meters mellanrum. Vikten av bakaxeln på det fordon som användes vid simuleringen var densamma som vikten av den belastade axeln på deflektionsmätningssfordonet. Syftet med simuleringen var att producera dynamiskt varierande belastning som motsvarar vägens nuvarande längdprofil. Enligt belastningsanalysen belastar hjulvikten det högra körspåret. Hjulvikten är inte konstant (50 kN), utan påverkas av vägens sidolutning och ojämnheter. Hjulvikten varierade typiskt mellan 40 och 60 kN, på väldigt ojämna vägar t.o.m. 30–70 kN.

Den dynamiska hjulvikten användes som en av utgångsuppgifterna för vägens strukturanalys, där man producerade elasticitetsmoduler för vägens strukturlager med hjälp av vägens fortlöpande deflektionsuppgifter och lagertjocklekar. Elasticitetsmodulerna beskrev tidpunkten under hösten, eftersom deflektionsmätningarna genomfördes på hösten (2013). Elasticitetsmoduler produceras även för tre andra årstider för att beskriva vägförhållandena under de olika årstiderna. Vid strukturanalysen granskades även skillnaderna mellan TSD-fordonet och fallviktsmätaren samt mätnoggrannheter. Vidare granskades tillbakaberäkningens noggrannhet genom att jämföra elasticitetsmodulerna från de olika mätningstillfällena med varandra.

Resistensberäkningen genomfördes med de olika lagrens elasticitetsmoduler från strukturanalysen och den dynamiska hjulvikten från belastningsanalysen. Resistenserna räknades på nedre ytan av varje strukturlager för vägavsnitt på tio meter på två olika ställen och under fyra olika årstider. De största resistenserna var under det ena hjulet på det belastade dubbelhjulet, i regel under vårperioden. Som kritiska resistenser granskades den vertikala deformationen av nedre ytan. Deformationen användes vid granskning av utmattningen genom att jämföra deformationen med utmattningsdiagram och att definiera de olika lagrens belastningsreserv på basis av jämförelsen.

Som nyckeltal för vägens strukturella skick används vägstrukturens hållfasthet uppdelad i fyra olika klasser. Hållfastheten som beräknas för de olika lagren ger de slutgiltiga hållfasthetsuppgifterna för hela vägstrukturen.

Pertti Virtala: Managing the structural condition of a road. Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2016. Research reports of the Finnish Transport Agency 15/2016. 93 pages and 6 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-231-9.

Summary

The structural condition of a road was studied in this work using the mechanical-empiric framework. The functionality of a road structure was studied based on the data of measured condition. On top of traditional condition variables taken from high speed measurements also layer thicknesses and deflections were available. Eleven road sections including several categories of different road standards were chosen as a sample road network. The surface condition of pavement (rutting, roughness, geometry etc.) were measured with one of Destia's high speed monitoring vehicles. Deflections of pavement surface of test sections were measured using the Polish Traffic Speed Deflector (TSD device) in 2013. Layer thicknesses were measured with ground penetrating radar. Three different analysis were combined to form one comprehensive analyses of the structural condition of test sections. Those three separate analyses were dynamic load simulation, structural analysis and response simulation.

The load simulation was conducted based on the 7 degrees of freedom dynamic vehicle model and the 3-dimensional information of the surface of road with a 10 cm interval. The vehicle model was a two axle truck model without trailer with a total weight of 18 tons and a rear axle weight of 10 ton. Several responses were simulated and all results were taken with 1 m reporting interval but an average of a 10 m section was calculated. The main outcome however was the dynamic wheel load of the right rear wheel of the vehicle model. The purpose of load simulation was to imitate the real dynamic load of the continuous bearing capacity measuring device, Polish TSD. According to the load simulation the load of a wheel is not constant. It varies dynamically depending on the unevenness of the road surface. The typical dynamic load was between 40-60 kN but some extreme values in range 30-70 kN existed as well.

The dynamic wheel load was input data for the structural analysis, where layer moduli were calculated using the layer thickness data and deflection data. Layer moduli was calculated using back calculation methods representing the autumn season because deflections were measured at autumn season in 2013. Layer moduli were calculated for four seasons; spring, summer, autumn and winter. A comparison of falling weight deflector and traffic speed deflectometer was conducted.

The outcome of load simulation and structural simulation were used in design calculation where several responses of the road structure were calculated. Responses were calculated for each 10 m section at two different point for four season. The highest responses of layers were under the second wheel of the double wheel at the bottom of the first layer. Critical response was the vertical strain. The calculated strain was compared to the strain in fatigue line. The outcome of the comparison was the loading reserve of the structure, i.e. the remaining amount equivalent single axle load repetitions which the road structure would have.

An index for the structural condition of the road was developed using this information of the remaining life time.

Esipuhe

Tässä selvityksessä tarkasteltiin mahdollisuutta muodostaa tien rakenteellisesta kunnosta sellaista tunnuslukua, jolla voitaisiin hallita teiden rakenteellista tilaa. Työn on teettänyt Liikennevirasto ja sen on tehnyt Destia Oy. Ohjausryhmässä ovat olleet Katri Eskola, Sami Petäjä, Kari Lehtonen sekä Panu Tolla Liikennevirastosta. Työn on tehnyt Pertti Virtala Destiasta.

Helsingissä helmikuussa 2016

Liikennevirasto
Kunnossapidon ohjaus ja kehittäminen

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
1.1	Tausta	9
1.2	Kunnonhallinnan historiaa	11
1.3	Kunnonhallinta osana toiminnansuunnittelua	13
1.4	Rappeutumismekanismit	15
1.4.1	Urautuminen	16
1.4.2	Päällysteen halkeilu	17
1.4.3	Lämpötilavaihtelun vaikutus	18
2	TAVOITTEET JA RAJAUKSET	19
2.1	Tavoitteet	19
2.2	Rajaukset	20
3	TUTKIMUSSUUNNITELMA	21
3.1	Tarkastelukokonaisuuden määrittäminen	21
3.1.1	Kuormitusanalyysi	22
3.1.2	Tien rakenneanalyysi	23
3.1.3	Tien kestävyysanalyysi	23
3.1.4	Tarkastelutavan validointi	24
3.1.5	Validoinnissa ilmenneiden erojen analysointi	24
3.2	Lähtötietojen hankinta	24
3.2.1	Yleistiedot	24
3.2.2	Palvelutasomittaukset	24
3.2.3	Kantavuusmittaukset	24
3.2.4	Rakennepaksuudet	24
3.2.5	Pintavauriot	25
3.3	Kohteiden valinta	25
3.3.1	Kriittiset tekijät	25
3.3.2	Alustava kohdeluettelo	25
3.4	Mallin käyttökelpoisuuden analysointi	26
4	MITTAUKSET	27
4.1	Yleistiedot	27
4.2	Palvelutaso	29
4.2.1	Pituussuuntainen epätasaisuus	29
4.2.2	Poikkisuuntainen epätasaisuus	30
4.2.3	Pintavauriot	30
4.3	Rakennekerrosten paksuus	31
4.3.1	Tilastolliset tunnusluvut	34
4.3.2	Jakaumat	35
4.3.3	Kerrospaksuuksien profiilit	37
4.4	Taipumat	39
4.4.1	Mittaus	39
4.4.2	Normalisointi	42
4.4.3	Lämpötilakorjaus	43
4.4.4	Toistettavuus	44
4.4.5	Taipumaindeksit	45
4.4.6	Tilastolliset tunnusluvut	46
4.4.7	Taipumajakaumat	46
4.4.8	TSD-KUAB vertailu	47

5	RAKENTEELLINEN KUNTO	53
5.1	Kuormitusanalyysi – ajoneuvosimulointi	53
5.1.1	Simulointimalli	53
5.1.2	Pyöräpainot	54
5.1.3	Tierasitus	55
5.1.4	Pyöräpainon sivusiirtymä	56
5.1.5	Kuormituskertymä.....	58
5.2	Rakenneanalyysi – takaisinlaskenta	59
5.2.1	Laskentamenetelmä.....	59
5.2.2	Lähtötiedot	60
5.2.3	Kerrosten moduulit	62
5.3	Kestävyysanalyysi - vastelaskenta	65
5.3.1	Monikerroslaskenta.....	65
5.3.2	Lähtötiedot ja parametrit.....	66
5.3.3	Vasteet.....	67
5.3.4	Väsymiskriteerit.....	74
5.3.5	Validointitarkastelut	76
5.4	Rakenteellisen kunnan tunnusluku	85
5.4.1	Yleisperiaate.....	85
5.4.2	Mt 3662 tieosa 1.....	86
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	89
	VIITTEET	92
	LIITTEET	
Liite 1	Kerrospaksuudet/syvyydet	
Liite 2	Taipumat ja taipumaindeksit	
Liite 3	Korjaustarve	
Liite 4	Epätasaisuus	
Liite 5	Reunapainuma	
Liite 6	APAS-vastelaskentaohjelmaan liittyviä rajoituksia	

1 Johdanto

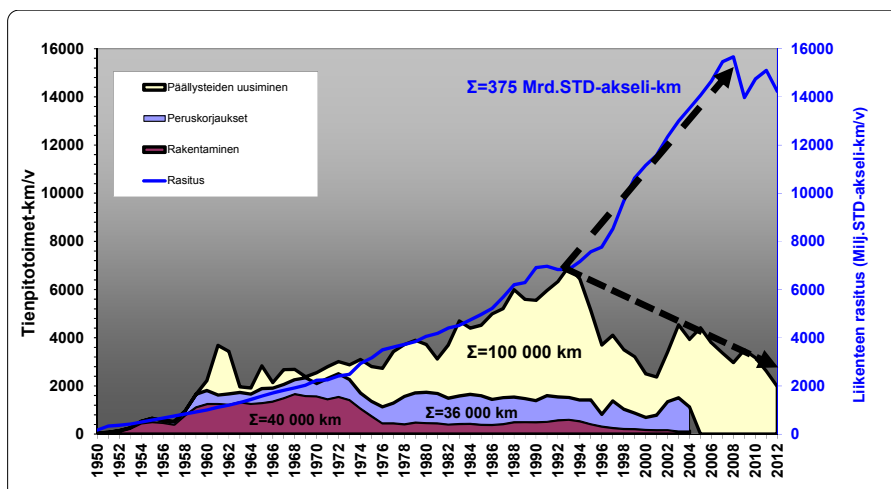
1.1 Tausta

Suomen maantiestöä alettiin rakentaa ja kunnostaa päällystetyiksi teiksi voimakkaasti 1950-luvulla. Maantiestölle tehtyjen tienpitotoimien volyyymi kasvoi 1950-luvun lopulta aina 1990-luvun alkuun saakka, jonka jälkeen se on voimakkaasti pienentynyt. Vuoteen 2004 mennessä tienpitotoimia (rakentaminen, peruskorjaukset, päällysteiden uusiminen) oli kertynyt tierekisterin mukaan noin 176 000 km. Tienpitotoimien volyyymi oli huipussaan 1990-luvun alussa, jolloin niitä tehtiin yhteensä noin 7000 km/v. Tienpitotoimilla luodaan tiestölle kuormituskapasiteettia.

Raskaan liikenteen tiestöön aiheuttama tierasitus kuluttaa luotua kuormituskapasiteettia. Liikenteen aiheuttama tierasitus on kuljetussuoritteen ja ajoneuvopainojen kasvun myötä kasvanut. Liikenteen aiheuttamaa tierasitusta oli kertynyt vuoteen 2012 mennessä noin 375 mrd. standardiakselikilometriä. Yksi std.aks.km vastaa sitä rasi- tusta, jonka yksi 10 tonnin paripyörillä varustettu akseli aiheuttaa yhden kilometrin matkalla. Liikenerasitus oli vuonna 2012 noin 14000 milj.std.aks.km/v.

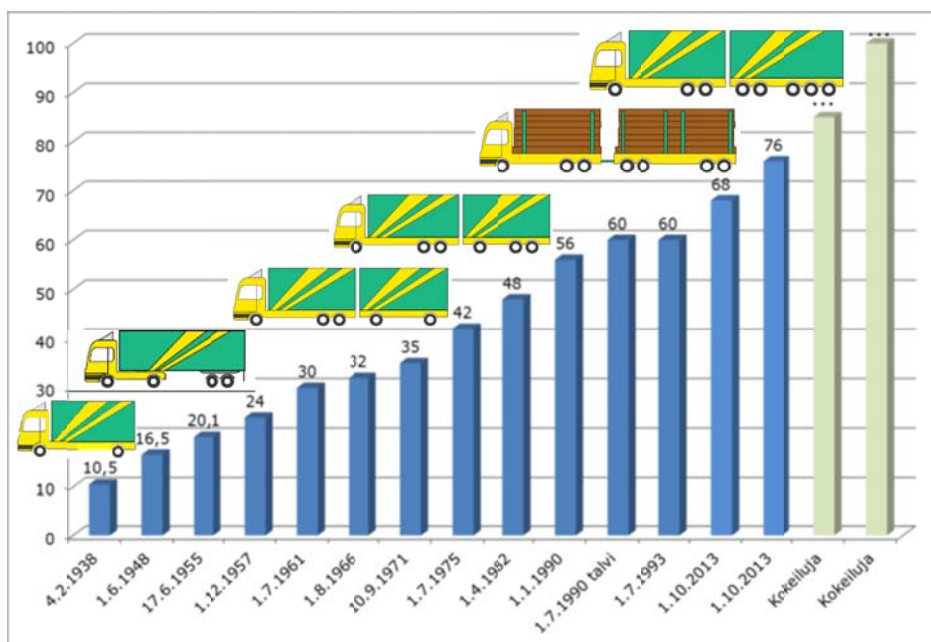
Energiakriisin jälkeen 1970-luvulla teiden rakentamisen ja peruskorjausten määrä laski samalla kun päällysteiden uusimisen määrä kasvoi. Päällysteiden uusimisen vo- lyymi oli huipussaan eli noin 5400 km vuonna 1993. Päällysteiden hintojen nousun sekä päällysteiden kulumiskestävyyden ja ohjelmoinnin parantamistoimien takia 1990-luvulla päällysteiden uusimisvolyyymi laski jyrkästi: Tienpitotoimien volyyymi laski kolmanteen osaan ja päällysteiden uusiminen laski noin puoleen. 2000-luvun alkupuoliskolla volyyymi tilapäisesti kasvoi. Päällysteitä uusittiin vuonna 2014 noin 2600 km.

Raskaan liikenteen tiestölle aiheuttaman tierasituksen vuosikehityksessä näkyy 1990-luvun lamakausi (1990–98) selvänä notkahduksena, joka on kuitenkin oiennut takaisin omalle kasvu-uralleen. Nykyhetken tiestörasitusta ei ole laskettu, koska siihen vaikuttava akselimassatutkimus on kesken. Laskelma voidaan päivittää vuoden 2015 lopussa, kun ajoneuvojen kuormitusvastaavuuskertoimet on ensin päivitetty.



Kuva 1. Tienpitotoimien volyyymi vs. tieliikenteen aiheuttama vuotuinen tie- rasitus 1950–2012. /Tierekisteri 2014/.

Vaikka tiestö onkin rakennettu pääasiassa vuosikymmeniä sitten, sen tulee kestää liikenteen ja ilmaston aiheuttamia rasituksia useita vuosikymmeniä eteenpäin. Kuljetusten kilpailukykyyn kannalta ajoneuvojen kokoja ja sallittuja painoja nostetaan tiettyin aikaväleihin. Painoihin liittyvää lainsäädäntöä on uudistettu keskimäärin noin 5 vuoden välein. Silloin kun maamme tiestöä voimakkaimmin rakennettiin, oli kuorma-auton suurin sallittu kokonaismassa 20–30 tonnia. Sen jälkeen ajoneuvot ovat kehittyneet suuremmiksi ja akselien lukumäärää ja ajoneuvojen kokonaismassoja on useasti nostettu. Ajoneuvojen massa ja akselistorakenne on tierasituksen kannalta monimutkainen asia, koska siihen vaikuttavat monet tekijät. Niistä tärkeimpiä ovat jousitus-, teli- ja rengastusratkaisut. Liikennemäärien lisäksi tulisi tietää tiestöllä liikkuvien ajoneuvojen akselipainojakaumat.



Kuva 2. Ajoneuvojen rakenne ja kokonaismassat. [12].

Akselin aiheuttama tierasitus lasketaan akselipainon ja referenssipainon avulla ns. neljännen potenssin ($n=4$) säännön perusteella, missä akselipainon ja sen referenssipainon suhde korotetaan potenssiin 4. Yhtä hyvin voitaisiin laskea pyöräpainoilla, jotka ovat puolet akselipainoista.

$$ESAL = \left(\frac{P_i}{P_{ref}} \right)^n$$

Ajoneuvon aiheuttama tierasitus lasketaan sen kaikkien akselien ja akselityyppien referenssipainojen avulla vastaavalla tavalla seuraavan kaavan mukaan, missä ajoneuvon akselien lukumäärä on k .

$$ESVL = \sum_1^k \left(\frac{P_i}{P_{refi}} \right)^n$$

Ajoneuvot ryhmitellään liikennelaskennassa ajoneuvoryhmiin, joita tyypillisesti ovat henkilöautot, pakettiautot, linja-autot, perävaunuttomat kuorma-autot ja puoli- ja täysperävaunulliset kuorma-autot. Tierasituksen kannalta ovat oleellisia vain raskaat ajoneuvot.

1.2 Kunnonhallinnan historiaa

Teiden ylläpidon toiminnasuunnittelu on perustunut tieverkolta kerättäviin kuntotietoihin, joita on ollut käytettävissä eri ajanjaksoina vaihtelevasti. Nykyiset palvelutasoa kuvaavat tunnusluvut alkoivat tulla käyttöön rajatumpina jo 1980-luvulla, mutta 1990-luvulla jo hyvin monipuolisina. 1970- ja 1980-luvuilla ylläpitotoimenpiteiden tarve ja kohdistuminen päätettiin osittain paikallistuntemuksen ja osittain kantavuustietojen perusteella. Tuolloin mitattiin tieverkon kantavuutta Benkelman-laitteilla. Saatua kantavuustietoa verrattiin suunnitteluohjeissa esitettyihin tavoitekantavuusarvioihin ja rakenteelliset kuntopuutteet arvioitiin kantavuusvajeen perusteella. Kantavuuspuutteet toimivat myös tieverkon tilan ja rahoitustarpeen arvioinnissa. Toisena toimenpiteiden kohdistamisessa tarvittavina lähtötietoina oli paikallistuntemus. Kantavuustiedon hyötynä oli se, että se suuntasi ylläpitoa ennakoivaan suuntaan.

1980-luvulla liikenne kasvoi voimakkaasti ja näkyväksi ongelmaksi tuli päällysteiden urautuminen. Urautuminen johtui pääasiassa henkilöautojen nastarengaskulutuksesta. Nastarengaskulutukseen reagoitiin aluksi kasvattamalla päällystysvolyyymiä. Sen jälkeen tehtiin useita strategisia kehitystoimenpiteitä, joiden ansiosta päällysteiden kulumisurautuminen saatiin hallintaan. Tällaisia olivat mm. ASTO-tutkimusohjelman tuottamat kestävämmät päällysteet, talvinopeusrajoitusten käyttöönotto sekä aiempaa tiukemmat nastarengasmääräykset. Päällystämisen ohjelmoinnissa otettiin käyttöön PMS-järjestelmät, joiden avulla pystyttiin kohdentamaan toimenpiteet paremmin. Samalla kun päällysteiden pintakunnon huomiointi tuli urien mittaamisen ja päällystevaurioiden inventoinnin kautta keskeisempään asemaan, rakenteellinen kunto perustui päällysteiden vaurionopeuteen ja kantavuustiedon käyttö jäi vähemmälle. Toiminnasuunnittelun ohjaukseen tuli käyttöön tulosohtauskäytäntö, joka asetti toiminnan vaikuttavuudelle tavoitteita, mutta samalla rajasi käytettävissä olevia resursseja. Tuolloin kehitettiin ja otettiin käyttöön tehokkaita menetelmiä uran poistoon, koska uran poisto priorisoitiin tärkeäksi. Sen seurauksena tuli tärkeäksi saada tulosohtauksen tulosmittari näyttämään mahdollisimman hyvältä. Sillä oli mm. sellainen seuraus, että päällystystoimenpiteet kevenivät. Päällysteiden uusimisessa keskimääräinen massamenekki oli vuonna 1990 noin 95 kg/m² kun se vuonna 2010 oli enää 60 kg/m².

Kantavuuden mittaamenettely uudistettiin 1990-luvulla KUAB-pudotuspainolaitteiden tultua käyttöön. Mittauksia tehtiin edelleen pistekohtaisesti harvoilla mittausväleillä. Väliaikaisesti kokeiltiin tiheämpää 100 m mittausväliä, josta kuitenkin siirryttiin takaisin entiseen menettelyyn. Harvan mittausvälin tuottamista kantavuustiedoista kuitenkin interpoloitiin arvot mittaamatta jääneille osuuksille. Kantavuustiedon käyttö alettiin kokea ongelmallisena, koska mittausväli oli niin harva eikä sillä pystytty tuottamaan tietoa vuodenaikavaihtelusta, joka on merkittävää. Toisena puutteena oli, ettei sitä pystytty tierakenteiden kerrospaksuustiedon puuttuessa hyödyntämään täysimääräisesti. Kerrospaksuuksien toimiva mittausmenettely on olemassa, mutta sen tarpeellisuudesta verkkotasolla ei ole oltu vakuuttuneita. Kerrospaksuuksien määrittäminen sisältää epävarmuutta ja on kallista. Edellä mainituista syistä kantavuustiedon suhde pinnalta mitattujen tunnuslukujen kanssa jäi epämääräiseksi. Tämä johti siihen, että verkkotason kantavuusmittaukset 2000-luvun lopulla lopetettiin kokonaan. Teiden rakenteellisen kunnon hallinta koetaan edelleen kuitenkin puutteelliseksi ja useita yrityksiä tilanteen korjaamiseksi on otettu.

Tierakenteen mitoitusmenettelyä kehitettiin 1990- ja 2000-luvuilla Tien pohja- ja päällysrakenteet (TPPT) -tutkimusohjelmassa, mutta näkökulmana oli enimmäkseen uuden rakenteen mitoittaminen. Joissakin osaprojekteissa kehitettiin olemassa olevien teiden rakenteellisen kunnan hallintaa mm. kantavuustietoihin ja kerrosmoduulien takaisinlaskentaan liittyen. Menettelyt olivat toisaalta hyviä ja käyttökelpoisia, mutta ne eivät vakiintuneet verkkotason tarkasteluissa.

TPPT-ohjelman kohdistuessa enemmän paksujen asfalttipäällysteisten teiden hallintaan 2000-luvulla käynnistettiin toinen teiden hallintaan kohdistuva tutkimusohjelma (VÄHÄ=Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito) [22]. Sen kohteena oli kuitenkin se vähäliikenteisin tieverkko, jonka ongelmat eivät johdu niinkään liikennekuormituksesta vaan enemmän sää- ja ilmastorasituksesta ja siitä, ettei niitä teitä ole koskaan kunnolla rakennettu. Vähäliikenteisten teiden ylläpitoon annettiin useita suosituksia, joita olivat mm. painorajoituskäytäntö ja eräiden uusien tunnuslukujen käyttöönotto.

Kolmannessa 2000-luvulla käynnistyneessä tutkimushankkeessa (VOH=Väyläomaisuuden hallinnan tutkimusohjelma) oli muutama rakenteellisen kunnan aluetta käsittelevä tutkimushanke. Vuonna 2005 Oulun yliopistossa selvitettiin uuden tien rakenteellista kuntoa kuvaavan tunnusluvun muodostamismahdollisuuksia ja sen myötä syntyi suosituksia uusiksi tunnusluvuiksi, mutta ne eivät näytä vakiintuneen käytäntöön.

Vuonna 2000 tehdyssä selvityksessä [20] ”*Kevytpäällysteteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet*” todettiin mm., että silloiset tunnusluvut sisälsivät monia puutteita, joista tärkeimmät olivat mm:

- Tietojärjestelmissä (Kuntotietorekisteri ja Tierekisteri) olevista kantavuustiedoista vain pieni osa perustuu mittaustietoon, valtaosa on interpoloituja.
- Maksimitaipumasta laskettava kantavuus ei korreloi tien vaurioitumisen kanssa kovin hyvin (R^2 on 0.07-0.15).
- Maksimitaipuma ei kerro sitä, onko suuren taipuman syy päällysrakenteessa vai alusrakenteessa.
- Vuodenaikaisvaihtelu otetaan huomioon hyvin karkeasti arvioitavalla kevät-kantavuuskertoimella.
- Kuntotietorekisteri ei sisältänyt tietoa tien rakenteesta (materiaaleja/paksuuksia), pohjamaasta eikä tien kuivatusolosuhteista.
- Päällysteen vauriosumman laskennassa yhdistetään kaikki eri halkeamatyypit yhdeksi tunnusluvuksi riippumatta halkeilun syystä, joka johtaa ongelmiin vauriosumman ennustamisessa.
- Reunapainauma pitäisi pystyä ottamaan huomioon tien vauriotarkasteluissa, mutta sitä ei tällä hetkellä kerätä.

”*Verkkotason taipumamittausten tarveselvitys*” -raportissa vuonna 2005 [19] todettiin seuraavasti:

- Mikäli tien pinnan taipumia halutaan mitata tieverkkotasolla, se on käytännössä mahdollista ainoastaan jatkuvalla taipumanmittauslaitteella, joka ajaa lähes normaalilla ajonopeudella osana liikennevirtaa, kuten PTM- ja APVM-autot. Tien pinnan jatkuvaa taipumamittausta on kehitetty useissa maissa, mutta valmiita laitteita mittaustiedon tuottamiseen suuressa mittakaavassa ei tiettävästi ole olemassa. Ruotsissa kehitystyö on käytännössä keskeytetty.

- Päällystetyn tieverkon rakenteellisen kunnon määrittämiseksi ei ole tyydyttäviä tunnuslukuja. Kantavuusaste on todettu tässä yhteydessä toimimattomaksi, mutta parempaakaan tunnuslukua ei toistaiseksi ole saatu kehitettyä. Noin kymmenen vuoden aikana aiheesta on tehty useita selvityksiä ja kerätty laajat kuntomittausaineistot, joiden perusteella uudet, kantavuusasteen korvaavat tunnusluvut on kehitettävissä. Tien rakenteellinen kunto voitaisiin todennäköisesti määrittää useiden mittauslajien yhteistuloksena: Verkkotasolla voidaan käyttää PTM- ja APVM-mittausten tuloksia; hanketasolla lisäksi taipumia ja maatutkamittauksia.
- Taipumatiedot vaihtelevat päällysteen lämpötilan sekä vuodenajan (rakenteen kosteustilan) mukaan. Menetelmät päällysteen lämpötilan vaihtelun huomioimiseksi on olemassa. Vuodenaikaisvaihtelun huomioimiseksi on kehitettävä nykyistä kevätkantavuuskertoimen käyttöä uskottavampi menetelmä. Tässä yhteydessä on hyödynnettävä VOH-projektissa 1.2a Kantavuusmittausten kehittäminen tehty työ.
- Kuntotilaston mukaan tieverkon kantavuus on parantunut vuodesta 1994 vuoteen 2004 noin 15 %. Tämä on ristiriidassa tienverkon muun kuntokehityksen kanssa. Yhtenä syynä on pidetty käytettyä tunnuslukua kantavuusastetta, jonka laskennassa käytetään kevätkantavuuskertoimella korjattua taipumamittauksietoa sekä liikennemäärästä, kuormituskertaluvusta sekä päällystysluokasta määritettyä tavoitekantavuutta.

Päällysteiden ylläpidon hallinnassa on edelleen tien rakenteellisen kunnon suhteen puutteita ja tarve käyttökelpoisen tarkastelutavan tai tunnusluvun kehittämiseksi on edelleen olemassa. Aihepiirin kehittämisessä on hyvä ottaa oppia aiemmista kokemuksista, ajatella asiaa laajempaan kokonaisuuteen, tiedostaa tiedon keräämisessä ja käsittelyssä tapahtunut kehitys ja olla avoin käytössä oleville mahdollisuuksille.

1.3 Kunnonhallinta osana toiminnan-suunnittelua

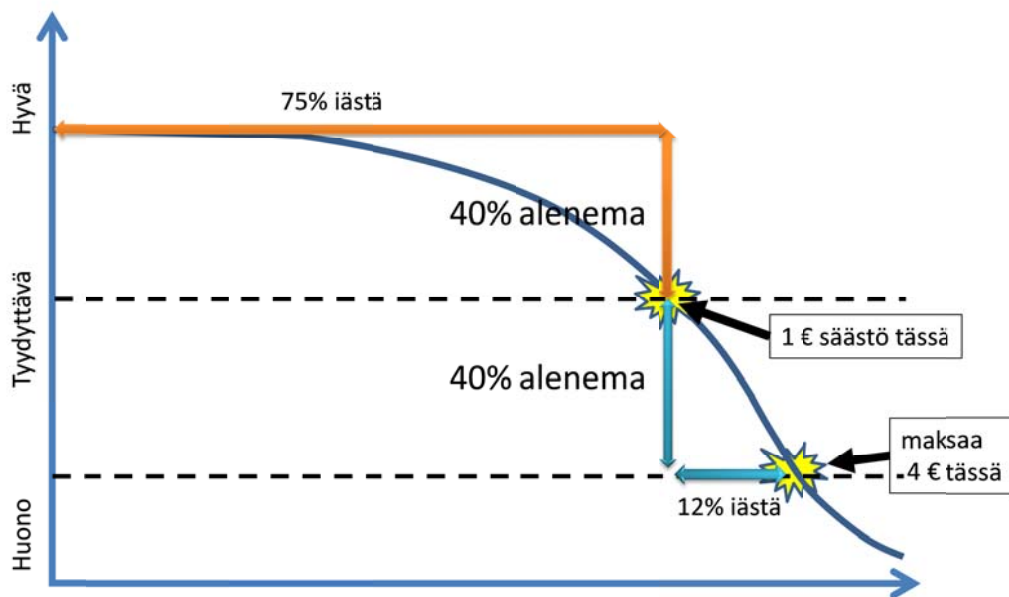
Tieverkon ylläpidossa toistuu sykli, jossa on tunnistettavat ja toisiaan seuraavat vaiheet. Näitä vaihteita ovat tieverkon tilanhallinta, tarpeiden perusteluviestintä, rahoituksen hankkiminen, toiminnan tulostavoitteiden määrittäminen, vuosittaisten töiden ohjelmointi sekä lopuksi niiden toteutus. Kunnonhallinta sisältyy sitä laajempaan käsitteeseen tilanhallinta. Voidaan sanoa, että tilanhallinta on koko toiminnan perusta, koska se toimii lähtötietona sille prosessille, jossa muiden vaiheiden sisältö määräytyy. Tilanhallinta on perustana sille keskustelulle, jota käydään tarpeita perusteltaessa ja priorisoitaessa. Perusteluviestinnän onnistumisesta riippuu, minkälainen rahoitus toiminnalle saadaan. Rahoituksesta puolestaan riippuu, minkälaisia toimintaan liittyviä ohjeita ja tavoitteita annetaan organisaatioissa alaspäin. Tavoitteet ja rahoitus määräävät sen mitä toimenpiteitä vuosittain ohjelmoidaan toteutettaviksi. Vuosittain tehtävät ylläpitotoimet vaikuttavat lopulta tieverkon tilaan ja näin sama sykli jatkaa toistumistaan. Tilanhallinta sisältää yhtenä osana myös tieverkon rakenteellisen tilan hallinnan, mikä kytkee tämän työn aihepiirin osaksi ylläpidon toiminnan-suunnittelua.



Kuva 3. Tieverkon ylläpidon (ja oikeastaan koko väylänpidon) toiminnan-suunnittelun vuosisykli.

Tien rakenteellisen kunnonhallinnan haasteena onkin tunnistaa oikea parantamisajankohta mahdollisimman hyvin. Käytännössä oikea parantamisajankohta on aikakku, jonka ajalle parantamistoimet tulisi ajoittaa. Erityisesti on tunnettava sen tilan lähestyminen, jonka jälkeen tien rakenteellinen tila on kustannuksia kasvattavassa itseään vahvistavassa kierteesä. Kirjallisuudessa usein viitataan kuvan 4 kaltaiseen kustannuskierteeseen, missä korjauskustannukset optimiajankohdan ylittymisen jälkeen kasvavat jopa moninkertaisiksi ja missä säästäminen tulee pitemmällä aikavälillä kalliiksi.

Toimenpiteitä on kuitenkin vaikea suunnitella oikea-aikaisiksi, ellei käyttökelpoisia kunnonhallinnan tunnuslukuja ole olemassa. Tämä pätee erityisesti tien rakenteellisen kunnon kohdalla.



Kuva 4. Kunnonhallinnan haasteena on tunnistaa tien parantamisajankohta [17].

1.4 Rappeutumismekanismit

Tiet kuluvat pääasiassa kolmen eri kuormitustekijän takia. Nämä kuormitustekijät ovat kevyiden ajoneuvojen aiheuttama nastarengaskulutus, raskaiden ajoneuvojen aiheuttama liikennekuormitus sekä ilmastosta aiheuttama ilmastokuormitus. Päälysteiden näkyvin rappeutumistyyppi (R1) syntyy kevyiden ajoneuvojen nastarengaskulutuksesta, jonka seurauksena tiet urautuvat ajourien kohdalta. Teiden urautumisessa on mukana myös tiivistymisestä ja deformatiivisesta johtuvaa urautumista, mutta sitä ei pystytä nykyisillä mittausten menetelmillä erottamaan nastarengaskulutuksen aiheuttamasta urautumisesta. Valtaosa ylläpitotoimista kohdistuu kulumaaurien poistamiseen. Kulumisurautumisongelmaa pyritään vähentämään talvinopeutta ja nastojen kuluttavuutta vähentämällä sekä käyttämällä mahdollisimman kestäviä päälysteitä.

Tiet rappeutuvat lisäksi raskaan liikenteen aiheuttaman kuormituksen takia rakennekerrosten väsymisenä ja deformatiivisena (R2). Raskaiden ajoneuvojen rasitus muodostuu ajoneuvojen akselipainojen sekä niiden akselisto-, jousitus- ja rengastusratkaisujen perusteella. Sen lisäksi rasitukseen vaikuttaa tien pinnan sekä poikki- että pituussuuntainen epätasaisuus, jotka kasvattavat liikennesäätöä. Tiet mitoitetaan suunnitteluvaiheessa mitoitusohjelmia käyttäen kestäväksi tämä liikennesäätö.

Kolmas rasitusmekanismi (R3) syntyy ilmastosta ja sään vaikutuksesta. Tierakenteisiin pääsee joko päälysteaurioiden kautta tai huonosta kuivatuudesta johtuen kosteutta, joka yhdessä syklisen jätymis-sulamisjaksojen kanssa heikentää rakennekerrosten jäykkyyttä ja vähentää kuormituskestävyyttä sekä lisää kerrosten routimisesta johtuvia muodonmuutoksia.



Kuva 5. Kolme rappeutumismekanismia.

1.4.1 Urautuminen

Urautuminen ei ole pelkästään päällysteen kulumisesta aiheutuvaa urautumista, vaan siihen vaikuttavat kaikissa rakennekerroksissa tapahtuvat muodonmuutokset. Alku-urautumista tapahtuu kerrosten tiivistyessä. Deformaatiota tapahtuu päällysteen viskoosin ominaisuuden takia kun raskaan ajoneuvon pyöräpaino syrjäyttää sitä sivusuunnassa, jolloin ajouran reunat kohoavat samalla kun ajouran kohta painuu. Lisäksi sitomattomissa kerroksissa tapahtuu leikkautumista ja murtumista, jotka aiheuttavat niihin muodonmuutoksia. Kerroksissa oleva kosteus vaikuttaa niiden jäykkyyksiin ja sitä kautta muodonmuutoksiin. Kun kulumisuria tavalla tai toisella paikataan, jäävät rakennekerroksissa piilevät mahdolliset muut urautumisen syyt ennalleen.

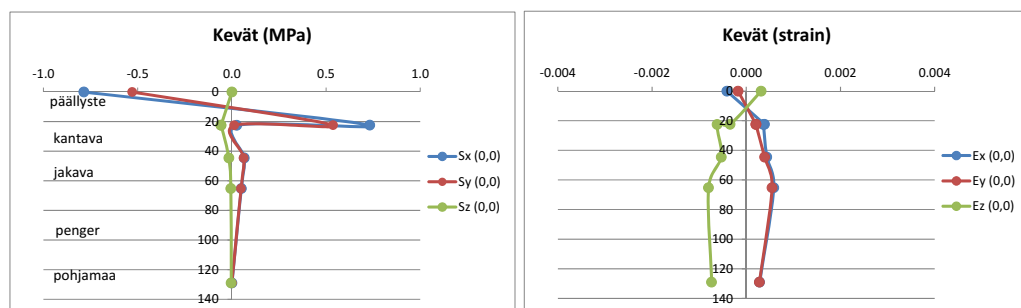
Taulukko 1. Urautumismekanismi ja siihen vaikuttavat tekijät [16].

Kerros\mekanismi	Urautumismekanismi						Vaikuttavat tekijät										Toimenpiteitä						
	Kuluminen	Tiivistyminen	Plastinen virtaus	Leikkautuminen	Murtuminen	Routuminen	Kiviaines/materiaali	Bitumi	Sideaine	Tiivistys	Kuormitus	Lämpötila	Vesi	Jäätyminen/sulaminen	Rapautuminen	Nopeuden rajoittaminen	Nastojen rajoittaminen	Urapaikkaus	REM	Pintaukset	Kuivatus	Painorajoitus	Rakenteen uusiminen
Kulutuskerros	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x			x
Sidekerros		x	x				x	x	x	x	x	x											
Sidottu kantava	x			x	x		x		x	x	x	x											
Sitomaton kantava	x			x			x		x	x		x	x	x									
Sitomaton jakava	x			x			x		x	x		x	x										
Sitomaton suodatin	x			x			x		x	x		x	x										
Penger	x			x			x		x	x		x	x										
Pohjamaa	x			x		x	x		x	x	x	x											

Deformaation hallinta rakennekerroksissa (2004), Tiehallinnon selvityksiä 57/2004

1.4.2 Päällysteen halkeilu

Päällysteen alapinnassa vetomuodonmuutoksia syntyy sekä pituussuuntaisesti että poikkisuuntaisesti. Tyypillisesti poikkisuuntainen vetomuodonmuutos on päällysteen viskoosin käyttäytymisen takia pituussuuntaista vetomuodonmuutosta suurempi, sillä tien poikkisuunnassa vetorasitus vaikuttaa pidemmän aikaa kuin tien pituussuunnassa. Pohjimmiltaan asfalttipäällysteiden väsymisvaurioituminen siis perustuu sideaineena käytetyn bitumin viskoosiin käyttäytymiseen. Kuormituskertojen lukumäärän kasvaessa bitumin murtolujuus ja -venymä pienenevät, kunnes lopulta liikennekuormitus käy näihin nähtynä liian suureksi ja tien rakenteellinen kestoikä ylittyy.



Kuva 6. Vetojännitys päällysteen alapinnassa on poikkisuunnassa (S_x) suurempi kuin pituussuunnassa (S_y) (vasen kuva) ja vastaavasti myös poikkisuuntainen muodonmuutos (E_x) on suurempi kuin pituussuuntainen muodonmuutos (E_y) (oikea kuva).

Toinen poikkisuunnan jännityksiin vaikuttava tekijä on se, että kerrosten jäykkyysmoduulit ovat poikkisuunnassa vain noin puolet pituussuunnan jäykkyysmoduuleista, mikä lisää sivusuunnan muodonmuutoksia.

Kolmas sivusuunnan vasteita lisäävä tekijä on tiegeometrian ja epätasaisuuden aiheuttama sivusuuntainen lisäkuormitus, jota mitoituslaskelmissa ei pystytä ottamaan ollenkaan huomioon.

Yli 80 millimetrin päällystepaksuuksilla väsymisvaurioitumisen alkuvaiheessa sidotun kerroksen alapintaan syntyy pituussuuntaisia hiushalkeamia ajourien kohdalle. Kuormituksen jatkuminen saa syntyneet hiushalkeamat laajenemaan, jolloin ne alkavat muodostaa hiushalkeamaverkkoa. Prosessin myötä päällysteen jäykkyys pienenee ja pyöräkuorman aikaansaamat palautuvat vetomuodonmuutokset kasvavat. Syntyneet hiushalkeamat laajenevat edelleen ja yhtyvät suuremmiksi makrohalkeamiksi samalla edeten tien pintaa kohti, jolloin päällysteeseen alkaa syntyä tien pinnalla näkyviä vaurioita. Näkyvät väsymisvauriot tien pinnalla alkavat tyypillisesti pituussuuntaisina halkeamina ajourien keskellä, missä tiehen kohdistuva rasitus on suurinta. Ensimmäisen pituushalkeaman ilmestyttyä tiehen vaurioituminen nopeutuu, sillä halkeama muodostaa tiehen epäjatkuvuuskohdan, minkä takia päällyste ei enää toimi laattana ja jaa kuormituksia tasaisesti alemmille kerroksille. Verkkohalkeilun alkaessa näkyä tien pinnalla, saattaa päällysteen jäykkyys olla enää vain puolet vastaavan uuden päällysteen jäykkyydestä. Väsymiskestävyys pidetäänkin tyypillisesti sitä kuormituskertojen lukumäärää, jolla päällysteen jäykkyysmoduuli laskee puoleen alkuperäisestä, kun määritetään päällysteen väsymiskestävyttä laboratorikokeilla.

Ohuilla, alle 80 millimetrin päällystepaksuuksilla verkkohalkeamien muodostumis- mekanismi on erilainen: ohutpäällysteisillä teillä sitomattomien kerrosten muodon- muutokset ovat tyypillisesti suurempia kuin suuremmilla päällystepaksuuksilla. Täl- löin päällystekerroksen mukautuessa syntyneisiin muodonmuutoksiin voivat siihen syntyvät poikkisuuntaiset vetomuodonmuutokset ajourissa ylittää päällysteen kestä- vyyden. Tällöin päällysteeseen syntyy pituushalkeama ajouran keskelle, jolloin edel- leen jatkuva kuormitus aiheuttaa päällysteeseen lisävaurioita kuten verkkohalkeamia. Tehokas keino päällysteen alapinnan vetomuodonmuutosten pienentämiseksi on kor- kean moduulin omaavan materiaalin käyttäminen päällysteen alla olevassa kerrok- sessa sekä päällysteen paksuuden ja jäykkyyden kasvattaminen. (Belt ym. 2002, s. 41–44; Ehrola 1996, s. 313–315.) Verkkohalkeilun estämiseksi myös tien kuivatuksen on oltava kunnossa: päällystekerrokseen aiheutuvat muodonmuutokset ovat suurem- pia silloin, kun sitomattomissa kerroksissa on vettä, joka alentaa niiden jäykkyyttä (Doré & Zubeck 2009, s. 65).

1.4.3 Lämpötilavaihtelun vaikutus

Ympäristöllisistä ja ilmastollisista tekijöistä erityisesti lämpötilaan ja sen vaihteluun liittyvät ilmiöt aiheuttavat halkeamia tierakenteeseen. Halkeamia voi syntyä tien rou- timisen sekä lämpötilanvaihteluiden takia. Routiminen voi aiheuttaa tiehen epätasai- sia routanousuja esimerkiksi routivan alusrakenteen jäätyminen tai tiessä olevan epä- jatkuvuuskohdan kuten rummun tai päällysrakennepaksuuden muutoksen takia. Epä- tasainen routanousu puolestaan voi aiheuttaa tierakenteen halkeilua, joka voi ilmetä pituus- ja poikkisuuntaisina halkeamina sekä vinoina ja epämääräisinä ajokaista- halkeamina. Halkeamat näkyvät erityisesti päällystekerroksessa, mutta ne ulottuvat usein syvälle tierakenteeseen. Routahalkeamat heikentävät ajomukavuutta ja tien ra- kenteellista toimintaa, sillä ne toimivat epäjatkuvuuskohtina heikentäen kantavuutta ja päästäen kosteutta kulkeutumaan tierakenteeseen tien pinnalta käsin. Routa- halkeamien perimmäisenä syynä ovat epätasaisen routanousun aikaansaamat veto- jännitykset, jotka ylittävät tierakenteen vetolujuuden. Syntyvien vetojännitysten suu- ruus riippuu ensisijaisesti routanousun epätasaisuudesta eli siitä, kuinka suuria kul- manmuutoksia routanousu aiheuttaa tierakenteeseen. Asfalttipäällysteen viskoosin käyttäytymisen vuoksi myös routanousun ja sen aiheuttamien muodonmuutosten no- peudella on tärkeä merkitys, sillä hitaalla kuormitusnopeudella päällysteessä ehtii tapahtua jännitysten purkautumista, jolloin päällyste kestää suurempia muodon- muutoksia halkeamatta kuin nopeammin kuormitettuna. Ajokaistoille syntyvien vino- jen ja epämääräisten halkeamien taustalla on usein rakenteellinen virhe, esimerkiksi päällysrakenteen riittämätön mitoitus alusrakenteen routivuusvaihteluiden tasaami- seksi. Pituussuuntaisten halkeamien syynä on tyypillisesti tien poikkileikkauksen epätasainen routiminen, joka johtuu tien reunoille ja sivuille talven aikana kertyneistä auratuista lumikinoksista, jotka toimivat lämpöeristeenä tien reunoilla. Tällöin rou- dan syvyys ja siten myös routanousu on ajoradan keskiosassa suurempi, jolloin tien poikkileikkauksessa routanousu on epätasaista. Pituushalkeama syntyy, mikäli rou- nousuero tien keskiosan ja reunan välillä käy niin suureksi, että siitä aiheutuvat jänni- tykset ylittävät materiaalin lujuuden. Vastaava routanousuero voi syntyä myös tien reunaosan ja lähes sulana pysyvän pientareen ulkoreunan välille. Tällöin halkeama syntyy tyypillisesti päällysteen reunaan. Routa voi myös sulaessaan edesauttaa hal- keamien muodostumista, sillä tien kantavuuden aleneminen roudan sulamisvaiheessa ja kantavuuden vaihtelut lisäävät vaurioitumisen riskiä. (Ehrola 1996, s. 320–323; Doré & Zubeck 2009, s. 93–96; Belt ym. 2002, s. 52–56.)

2 Tavoitteet ja rajaukset

2.1 Tavoitteet

Tämän työn tavoitteena oli kehittää Suomen oloihin sopiva tapa hallita päällystettyjen teiden rakenteellista kuntoa käyttämällä hyväksi mahdollisimman paljon olemassa olevaa mittaustietoa, täydentämällä sitä puuttuvien osien, tarkastelemalla aihepiiriä toiminnallisena kokonaisuutena sekä kytkemällä tarvittavia palasia ennakkoluottomasti yhteen. Työn tavoitteena oli muodostaa toimintamalli tai kehikko, jolla tien rakenteellinen kunto olisi hallittavissa lähinnä verkkotason toiminnansuunnittelussa. Lopputuloksen tulisi olla yksinkertainen tien rakenteellista kuntoa kuvaava luokiteltavissa oleva tieto/tunnusluku, joka tuo lisäarvoa olemassa olevien pintakuntokuvien tunnuslukujen lisäksi.

Haasteena tieverkon rakenteellisen kunnan hallinnassa on löytää sellaisia ratkaisuja, jotka soveltuvat erilaisille teille eivätkä edellytä liian suurta lähtötiedon keruutarvetta. Lähtötietojen keruun tulisi olla nopeaa ja toistettavissa olevaa. Tarkastelutavan tulisi olla sidoksissa tien kestävyteen ja kuormitukseen (Ikääntyminen, liikenne ja ilmasto). Rakenteellisen kunnan tunnusluvun tulisi olla ennakoiva ja sen tulisi ainakin jossain määrin korreloida pinnasta mitattujen tunnuslukujen kanssa.

Rakenteellisen kunnan tilakuvauksessa käytettävän tunnusluvun tulisi olla helposti tuotettava ja helposti ymmärrettävä. Tunnusluvulta edellytetään seuraavassa taulukossa lueteltuja ominaisuuksia.

Taulukko 2. Rakenteellista kuntoa kuvaavan tunnusluvun tavoiteltavia ominaisuuksia.

Ominaisuus	Tavoite
Kuvaavuus	Tunnusluvun tulee kuvata tien rakenteellisen kunnan tilaa riittävän kattavasti. Sen tulee pystyä kuvaamaan koko päällystettyä tieverkkoa tai ainakin sen keskeisintä osaa. Ideaalitalanteessa sen tulee kyetä ottamaan huomioon sekä ikääntymisestä, liikenteestä että ilmastosta aiheutuvat vaikutukset.
Tiedontarve	Tunnusluvun tuottamiseen tarvittavan tiedontarpeen tulee olla rajattu ja kustannuksiltaan realistinen.
Hankittavuus	Tunnusluvun tuottamiseen tarvittavat lähtötiedot tulee pystyä mittaamaan liikenteen nopeudella ja jatkuvana. Tunnusluku tulee olla päivitettävissä.
Luotettavuus	Tunnusluvun tulee olla toistettava ja sillä tulee pystyä tuottamaan vuosikehitys.
Ennustettavuus	Tunnusluvun tulee olla ennustettavissa.
Selittävyys	Tunnusluvulla tulee olla odotettu kytkentä muihin havaintoihin, joita tiestöstä on saatavissa. Tällaisia ovat mm. vauriot ja pinnan muodossa tapahtuvat muutokset.
Lisäarvo	Tunnusluvun tulee tuottaa sen hankkimiskustannuksia vastaava lisäarvo, jotta se koetaan houkuttelevaksi tunnusluvuksi.

Työ pohjautuu malliin, jossa tien rakenteellinen kunto, pintakunto sekä tietä rasittava liikennekuormitus ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Kuvaan pitäisi liittää myös ilmastorasitus, mutta sitä ei tässä työssä tarkoituksellisesti käsitellä. Ilmastotietoa tulisi kuitenkin käyttää esimerkiksi tien rakenteisiin liittyvien ominaisuuksien vuodenaikavaihtelun määrittämisessä. Liikennekuormitus syntyy tiellä liikkuvista ajoneuvoista, jotka muodostavat tiehen rasituksia. Rasituksen dynaamisuus riippuu ajonopeudesta ja tien pinnan muodosta. Rasitus aiheuttaa vasteita (muodonmuutoksia) tierakenteissa ja rakenne elää muodostaen muutoksia pinnan muotoon. Muutokset tien pinnan muodossa aiheuttavat liikennesäätömuutosten kasvun ja se yhdessä ilmastorasituksen kanssa aiheuttavat tiehen lisää muodonmuutoksia ja vaurioita. Mallissa pyritään kytkemään tien rakenteet, pinnan muoto ja vallitseva kuormitus yhteen ja tarkastelemaan tierakenteen toimintaa kuormituksen alaisena siinä tilassa kuin se on tarkasteluhetkellä. Tien rakenteen suunnitteluvaiheessa käytetyt mitoitusmenetelmät tuodaan osaksi tien toimivuuden tarkastelua riippumatta siitä, missä elinkaaren vaiheessa tie tarkasteluhetkellä on.

2.2 Rajaukset

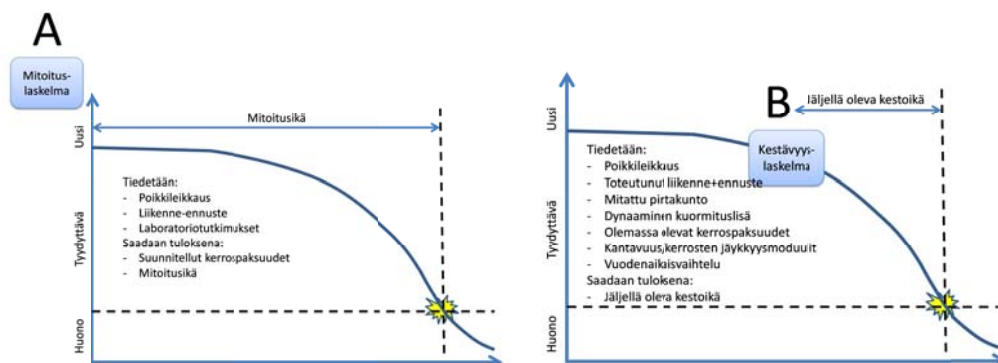
Työn aihepiiri oli laaja ja monilta osin vaikea. Rajallisten resurssien takia työn tavoitteet rajattiin siten, että malli kuvattiin tarvittavilta osin ja sille tehtiin pilotinomainen kokeilu valituille kohteille. Resurssit eivät riittä tarkastelemaan mallia koko Suomen erityyppisten teiden kannalta. Tällainen tarkastelu suositellaan tehtäväksi myöhemmin. Lisäksi malliin liittyy useita lähtötietojen ja parametrien selvittämistarpeita, joita ei tässä vaiheessa luonnollisestikaan ehditty selvittää.

3 Tutkimussuunnitelma

3.1 Tarkastelukokonaisuuden määrittäminen

Uusia teitä suunniteltaessa tehdään mitoituslaskelmia, joilla rakenteet suunnitellaan siten, että ne kestävät tietyn mitoitusiän. Mitoitukseen vaikuttavat mm. liikenne, ilmasto ja rakenteiden materiaalit. Tämä kuvaa mitoituslaskelmien käyttötilannetta A. Käyttötilanteelle on ominaista, että tietä ei ole vielä olemassa eikä siitä siten ole käytettävissä mitattua tietoa. Liikenteestä ja sen rasittavuudesta on käytettävissä vain ennuste. Materiaalien ominaisuuksista on käytettävissä vain alustavat laboratoriotutkimusten tulokset, joita ei ole otettu siitä materiaalista, jota tiehen tullaan käyttämään. Rakennekerrosten paksuuksista ja toimivuudesta tiessä on käytettävissä vain suunnitelma. Kuivatuksen toimivuudesta ja vuodenaikaisvaihtelusta ei ole juuri mitään tietoa. Rakenteiden oletetaan käyttäytyvän monikerrosteorian mukaan. Mitoituksen lopputuloksena saadaan mitoitusikä.

Olemassa olevien teiden suhteen voidaan puhua käyttötilanteesta B, joskin kyseisiä laskentamenetelmiä ei ole juurikaan käytetty, koska niitä pidetään liian epäluotettavina. Kuitenkin käyttötilanteessa B on huomattavasti enemmän informaatiota käytettävissä kuin tilanteessa A ja lisäksi ennustettava jakso on paljon lyhyempi. On totta, että teiden käyttäytyminen muuttuu ikääntymisen aikana ja siitähän vasteiden laskennassa juuri onkin kyse, mutta vastaavasti tietoa laskelman tekemiseen on käytettävissä enemmän. Tien poikkileikkaus ja sijainti ovat täysin tiedossa. Liikennetietoa on sekä tarkasteluhetkestä että sitä aiemmin koko tien historiasta. Tien pintakunto on mitattu ja sen perusteella on määritettävissä tiehen kohdistuva dynaaminen kuormitus. Tierakenteiden todelliset paksuudet ja taipumat ovat mitattavissa. Kerrosten jäykkyyshuomiot ovat laskettavissa. Tietoa vuodenaikaisvaihtelusta ja kuivatuksen toimivuudesta on mittauksilla saatavissa. Kaiken kaikkiaan kestoikälaskelman mitoitus/vastelaskennassa on käytettävissä paremmat lähtötiedot kuin mitä tilanteessa A oli. Lähtötietoja joudutaan hiukan täydentämään uusilla mittauksilla, erilaisia tietoja joudutaan yhdistämään tai jalostamaan ja monikerrosteorian soveltuvuutta ehkä hiukan venyttämään tai sitä joudutaan kehittämään.



Kuva 7. Mitoituslaskelmien käyttötilanteet.

Tässä työssä rakenteellisen kunnan hallintaa varten kehitettiin sellainen kokonaisuus, jossa tien olemassa oleva tila otetaan huomioon niin liikennekuormituksen, kunto-tilan kuin rakenteellisen tilankin suhteen. Tarkoituksena oli muodostaa sellainen tunnusluku, jonka käyttö on yksinkertaista, ymmärrettävää ja suoraviivaista. Tien rakennetta pyrittiin hallitsemaan tarkastelemalla tietä toiminnallisena kokonaisuutena. Kokonaisuuteen liittyy sellainen ”kolmiyhteys”, missä ongelmaa tarkasteltiin kolmen erityyppisen analyysin kautta. Kehitettävät analyysit olivat seuraavat:

- | | |
|----|-------------------|
| A. | Kuormitusanalyysi |
| B. | Rakenneanalyysi |
| C. | Kestävyysanalyysi |

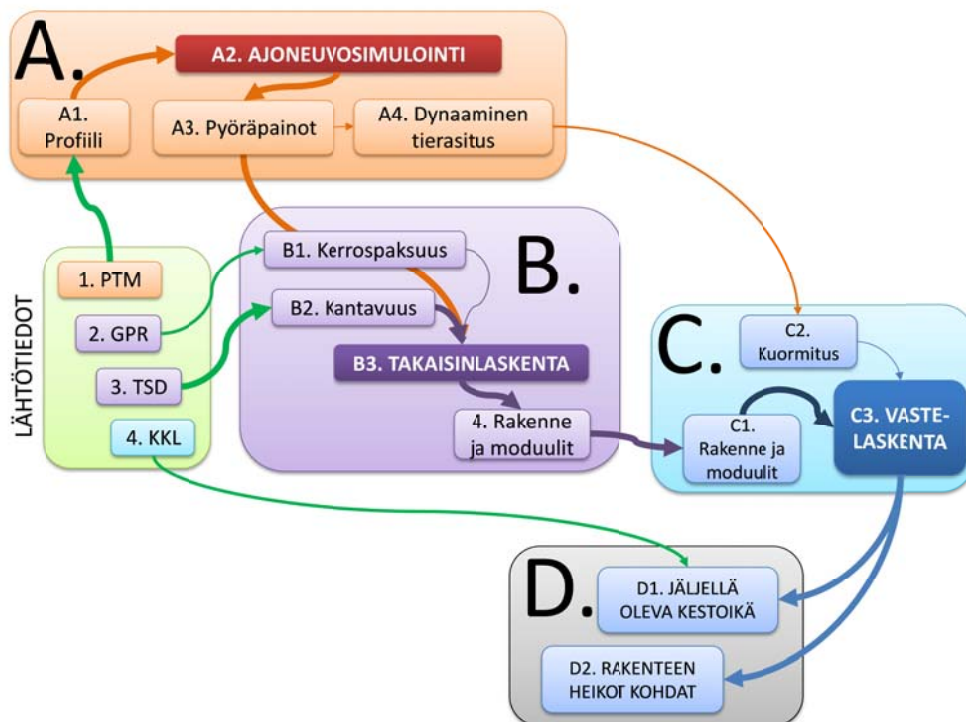
Analyysi tuotettiin tiheällä tarkastelutaajuudella. Pintaprofiileja tarkasteltiin lähtien 10 cm:n välein kerätyistä lähtötiedoista. Rakenne- ja kestävyysanalyysi tuotettiin 10 m tarkastelutaajuudella.

3.1.1 Kuormitusanalyysi

Kuormitusanalyysin lähtökohtana on tien nykyinen kuntotila ja sillä vallitseva liikennekuormitus. Kuntotila suunniteltiin otettavaksi huomioon palvelutasomittausten ja vauriomittausten tuottaman informaation kautta. Liikennekuormitus suunniteltiin otettavaksi huomioon liikennelaskentojen tuottaman liikennemäärän sekä siitä muodostetun kuormituskertymän ja simuloimalla muodostettavan dynaamisen vaikutuksen avulla. Dynaaminen kuormituslisä suunniteltiin muodostettavan ajoneuvosimuloinnin avulla simuloimalla 2-akselisen kuorma-auton liikkeitä, voimia ja kuormitusta jatkuvana tietona siten, että käytettäisiin 7 vapausasteen ajoneuvomallia, tien nopeusrajoitusta ja palvelutason mittauksessa saatavia pituus- ja poikkiprofiileja. Dynaaminen vaikutus tuotettaisiin sekä pituus- että poikkisuunnassa ja se liitettäisiin tierekisteristä saadun, tieosakohtaisen, vuotuisen kaistakohtaisen kuormituskertalukutiedon (KKL) yhteyteen. Koska tien kunto ei ole pituus- ja poikkisuunnassa homogeeninen, pinnan muoto vaihtelee. Muuttuva pinta toimii herätteenä dynaamiselle (ajoneuvo)systemille ja aiheuttaa sille liikkeitä, jotka massan hitauden kautta synnyttävät vasteita eli kuormitusta, jännityksiä ja taipumia. Kuormitus on siten sekä pituus- että poikkisuunnassa hyvin epähomogeenista. Epähomogeeninen kuormitus (kuormitus-huiput) kohdistuu tien epätasaisiin (ja usein heikoimpiin) kohtiin, jolloin tierasitus entisestään voimistuu ja tien rakenteellisen kestävyuden heikkeneminen kiihtyy.

Kuormitusanalyysi palvelee rakenneanalyysiä tuottaen taipumamittauksessa käytetyn pyöräkuorman ja kestävyysanalyysiä tuottaen vastelaskennassa käytettävän pyöräkuorman. Esitetty kolmen simuloinnin välinen vuorovaikutusmalli lähestyy ns. SIM-mallia, ”Stress-In-Motion”, jossa rasitus, kapasiteetti ja vasteet kytketään dynaamisesti yhteen.

Kuormitusanalyysi vaatii päivittämistä, koska tien pinnan muoto muuttuu, liikenne ja sen kuormitus muuttuvat ja niiden yhteisvaikutuksena dynaaminen rasitus muuttuu.



Kuva 8. Analysointikomponentit.

3.1.2 Tien rakenneanalyysi

Tien rakenneanalyysissä tarvitaan lähtötietona jatkuva tieto tien kantavuudesta ja rakennekerrosten paksuuksista. Tien kantavuus mitataan jatkuvatoimisella kantavuusmittarilla (TSD) ja rakennekerrosten paksuudet määritetään maatumalla tehdyissä mittauksista. Saaduista tiedoista muodostetaan tien rakennekerrosten moduulit takaisinlaskennan avulla (esim. KUAB). Saatu tieto on jatkuvaa. Rakenneanalyysi palvelee kestävyysanalyysiä jäljellä olevan kestoiän laskennassa.

Rakenneanalyysi on päivitettävä analyysi, koska tien taipumatieto muuttuu sekä vuoden aikana että pitkällä aikavälillä. Rakenneanalyysillä päivitetään tierakenteiden ominaisuustietoa, joka muuttuu tien elinkaaren aikana.

3.1.3 Tien kestävyysanalyysi

Kuormitus- ja rakenneanalyysien tulokset toimivat kestävyysanalyysin lähtötietona ja kestävyysanalyysi tapahtuu tien mitoituslaskennan avulla. Jatkuva dynaaminen liikennekuormitus ja tierakenteen kerrosmoduulit syötetään ohjelmaan. Kestävyysanalyysissä muodostetaan rakenneanalyysin tulosten perusteella rakennekerrosten materiaalien parametrit ja niille tehdään ensin vastelaskenta ja sen jälkeen väsymisanalyysi. Liikenne- ja ilmastokuormitus otetaan huomioon dynaamisen liikennekuormituksen sekä ohjelman sisältämän ilmastovyöhyketiedon avulla samalla tavalla kuin jos oltaisiin mitoittamassa uutta rakennetta. Kestävyysanalyysin lopputuloksena syntyy jatkuva tieto tien jäljellä olevasta kestoiästä (joka saattaa olla myös negatiivinen). Mitoitusohjelma tuottaa sen kuormituskertalukukertymän, jonka rakenne vielä kestää. Sitä verrataan nykyiseen kuormitukseen (ml. dynaaminen osuus ja sen kasvu), jonka lopputuloksena saadaan tien rakenteen jäljellä oleva kestoikä.

Kestävyysanalyysiä voidaan päivittää aika ajoin, koska sen lähtötietoina toimivat kuormitus ja kerrosten jäykkyystieto muuttuvat. Laskelma on siis iteratiivinen, joka reagoi mittauksilla ja niiden perusteella tehtyjen kuormitus- ja rakenneanalyysin muuttuvaan tietoon. Kestävyysanalyysin tarkkuus siis paranee, mitä lähemmäksi jäljellä olevan kestoajan päättymistä tien tila tulee. Kestävyysanalyysin oletetaan soveltuvan laajalle alueelle tiestöä, koska lähtötietoja hankitaan kultakin tieltä niin yksilöllisesti.

3.1.4 Tarkastelutavan validointi

Lopuksi tehdään kehitetyn tarkastelutavan validointi vertaamalla saatua jäljellä olevaa kestoikää tiellä havaittuihin haitallisiin kohtiin ja tekemällä tarvittavilta osin kalibrointeja mallien eri vaiheisiin. Käyttökelpoisin tieto validoinnissa on päällysteen vauriotieto, mutta sen tulisi olla luotettavasti mitattua ja siinä tulisi pystyä erottelemaan vauriotyypit toisistaan.

3.1.5 Validoinnissa ilmenneiden erojen analysointi

Mallin validoinnista saadaan tuntumaa sen toimivuuteen sekä vinkkejä tarkistettavista kohdista. Mallia viritetään saatujen kokemusten mukaan.

3.2 Lähtötietojen hankinta

3.2.1 Yleistiedot

Tarkasteluun valitaan kohteita, jotka edustavat tierakenteen, kuormituksen sekä kunnan osalta erilaisia tilanteita. Kohteita tarkastellaan aluksi tieosan pituisina kokonaisuuksina. Tieosan yleistiedot pysyvät pääsääntöisesti samoina. Yleistiedot otetaan kuntotietorekisteristä 100 m jaksojen tarkkuudella.

3.2.2 Palvelutasomittaukset

Kuormitusanalyysin lähtökohtana ovat palvelutasomittaukset. Niitä on tehty nykyisen verkkotason mittausurakan yhteydessä niin kattavasti, ettei tätä työtä varten tarvittu uusia mittauksia..

Kun kuormitusanalyysissä halutaan ottaa huomioon tilan muuttuminen ajassa, tarvitaan palvelutasomittauksia ja kuormitussimulointeja useamman vuoden ajalta.

3.2.3 Kantavuusmittaukset

Liikenneviraston rekistereissä oleva kantavuustieto ei riitä tässä tehtävän rakenneanalyysin pohjaksi, koska se on pistemäistä, liian harvaa sekä liian vanhaa. Siksi tarvitaan uudet kantavuusmittaukset (taipumamittaukset) jatkuvana taipumatietona.

3.2.4 Rakennepaksuudet

Kantavuustiedon hyväksikäyttö edellyttää tietoa rakennepaksuuksista, koska kerrosten kimmomoduuleja ei voida muutoin määrittää. Siksi tarvitaan myös tieto tierakenteen kerrosten kerrospaksuuksista jatkuvana tietona.

3.2.5 Pintavauriot

Kohteilta tarvitaan myös pintavaurioiden mittaus, jotta rakenteellisen kunnan tunnusluku voidaan validoida. Validoinnissa tarkastellaan, miten hyvin kestoikäpuutteet osuvat yhteen tiellä havaittavien haitallisten kohtien kanssa. Tähän tarkoitukseen käytettävän vauriotiedon tulisi olla riittävän luotettavaa. PVK-tiedon luotettavuudesta riippuu, miten hyvin validointi on tehtävissä.

3.3 Kohteiden valinta

3.3.1 Kriittiset tekijät

Mallin toiminnan ja testaamisen kannalta kriittiset tekijät tulee tunnistaa ja ne tulee tavalla tai toisella pyrkiä huomioimaan. Periaatteessa mallin rakentamisessa tulisi olla erilaisia teitä, joilla olisi ainakin kaksi lähes ääripäätä edustavaa tekijän arvoa. Tässä vaiheessa tuntui siltä, että sellaisia olivat raskas kuormitus – kevyt kuormitus, hyväkuntoinen tie – huonokuntoinen tie, hyvin kantava tie – huonosti kantava tie, rakennekerroksiltaan paksu tie – ohutrakenteinen tie. Tekijöistä tulee pystyä valitsemaan kaikkein tärkeimmät ja niiden kombinaatioiden muodostamisessa tulee pyrkiä suunniteltuun kokeeseen. Kriittisten tekijöiden kannalta tulee ensin valita vastemuutujat, joille haetaan optimiarvoja tai joilla mallin toiminnallisuutta arvioidaan.

Täydelliseen koesuunnitteluun ei tässä päästä, vaan pyritään pikemminkin ottamaan kohteiksi sellainen joukko, joka edustaa erilaisia tilanteita ja joiden perusteella pystytään arvioimaan muodostetun mallin ja lopputuotteen toimivuutta. Kohteiden tuli sijaita tiestömittausten kustannusten takia maantieteellisesti rajatulla alueella.

3.3.2 Alustava kohdeluettelo

Alustavan kohdeluettelon laadinnassa huomioitiin raskaan liikenteen määrä, päällystetyyppi ja ns. havaintotiekohteet. Ykkösprioriteetin kohteiksi luokiteltiin ne kohteet, jotka otettiin mukaan tähän selvitykseen ja kakkosprioriteettiin luokiteltiin muut kohteet. Kokonaismittausmäärä oli 244 km, josta tämän selvityksen piiriin kuului 109,7 km. Kohteiden valintaa rajoitti se, että rakennekerrosten paksuusmittauksia oli jo tehty ja saatavissa tietyiltä teiltä Kaakkois-Suomen alueelta. Lisäksi haluttiin muodostaa kantavuusmittauksia varten sellainen sujuvasti mitattava reitti, joka oli mahdollista toteuttaa siinä aikaikkunassa, joka ulkomaisella toimijalla oli käytettävissä. Reitin toisena tarkoituksena oli näin esitellä jatkuvaa kantavuusmittausta ja sen käytökelpoisuutta.

Kohteita oli yhteensä 44 kpl ja niiden sisältä voitiin valita tarkemmin homogeenisia pätkiä sen mukaan miten nähtiin tarpeelliseksi. Tämän selvityksen kohteita olivat seuraavan taulukon lihavoidulla merkityt kohteet ja niistä kerättiin myös rakennekerrosten paksuustiedot.

Taulukko 3. Kohdeluettelo.

Kohde	Tiepiiri	Tie	Ajorata	Suunta	Kaista	Aosa	Aet	Losa	Let	Pituus	Maa	Urakka	Paksuustieto
1	1	6	1	1	1	5	0	5	2442	2442	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
2	1	6	1	1	1	7	0	7	6330	6330	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
3	1	6	0	1	1	123	0	123	4759	4759	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
4	3	6	0	1	1	204	0	204	6373	6373	Fin	TSD_priority_2	
5	3	6	0	1	1	205	0	205	3601	3601	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
6	3	6	0	1	1	206	0	206	8500	8500	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
7	3	6	0	1	1	207	0	207	5244	5244	Fin	TSD_priority_2	
8	3	6	0	1	1	208	0	208	7704	7704	Fin	TSD_priority_2	
9	3	6	0	1	1	209	0	209	2551	2551	Fin	TSD_priority_2	
10	3	6	0	1	1	210	0	210	7456	7456	Fin	TSD_priority_2	
11	3	6	0	1	1	211	0	211	2621	2621	Fin	TSD_priority_2	
12	3	6	0	1	1	212	0	212	12198	12198	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
13	3	6	0	1	1	213	0	213	1328	1328	Fin	TSD_priority_2	
14	3	6	1	1	1	213	1328	213	2816	1488	Fin	TSD_priority_2	
15	3	6	2	2	1	213	1328	213	2816	1488	Fin	TSD_priority_2	
16	3	6	0	2	1	213	0	213	1328	1328	Fin	TSD_priority_2	
17	3	6	0	2	1	212	0	212	12198	12198	Fin	TSD_priority_2	
18	3	6	0	2	1	211	0	211	2621	2621	Fin	TSD_priority_2	
19	3	6	0	2	1	210	0	210	7456	7456	Fin	TSD_priority_2	
20	3	6	0	2	1	209	0	209	2551	2551	Fin	TSD_priority_2	
21	3	6	0	2	1	208	0	208	7704	7704	Fin	TSD_priority_2	
22	3	6	0	2	1	207	0	207	5244	5244	Fin	TSD_priority_2	
23	3	6	0	2	1	206	0	206	8500	8500	Fin	TSD_priority_2	
24	3	6	0	2	1	205	0	205	3601	3601	Fin	TSD_priority_2	
25	3	6	0	2	1	204	0	204	6373	6373	Fin	TSD_priority_2	
26	3	3842	0	1	1	1	0	1	9035	9035	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
27	3	368	0	1	1	5	0	5	5960	5960	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
28	3	377	0	1	1	4	0	4	6666	6666	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
29	3	377	0	1	1	5	0	5	6420	6420	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
30	3	14705	0	1	1	2	0	2	6246	6246	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
31	3	15	0	1	1	13	0	13	8398	8398	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
32	3	15	0	1	1	17	0	17	8797	8797	Fin	TSD_priority_1	Kyllä
33	3	3662	0	1	1	1	0	1	4828	4828	Fin	TSD_priority_1_Run1	Kyllä
34	3	3662	0	1	1	2	0	2	5372	5372	Fin	TSD_priority_1_Run1	Kyllä
35	3	3662	0	1	2	1	0	1	4828	4828	Fin	TSD_priority_1_Run1	
36	3	3662	0	1	2	2	0	2	5372	5372	Fin	TSD_priority_1_Run1	
37	3	3662	0	1	1	1	0	1	4828	4828	Fin	TSD_priority_2_Run2	
38	3	3662	0	1	1	2	0	2	5372	5372	Fin	TSD_priority_2_Run2	
39	3	3662	0	1	2	1	0	1	4828	4828	Fin	TSD_priority_2_Run2	
40	3	3662	0	1	2	2	0	2	5372	5372	Fin	TSD_priority_2_Run2	
41	3	3662	0	1	1	1	0	1	4828	4828	Fin	TSD_priority_2_Run3	
42	3	3662	0	1	1	2	0	2	5372	5372	Fin	TSD_priority_2_Run3	
43	3	3662	0	1	2	1	0	1	4828	4828	Fin	TSD_priority_2_Run3	
44	3	3662	0	1	2	2	0	2	5372	5372	Fin	TSD_priority_2_Run3	

3.4 Mallin käyttökelpoisuuden analysointi

Mallin käyttökelpoisuutta arvioidaan vertaamalla saatuja jäljellä olevia kestoikiä tien nykyiseen kuntoon ja päättelemällä miten hyvin tulos osuu havaintoihin ja missä tilanteissa malli toimii tai ei toimi.

Kohdeluettelossa on muutama kohde, joissa voidaan tehdä erillistarkasteluja. Niillä voidaan selvittää mm.:

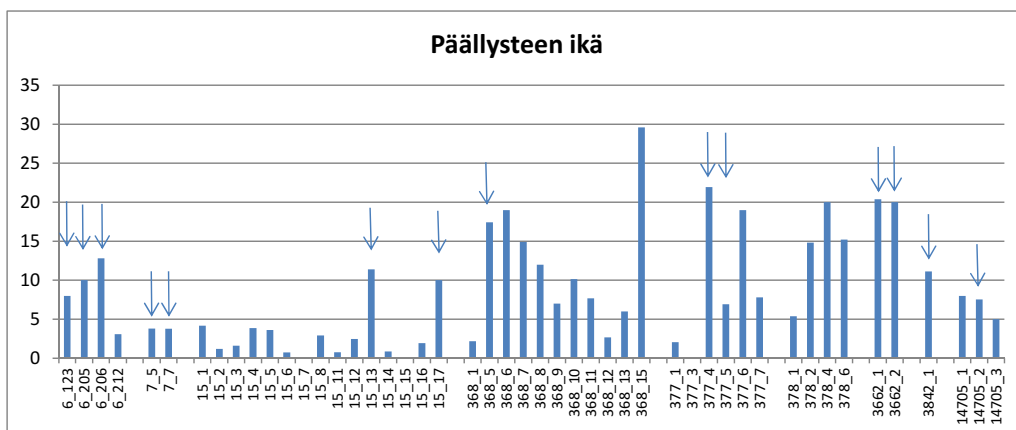
- rakenteellisen kunnon vuosikehitystä
- kevään/kesän mittauksen vaikutusta rakenteelliseen kuntoon
- päällystyömenpiteen vaikutusta rakenteelliseen kuntoon

4 Mittaukset

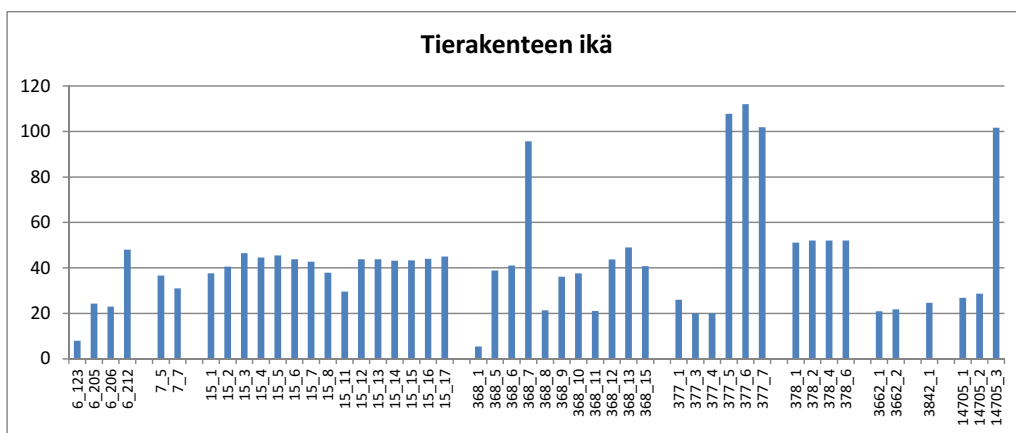
4.1 Yleistiedot

Kohteita valittaessa tarkasteltiin niiden yleistietoja, jotka saatiin kuntotietorekisteristä. Kerätyt yleistiedot olivat päällysteen ikä, tierakenteen ikä, tien kuormituskertaluku, tien leveys, päällysteen leveys, tien nopeusrajoitus ja päällystetyyppi. Tierakenteen ikä määritettiin teknisen toimenpiteen päivämäärän ja mittausajankohdan välisenä erotuksena. Seuraavissa kuvissa on esitetty eräiden tieosien yleistietoja. Nuolilla merkityt kohteet ovat niitä kohteita, jotka valittiin mitattaviksi ja tarkasteltavaksi tässä työssä. Valitut kohteet ja yhteenveto niiden yleistiedoista on esitetty taulukossa 4.

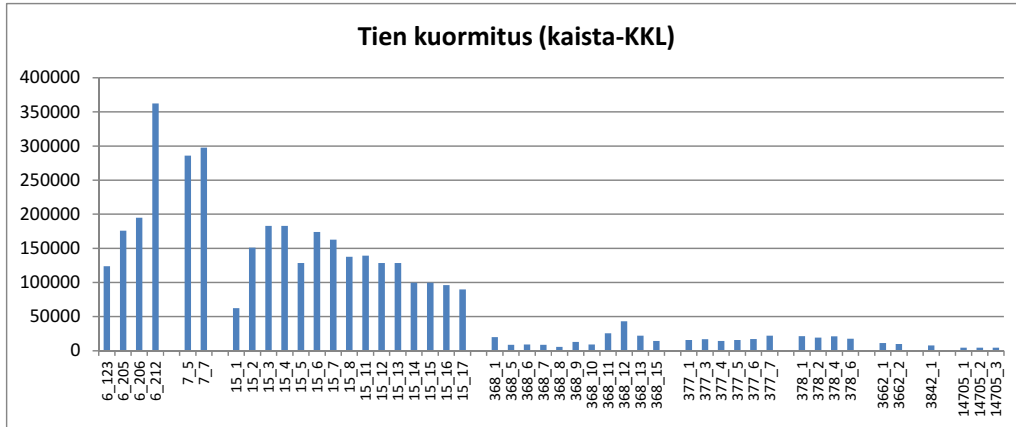
Valtatiekohteet edustivat vilkasliikenteisiä ja raskaasti kuormittuvia teitä. Valtatien 6 tieosa 212 oli erityisen kuormitettu tieosa. Maantiet 368, 377 ja 3662 ja yhdystie 14705 edustivat PAB-päällysteisiä, kapeita, vähäliikenteisiä ja iältään vanhoja teitä. Näillä teillä oli eniten korjaustarvetta.



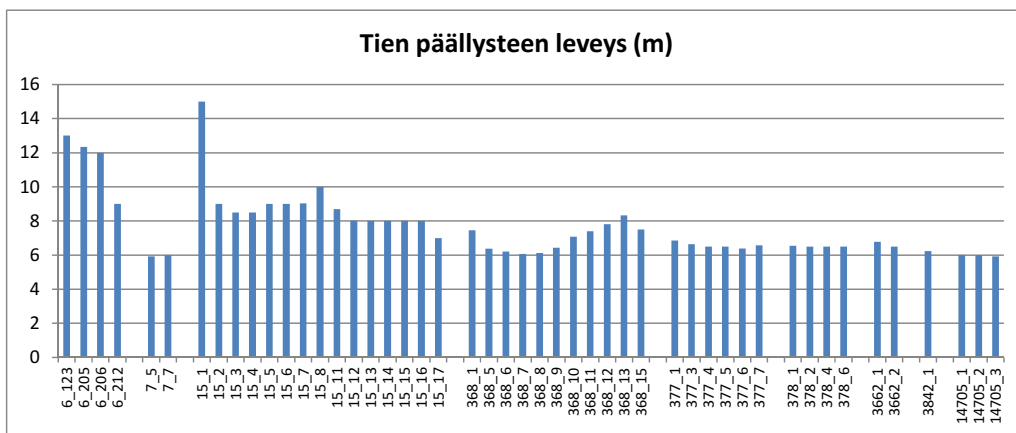
Kuva 9. Alustavien kohteiden päällysteen ikä ja valitut kohteet.



Kuva 10. Alustavien kohteiden tierakenteiden ikä.



Kuva 11. Alustavien kohteiden staattinen liikennekuormitus.



Kuva 12. Alustavien kohteiden päällysteen leveys.

Taulukko 4. Yhteenveto valittujen kohteiden yleistietojen keskiarvoista.

Tie_osa	Osa	Pituus	Pääll_ikä	Rak_ikä	Kaista_KKL	Nopeusraaj.	Päällyste-leveys	Ajoradan leveys	Päällyste-luokka
6_123	123	4759	8.0	8.0	123904	97.5	13.0	11.0	1
6_205	205	3601	10.0	24.3	175791	98.9	12.4	11.0	1
6_206	206	8500	12.8	23.0	194776	99.8	12.0	11.0	1
6_212	212	12193	3.1	48.0	362234	95.7	9.0	7.5	1
7_5	5	2442	3.8	36.6	285915	120.0	5.9	7.5	1
7_7	7	6330	3.8	31.0	297815	120.0	6.0	7.5	1
15_13	13	8398	11.4	43.8	128489	100.0	8.0	7.5	1
15_17	17	8797	10.0	45.0	89681	80.0	7.0	8.0	1
368_5	5	5960	17.4	38.9	8841	79.0	6.4	5.8	2
377_4	4	6666	21.9	20.0	14445	80.0	6.5	6.5	2
377_5	5	6420	6.9	107.8	15752	72.5	6.5	6.2	2
3662_1	1	3745	20.4	20.9	11174	56.9	6.8	6.8	1.6
3662_2	2	5372	20.0	21.8	9656	80.0	6.5	6.5	2
3842_1	1	9035	11.1	24.7	7751	73.4	6.2	5.6	1.8
14705_2	2	6246	7.5	28.7	4461	80.0	6.0	6.0	2

4.2 Palvelutaso

Kohteiden palvelutasoa tarkasteltiin tässä työssä pituussuuntaisen ja poikkisuuntaisen epätasaisuuden sekä pinnan vaurioitumisen avulla. Pituussuuntaista epätasaisuutta kuvaava IRI ja pitkäaaltoista epätasaisuutta kuvaavat RMS-tunnusluvut saatiin [palvelutasomittauksista](#). Poikkisuuntaista epätasaisuutta kuvataan pääasiassa reunapainauaman avulla, mutta valtatie 6 tieosaa 212 tarkastellaan myös urautumisen näkökulmasta, koska sillä saattaa olla deformaatiouraa. Reunapainauama laskettiin [reunapainauaman tunnusluvun kehittäminen](#) -projektissa tuotetun määritelmän mukaisesti. Pinnassa ja rakenteissa olevia vaurioita tarkasteltiin päälystevaurio-kartoituksen PVK-tiedon avulla.

4.2.1 Pituussuuntainen epätasaisuus

Kohteiden pituussuuntaista epätasaisuutta tarkasteltiin useiden tunnuslukujen avulla. Näitä olivat IRI, sekä aallonpituusalueilta 0,5–1,0, 1–3 m, 3–10m ja 10–30 m lasketut RMS-tunnusluvut. Yhteenveto kohteiden pituussuunnan epätasaisuudesta on esitetty taulukossa 5. Taulukon solujen väritykset on muodostettu sarakeittain siten, että vihreä väri kuvaa vaihtelualueen pieniä arvoja ja punainen suuria arvoja. Pääteillä sijaitsevat kohteet ovat kuutostien tieosaa 123 lukuun ottamatta tasaisia ja muualla epätasaisempia. Maantiellä 368 sijaitseva tieosa oli melko epätasainen ja se vaihteli normaalia enemmän (hajonnat). Maanteillä 3662 ja 3842 sekä erityisesti yhdystiellä 14705 pitkäaaltoinen epätasaisuus oli suuri. Valtatiellä 7 oli paljon painumia, mutta ne eivät näy pituussuuntaisissa tunnusluvuissa juuri ollenkaan. Ainut tunnusluku, joka antaa viitteitä painumista myös valtatiellä 7, on RMS30:n hajonta, joka oli [Tien haitallisen pituussuuntaisen epätasaisuuden määrittäminen -selvityksen](#) paras painaumia kuvaava tunnusluku. Pitkäaaltoisissa RMS-tunnusluvuissa saattaa olla sekoituneena myös tien mäkisyttä.

Taulukko 5. Yhteenveto kohteiden pituussuuntaisesta epätasaisuudesta 2013.

Tie Osa	IRI vasen		IRI oikea		RMS1		RMS3		RMS10		RMS30	
	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta
6	1.4	1.1	1.5	1.3	0.17	0.14	0.35	0.32	1.0	0.9	3.4	3.0
123	2.0	1.7	2.3	2.0	0.22	0.16	0.52	0.42	1.6	1.5	4.7	4.8
204	1.1	0.7	1.2	1.0	0.17	0.11	0.29	0.28	0.8	0.7	2.8	2.2
205	1.4	0.9	1.7	1.5	0.19	0.17	0.37	0.36	1.0	0.8	3.8	3.0
206	1.5	1.2	1.5	1.4	0.19	0.18	0.35	0.35	1.0	0.8	3.6	2.8
212	1.4	0.9	1.3	0.9	0.15	0.07	0.31	0.22	0.8	0.6	3.0	2.3
7	1.4	1.1	1.4	1.3	0.16	0.10	0.29	0.26	1.2	1.1	5.3	5.7
5	1.4	1.1	1.5	1.2	0.14	0.08	0.28	0.24	1.3	1.4	6.0	6.5
7	1.4	1.1	1.4	1.3	0.16	0.10	0.30	0.27	1.1	1.0	5.0	5.3
15	1.2	0.9	1.2	1.0	0.16	0.10	0.28	0.22	1.0	0.9	4.7	4.1
13	1.3	1.0	1.3	1.0	0.18	0.09	0.30	0.22	1.0	0.9	4.9	4.1
17	1.1	0.8	1.1	1.0	0.14	0.11	0.25	0.22	0.9	0.9	4.5	4.0
368	2.0	3.5	1.9	3.6	0.15	0.33	0.43	0.84	1.7	2.1	6.9	6.1
5	2.0	3.5	1.9	3.6	0.15	0.33	0.43	0.84	1.7	2.1	6.9	6.1
377	1.7	1.5	1.8	1.5	0.19	0.14	0.42	0.37	1.4	1.2	6.4	5.4
4	2.2	1.7	2.1	1.8	0.24	0.16	0.53	0.43	1.5	1.3	5.9	4.6
5	1.3	1.2	1.4	1.2	0.14	0.11	0.31	0.26	1.3	1.2	6.8	6.1
3662	2.3	2.6	2.5	2.7	0.20	0.20	0.57	0.62	2.2	2.2	9.0	8.6
1	2.1	2.4	2.4	2.6	0.20	0.19	0.54	0.59	2.1	2.1	8.9	9.1
2	2.5	2.8	2.5	2.8	0.19	0.20	0.58	0.64	2.3	2.2	9.0	8.1
3842	2.0	2.4	2.1	2.4	0.18	0.16	0.47	0.52	2.1	2.1	11.6	10.1
1	2.0	2.4	2.1	2.4	0.18	0.16	0.47	0.52	2.1	2.1	11.6	10.1
14705	2.0	2.1	2.2	2.5	0.21	0.22	0.55	0.62	2.2	2.1	13.5	12.4
2	2.0	2.1	2.2	2.5	0.21	0.22	0.55	0.62	2.2	2.1	13.5	12.4
Keskim.	1.6	1.8	1.7	1.9	0.18	0.16	0.39	0.44	1.4	1.5	6.2	7.0

4.2.2 Poikkisuuntainen epätasaisuus

Poikkisuuntaista epätasaisuutta tarkasteltiin myös useiden tunnuslukujen avulla. Näitä olivat maksimiura, harjanne, reunapainuma ja sivukaltevuus. Muut tunnusluvut paitsi reunapainuma sisältyivät palvelutasomittauksissa tuotettaviin tunnuslukuihin. Yhteenveto kohteiden poikkisuuntaisesta epätasaisuudesta on esitetty taulukossa 6.

Uraisimmat kohteet olivat pääteillä. Erityisen syviä uria oli kuutostien raskaasti kuormitetulla tieosalla 212. Reunapainumaa oli eniten 3-4-numeroisilla maanteilla sekä yhdystiellä. Eniten reunapainumaa oli maantiellä 3662. Harjanteen suhteen pätee sama mitä todettiin reunapainumasta.

Sivukaltevuudeltaan kohteilla oli pääsääntöisesti oikealle viettävä sivukaltevuus (kaarteissa luonnollisesti vaihtelua). Melko vähäinen sivukaltevuus oli kuutostien tieosalla 204 ja valtatiellä 7 tieosalla 7, jolla sivukaltevuus oli keskimäärin lähes nolla.

Taulukko 6. Yhteenveto kohteiden poikkisuuntaisesta epätasaisuudesta 2013.

Tie Osa	Maksimiura		Reunapainuma (0 muk)		Reunapainuma (ei 0)		Harjanne		Sivukaltevuus		Out track
	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta	
6	10.0	4.7	4.9	5.0	6.4	4.8	8.0	4.4	-2.2	2.0	0.0 %
123	6.7	3.2	4.0	3.3	4.9	3.0	4.5	2.4	-2.9	1.1	0.2 %
204	8.7	3.3	3.1	4.0	7.1	2.9	8.2	3.0	-0.4	2.3	0.0 %
205	9.4	3.5	2.5	3.6	3.8	3.8	6.5	3.3	-2.2	1.6	0.0 %
206	7.9	2.3	3.8	3.0	4.3	2.8	6.1	2.1	-3.0	1.3	0.0 %
212	13.7	4.9	7.7	6.1	8.9	5.7	11.1	5.2	-2.4	2.0	0.0 %
7	10.6	2.9	3.7	4.5	7.8	3.3	10.1	2.6	-0.3	3.3	0.0 %
5	10.0	3.1	4.6	3.2	6.2	2.0	8.8	2.6	-1.4	2.3	0.0 %
7	10.9	2.8	3.4	4.9	9.1	3.6	10.6	2.5	0.1	3.5	0.0 %
15	6.3	5.8	5.1	5.9	8.2	5.6	6.6	6.1	-1.5	3.0	0.0 %
13	6.1	5.4	4.5	4.6	6.6	4.2	6.1	5.6	-1.7	2.2	0.0 %
17	6.5	6.1	5.6	6.9	10.0	6.4	7.1	6.5	-1.2	3.6	0.0 %
368	5.8	2.8	15.2	11.6	18.6	10.1	11.4	4.7	-1.9	2.2	0.9 %
5	5.8	2.8	15.2	11.6	18.6	10.1	11.4	4.7	-1.9	2.2	0.9 %
377	5.2	3.4	12.4	12.6	18.7	10.9	8.8	5.1	-1.5	3.6	0.2 %
4	6.2	3.5	13.1	13.7	21.0	11.6	10.1	5.7	-1.3	3.7	0.2 %
5	4.1	2.9	11.7	11.2	16.6	9.8	7.4	3.9	-1.8	3.6	0.3 %
3662	9.1	6.6	15.9	18.2	24.5	17.4	13.0	7.2	-1.7	3.1	0.9 %
1	10.0	6.1	14.2	19.0	24.0	19.3	12.9	7.1	-1.5	3.3	1.1 %
2	8.4	7.0	17.4	17.4	24.9	15.7	13.1	7.3	-1.8	2.9	0.7 %
3842	5.9	3.9	10.9	13.5	16.8	13.6	7.7	5.3	-2.2	3.7	1.1 %
1	5.9	3.9	10.9	13.5	16.8	13.6	7.7	5.3	-2.2	3.7	1.1 %
14705	3.3	3.5	14.9	16.5	20.1	16.2	8.8	6.6	-2.0	3.5	0.7 %
2	3.3	3.5	14.9	16.5	20.1	16.2	8.8	6.6	-2.0	3.5	0.7 %
Keskim.	7.8	5.2	8.5	11.3	12.4	11.7	8.7	5.6	-1.8	3.0	0.3 %

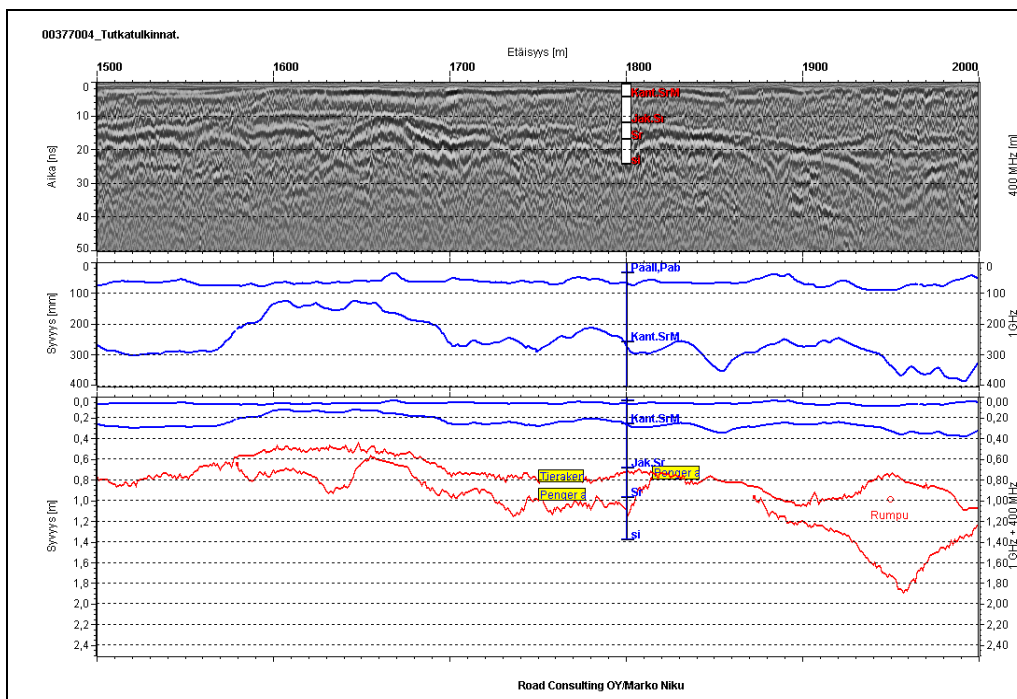
4.2.3 Pintavauriot

Pintavaurioita on kartoitettu pääasiassa alemman luokan tiestölle verkkotason PVK-inventointina. Muilta kohteilta paitsi vt 7 oli saatavana PVK-tieto. PVK-tieto on 100 m tasoista tietoa, missä kullekin jaksolle on ilmoitettu korjaustarpeessa oleva metriäärä (= %-osuus). Korjaustarpeen inventoinnissa ei eritellä tien suuntia tai kaistoja. PVK-tietoa käytettiin tässä työssä sen arvioimiseen, mitkä 100m jaksot olivat vaurioituneita ja korjaustarpeessa. Kun korjaustarvetta kuvaava luku oli suuri, niin kyseinen jakso oli myös rakenteeltaan huonokuntoinen. Tällöin kestoikälaskelmien tuli tukea kyseistä arviota.

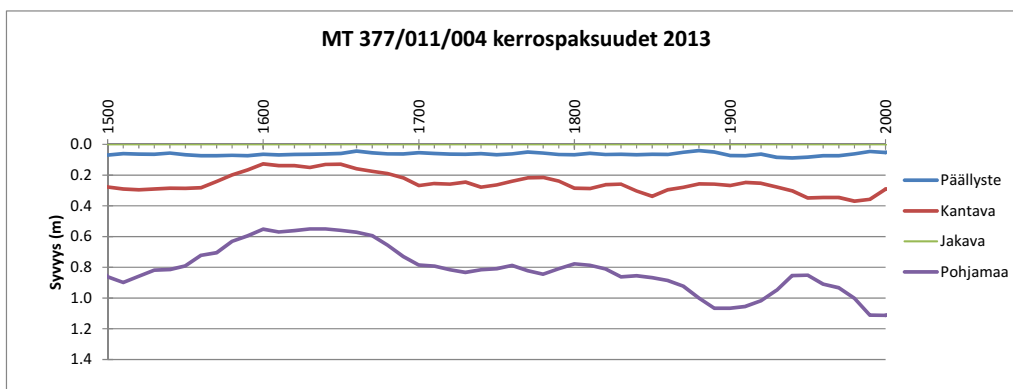
Kestoikälaskelmien kannalta mielenkiintoisimpia kohteita olivat maantiet 368, 377, 3662 ja 3842.

Päällystevaurioiden kartoitustulokset on esitetty kohteittain taulukossa 7 ja profiilikuvina liitteessä 3.

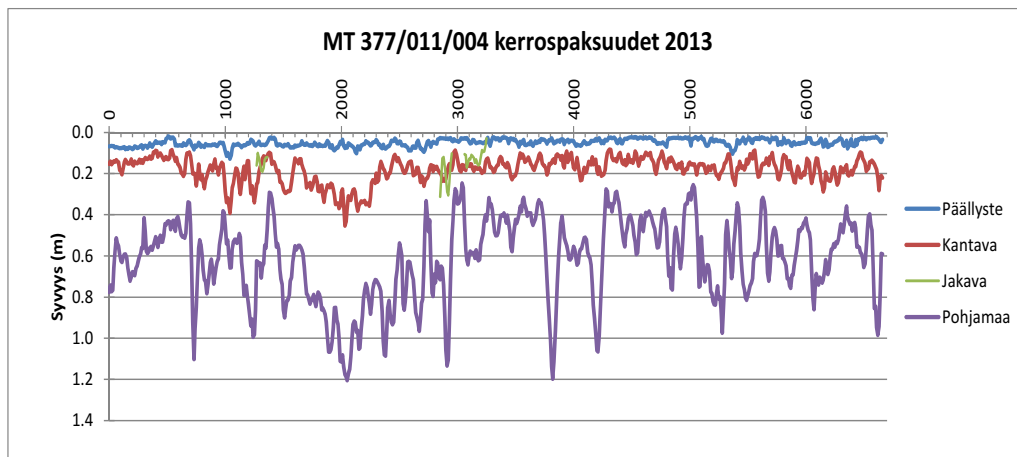
- Penger materiaali tunnistettiin kattavasti, mutta vaikutti siltä, että siihen sisältyi usein jakavan (ja/tai suodatinkerroksen) materiaalia. Siitä ei kuitenkaan voitu olla varmoja. Penger materiaalin paksuus vaihteli eniten.
- Joissakin tilanteissa oli tunnistettu tierakennemateriaalien ja penger materiaalin rajapinta. Pohjamaan korkeustason tulkintaan jäi jonkin verran epävarmuutta.
- Joissakin tilanteissa oli tunnistettu myös kalliopinnan syvyys.
- Kerros materiaalien määrittämisen luotettavuutta on mahdollista arvioida niiltä kohteilta (maantiet), joilta oli käytettävissä maatutkakuvat (Roadconsulting Oy).



Kuva 13. Kerrospaksuuksien määrittäminen maatutkakuvista. Maantie 377 tieosa 4, paaluväli 1500–2000. Kairaustiedon perusteella paalulla 1800 väitettiin olevan myös jakava kerros. {1}.



Kuva 14. Kerrosten syvyydet maatutkauksen tulostiedoista. Maantie 377, tieosa 4, paaluväli 1500–2000 m. Numeerisissa tuloksissa jakavaa kerrosta ei ole.



Kuva 15. Kerrosten syvyydet maatutkauksen tulostiedoista. Maantie 377, tieosa 004.

Taulukko 8. Kerrospaksuustiedon edustavuus kohteittain.

tie/osa	Päällyste	Kantava	Jakava	Tierakenne	Penger	Pohjamaa
vt 6/205	100 %	100 %	23 %	99 %	47 %	99 %
vt 6/206	100 %	100 %	0 %	100 %	18 %	100 %
vt 6/212	99 %	99 %	11 %	100 %	30 %	100 %
vt 15/013	100 %	100 %	0 %	100 %	16 %	100 %
mt 368/005	100 %	99 %	4 %	67 %	100 %	100 %
mt 377/004	100 %	100 %	6 %	100 %	100 %	100 %
mt 377/005	100 %	100 %	41 %	95 %	100 %	100 %
mt 3662/001	100 %	98 %	99 %	99 %	100 %	99 %
mt 3662/002	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
mt 3842/001	100 %	5 %	99 %	16 %	100 %	100 %
yt 14705/002	100 %	4 %	100 %	56 %	100 %	100 %

Yhteenveto kerrospaksuuksista kohteittain on esitetty taulukossa 8. Taulukon solujen taustaväritys on peräisin Excelin taulukkosolujen muotoilusta, joka havainnollistaa kullakin sarakkeella olevien lukujen suuruussuhteita esittämällä suurimmat luvut vihreällä ja pienimmät punaisella.

- Sidottujen kerrosten keskimääräinen paksuus vaihteli valtateillä välillä 20–30 cm ja maantiekohteilla 5–12 cm. Sidotun kerroksen keskimääräinen paksuus oli suurin valtatie 6 tieosalla 206 ja pienin maantiellä 377 tieosalla 004. Sidottujen kerrosten paksuuden hajonta vaihteli välillä 2–12 cm ollen suurinta valtatie 6 tieosalla 206.
- Rakennekerrosten keskimääräinen paksuus vaihteli välillä 43–167 cm ollen suurin valtatie 15 osalla 013 ja pienin maantien 3842 osalla 001. Valtateillä rakennekerrosten paksuus oli metristä puoleentoista. Muilla kohteilla se oli puolesta metristä metriin. Maantien 3842 rakennepaksuustieto vaikuttaa liian pieneltä.
- Kantavan kerroksen keskimääräinen paksuus oli valtatiekohteilla noin 50 cm ja muilla kohteilla 11–36 cm. Kantavan kerroksen kerrospaksuus vaihteli eniten valtatiellä 15, valtatiellä 6/206 ja maantiellä 368.

- Jakavan kerroksen keskimääräinen paksuus vaihteli välillä 8-63 cm. Paksuhko jakava kerros oli kohteilla vt 6/205, 6/212 ja mt 3662. Jakavaa kerrosta ei tunnistettu olevan ollenkaan kohteilla vt6/206 ja vt15/013. Jakavan kerroksen paksuus vaihteli eniten maantiellä 3662.
- Pohjamaan yläpinnan keskimääräinen syvyys vaihteli välillä 33–266 cm ollen suurin kohteella vt 15 ja pienin kohteella mt 3842. Valtatiekohteilla pohjamaan yläpinta oli noin 1,7–2,7 m syvyydessä ja maantiekohteilla 33–105 cm.

4.3.1 Tilastolliset tunnusluvut

Kerrospaksuuksista tuotettujen tilastollisten tunnuslukujen yhteenveto on esitetty taulukossa 9. Kustakin kerroksesta on esitetty kerrospaksuuden keskiarvo ja hajonta tieosittain. Lisäksi on esitetty vastaavat tunnusluvut tierakenteen paksuudesta ja pohjamaan syvyydestä.

Valtatiellä sijainneet kohteet olivat päällystepaksuudeltaan paksuja. Maantien 377/004 päällyste oli selvästi yksikerroksinen ja mt 3662/mt 368 ja mt 377/005 ja yhdystien 14705/002 päällysteet olivat yli kahden kerroksen päällysteitä. Muiden kohteiden päällystepaksuus oli niiden välimaastossa. Paksuudet kuitenkin vaihtelivat myös kohteiden sisällä.

Taulukko 9. Kerrospaksuuksien keskiarvot ja hajonnat tieosittain (m).

tie/osa	Päällyste		Kantava		Jakava		Tierakenne		Penger		Pohjamaa	
	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta
vt 6/205	0.21	0.03	0.40	0.07	0.56	0.06	1.18	0.45	0.43	0.21	1.73	0.39
vt 6/206	0.30	0.12	0.48	0.13			1.05	0.25	0.43	0.21	1.84	0.42
vt 6/212	0.22	0.03	0.47	0.08	0.63	0.10	1.33	0.37	0.38	0.19	2.15	0.57
vt 15/013	0.21	0.05	0.55	0.15			1.67	0.63	0.38	0.17	2.66	0.63
mt 368/005	0.12	0.04	0.36	0.15	0.15	0.16	0.52	0.42	0.43	0.21	0.77	0.29
mt 377/004	0.05	0.02	0.18	0.06	0.15	0.06	0.57	0.20	0.38	0.17	0.62	0.20
mt 377/005	0.12	0.03	0.29	0.07	0.08	0.12	0.71	0.32	0.37	0.21	0.80	0.28
mt 3662/001	0.09	0.03	0.13	0.04	0.49	0.21	0.92	0.23	0.22	0.04	0.93	0.20
mt 3662/002	0.07	0.02	0.15	0.04	0.60	0.25	1.05	0.25	0.22	0.04	1.05	0.25
mt 3842/001	0.07	0.03	0.20	0.07	0.18	0.10	0.10	0.24	0.40	0.19	0.33	0.19
yt 14705/002	0.10	0.04	0.11	0.06	0.24	0.13	0.43	0.44	0.45	0.29	0.59	0.31

Päällystepaksuudet on luokiteltu taulukossa 10 paksuusluokkiin, joilla haettiin lähinnä sitä, miten monta 4 cm:n päällystekerrosta kullakin kohteella oli. Valtatiekohteilla päällysteen paksuus oli suurin vastaten pääosin 4-5 kerrosta. Maantiekohteilla päällystepaksuus vastasi yhtä tai kahta päällystekerrosta. Poikkeuksena olivat mt 368 ja mt 377/005, joilla päällystepaksuutta oli kaikissa paksuusluokissa. Yhdystiellä 14705 oli useita päällystepaksuusluokkia.

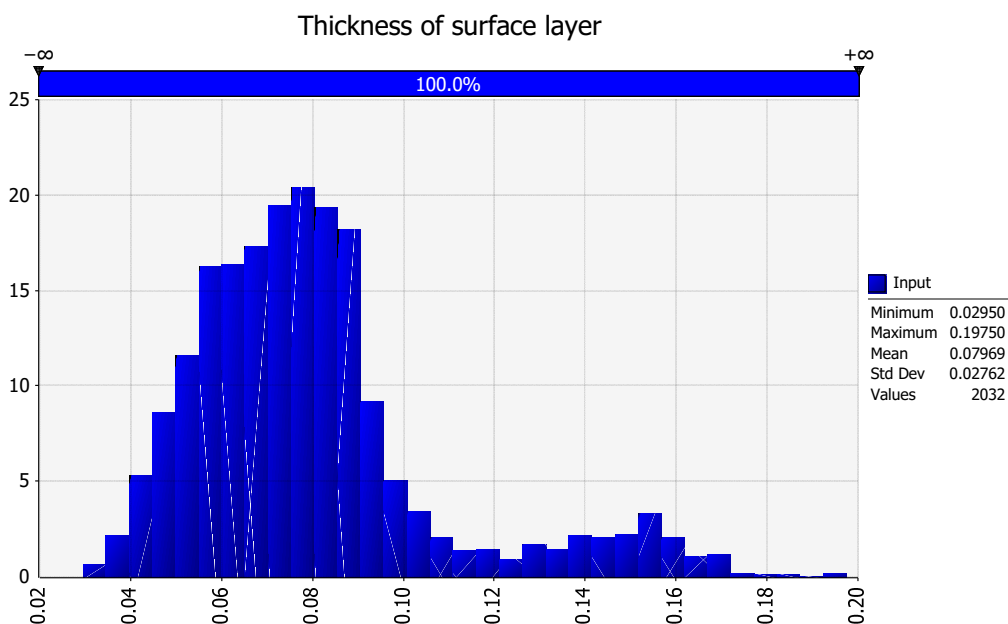
Kohteista oli noin 70 % sellaisia, joilla päällystepaksuus ylitti 8 cm.

Taulukko 10. Päällysteen kerrospaksuusluokkien osuudet tieosittain.

tie/osa	Päällysteen paksuusluokka					puuttuu
	0-4 cm	4.1-8 cm	8.1-12 cm	12.1-16 cm	16- cm	
vt 6/205				2 %	98 %	0 %
vt 6/206				5 %	95 %	0 %
vt 6/212				1 %	99 %	0 %
vt 15/013				4 %	96 %	
mt 368/005	2 %	12 %	45 %	28 %	14 %	0 %
mt 377/004	33 %	63 %	4 %			0 %
mt 377/005	1 %	5 %	35 %	57 %	1 %	0 %
mt 3662/001	1 %	58 %	23 %	15 %	4 %	0 %
mt 3662/002	2 %	59 %	37 %	1 %		
mt 3842/001	7 %	54 %	34 %	5 %	1 %	0 %
yt 14705/002	0 %	44 %	30 %	16 %	10 %	0 %
Yhteensä	4 %	28 %	19 %	11 %	39 %	0 %

4.3.2 Jakaumat

Kerrospaksuuksien jakaumia tarkasteltiin tarkemmin maantiellä 3662. Päällyste-paksuus oli keskimäärin 8 cm ja vaihteli välillä 3–20 cm. Tiellä oli selvästi yhden, kahden ja kolmen kerroksen päällystettä.

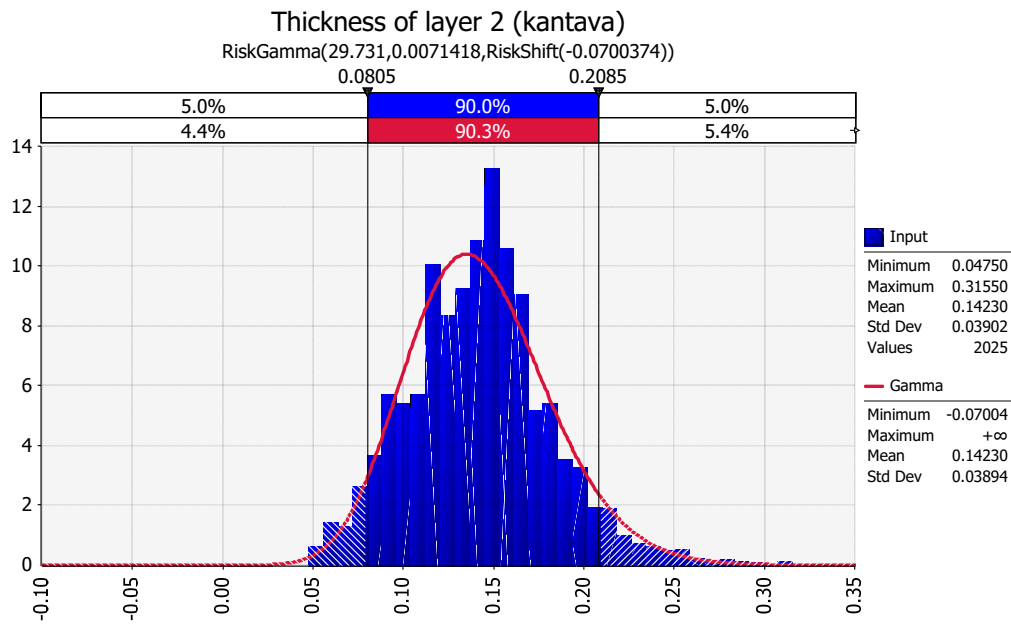


Kuva 16. Päällysteen paksuusjakauma mt 3662 (m).

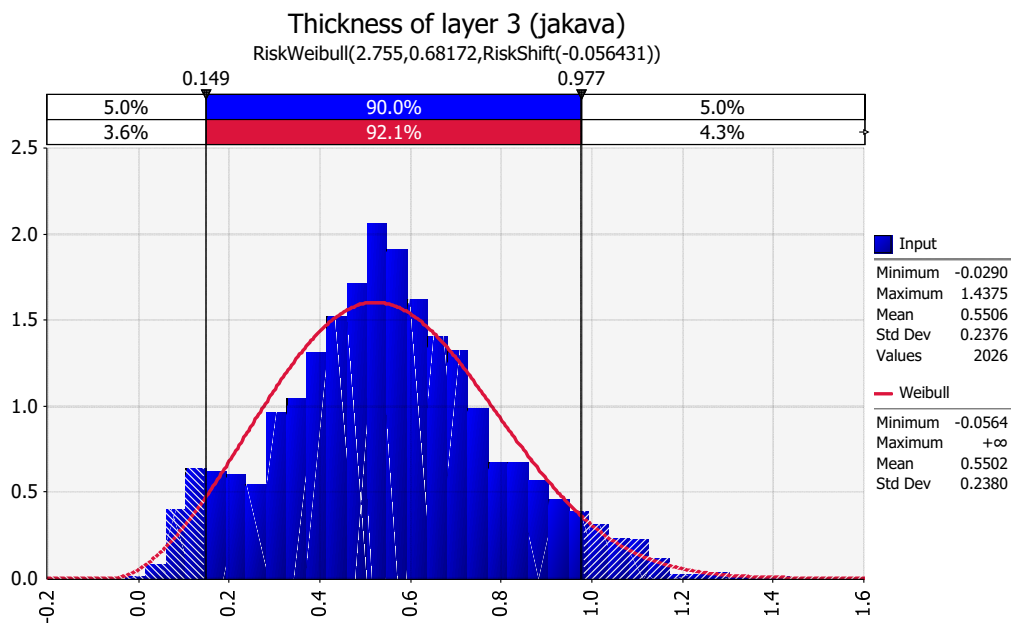
Kantavan kerroksen paksuusjakauma oli selvästi säännöllisempi ollen keskimäärin 14 cm ja vaihdellen välillä 5–32 cm. Sen jakauma oli lähes normaali ja siten luotettavan tuntuinen.

Jakavan kerroksen paksuus oli myös melko säännöllinen ja keskimäärin 55 cm, mutta se vaihteli melko paljon. Oli kohtia, joilla jakavaa kerrosta ei tunnistettu lainkaan ja sellaisia kohtia, joissa se oli erittäin suuri (1,4 m).

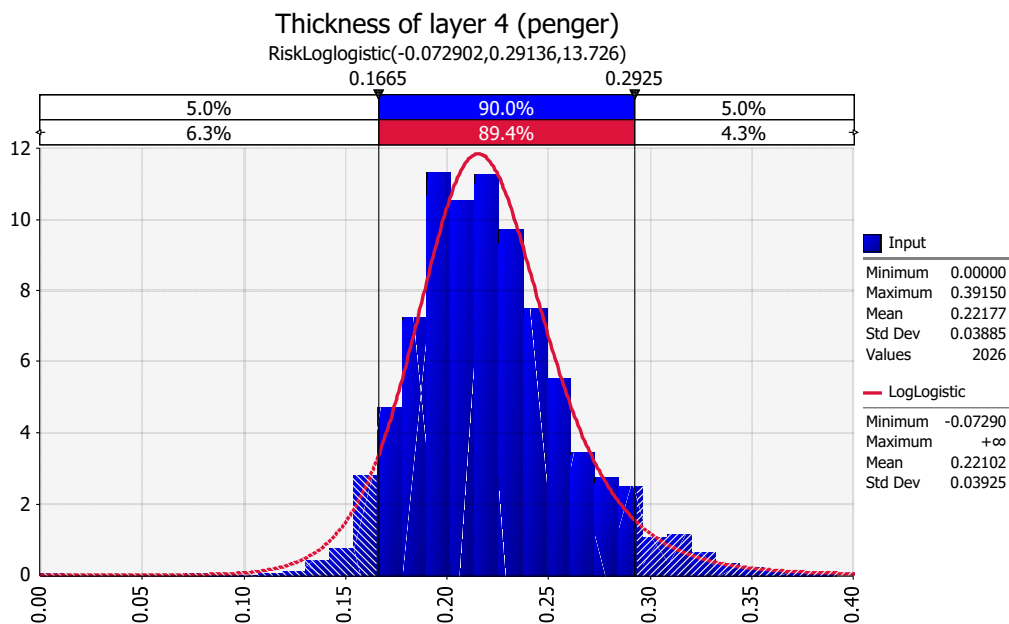
Pengerkerroksen paksuus vaihteli välillä 10–39 cm ollen keskimäärin 22 cm.



Kuva 17. Kantavan kerroksen paksuusjakauma mt 3662 (m).



Kuva 18. Jakavan kerrokset paksuusjakauma mt 3662 (m).



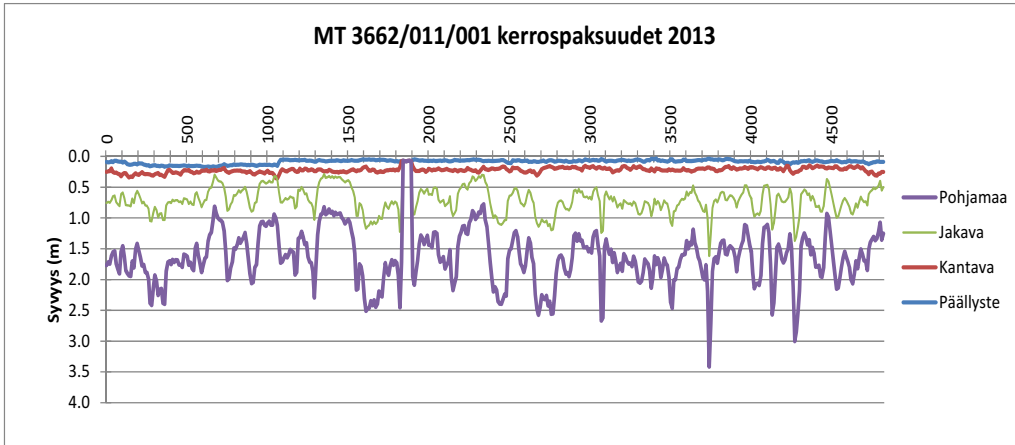
Kuva 19. Penger materiaalin paksuusjakauma mt 3662 (m).

4.3.3 Kerrospaksuuksien profiilit

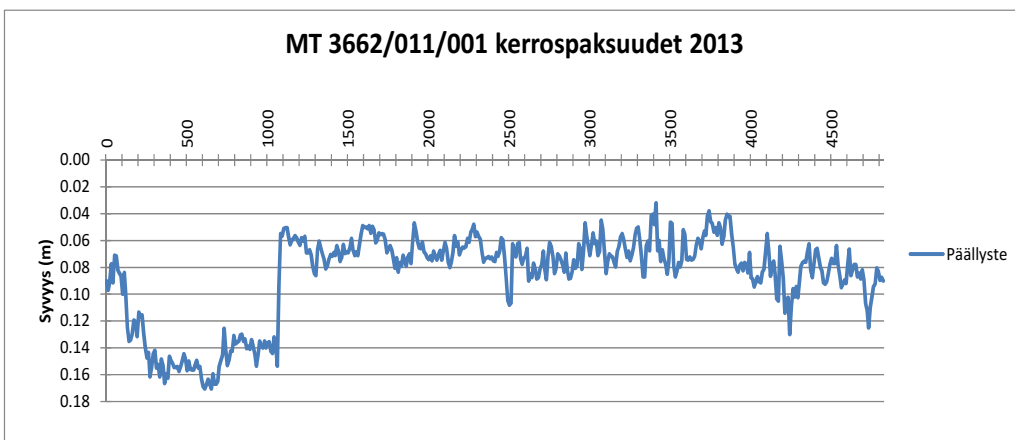
Maantien 3662 tieosan 1 suunnan 1 kerrospaksuusprofiileja on esitetty kuvissa 20–22. Jakavan ja pengerkerroksen paksuus vaihteli eniten. Päällystepaksuudessa oli havaittavissa kaksi osaa, missä se oli ensimmäisellä kilometrillä noin kaksinkertainen tieosan muuhun osaan nähden. Tieosan alussa oli kolminkertainen päällyste ja loppuosassa kaksinkertainen päällyste. Loppuosalla oli yksittäisiä kohtia, joissa päällysteen paksuus oli muuta osaa suurempi.

Kuvassa 22 on esitetty menetelmä, jolla tieosalta voidaan hakea erilaisia homogeenisiä pätkiä. Kumulatiivisten keskiarvosta laskettujen erojen (CUSUM) avulla voidaan muodostaa profiileja, joiden kulmakertoimien vaihtumiskohdat osoittavat homogeenisten osuuksien vaihtumiskohdat. Päällystepaksuuden suhteen tieosalla oli neljä erilaista homogeenistä osaa (0–100m, 100–1000m, 1000–3900m ja 3900–4800m).

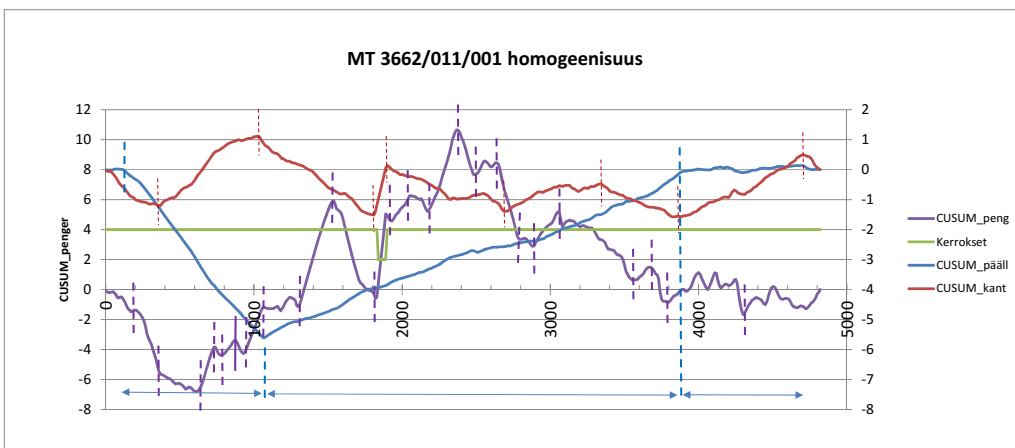
Homogeenisuutta voidaan tarkastella vastaavalla tavalla myös muiden kerrosten osalta. Kantavan kerroksen suhteen tieosalla oli 8 erilaista homogeenistä osaa. Pengerkerroksessa oli vastaavasti jo yli 20 erilaista homogeenistä osaa. Tieosan epähomogeenisuus kasvoi syvempiin kerroksiin mentäessä. Tieosa koostui rakennekerrosten suhteen 30 erillisestä osasta. Tien rakenne oli kokonaisuutena siis yhdellä tieosallakin hyvin epähomogeeninen.



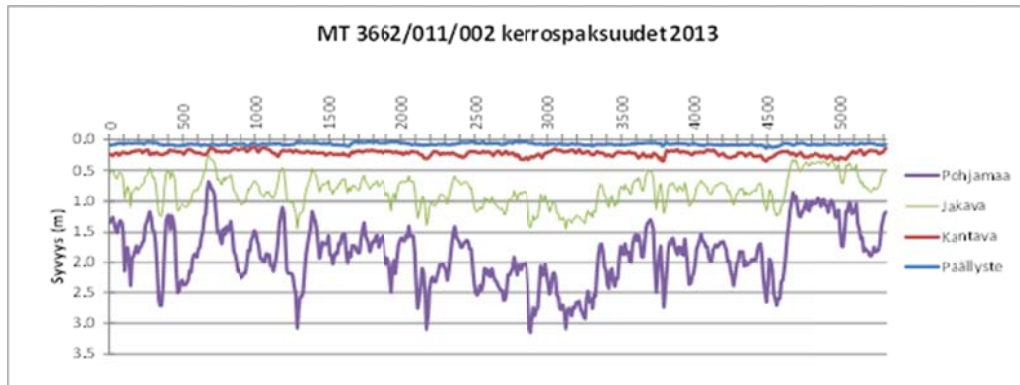
Kuva 20. Kerrosten syvyysprofiilit maantiellä 3662 tieosalla 1 suuntaan 1.



Kuva 21. Päällysteen paksuusprofiili maantiellä 3662 tieosalla 1 suuntaan 1.



Kuva 22. Kerrospaksuuksien homogeenisuus maantiellä 3662 tieosalla 1 suuntaan 1.



Kuva 23. Kerrosten syvyysprofiilit maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.

Muiden kohteiden kerrospaksuuksien profiilit on esitetty liitteessä 1.

4.4 Taipumat

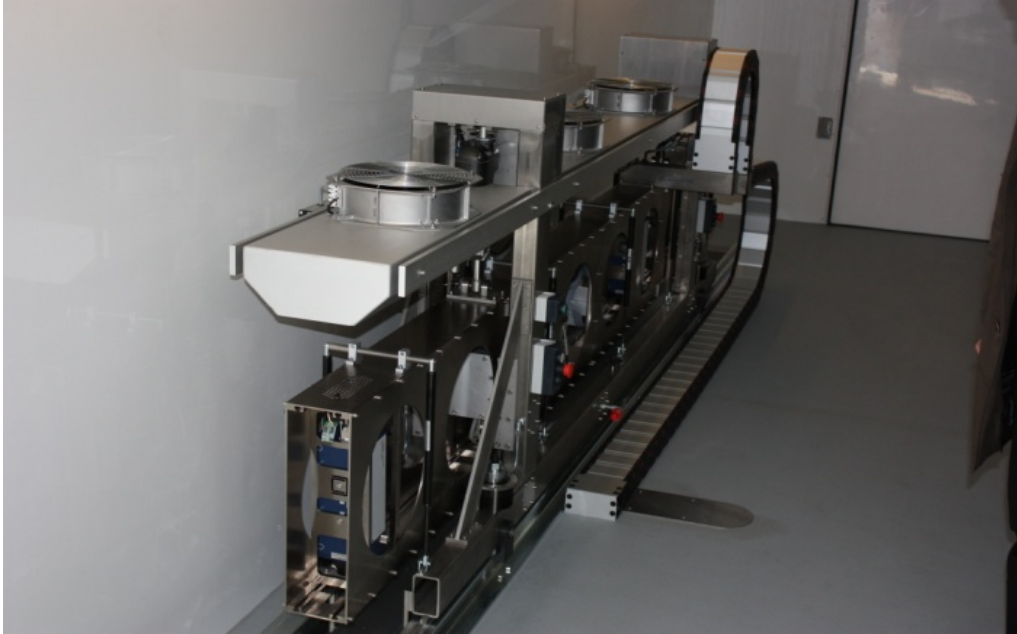
4.4.1 Mittaus

Tierakenteiden taipumat tuotettiin kahdella eri mittaustavalla. Perinteisen [pudotuspainolaitteen](#) tuottamien taipumien lisäksi tuotettiin taipumat jatkuvalla kantavuusmittauslaitteella (TSD). Todellisuudessa on kyse taipumanmittauslaitteesta, mutta Suomessa on vakiintunut termi kantavuusmittaus. Jatkuva kantavuusmittauslaite vuokrattiin puolalaiselta tutkimuslaitokselta



Kuva 24. Taipumien mittausauto – Traffic Speed Deflectometer (TSD).

Tien taipumien jatkuva mittaus perustui kehittyneeseen lasertekniikkaan. Mittaavat anturit oli asennettu puoliperävaunulliseen kuorma-autoon siten, että niitä oli kuormittavasta pyörästä noin 1,8 metrin matkalla. Antureilla rekisteröitiin tunnetun pyöräpainon aiheuttama taipuma päällysteessä vertaamalla sitä kuormittamattomaan tilanteeseen. Päällysteen pinnan taipumanopeuden määrittämisessä käytettiin Doppler-teknikkaa. Tieto prosessoitiin taipumiksi käyttämällä tietoa ajoneuvon liikkeistä, joka saatiin ajoneuvon koriin asennetuista liikeantureista.

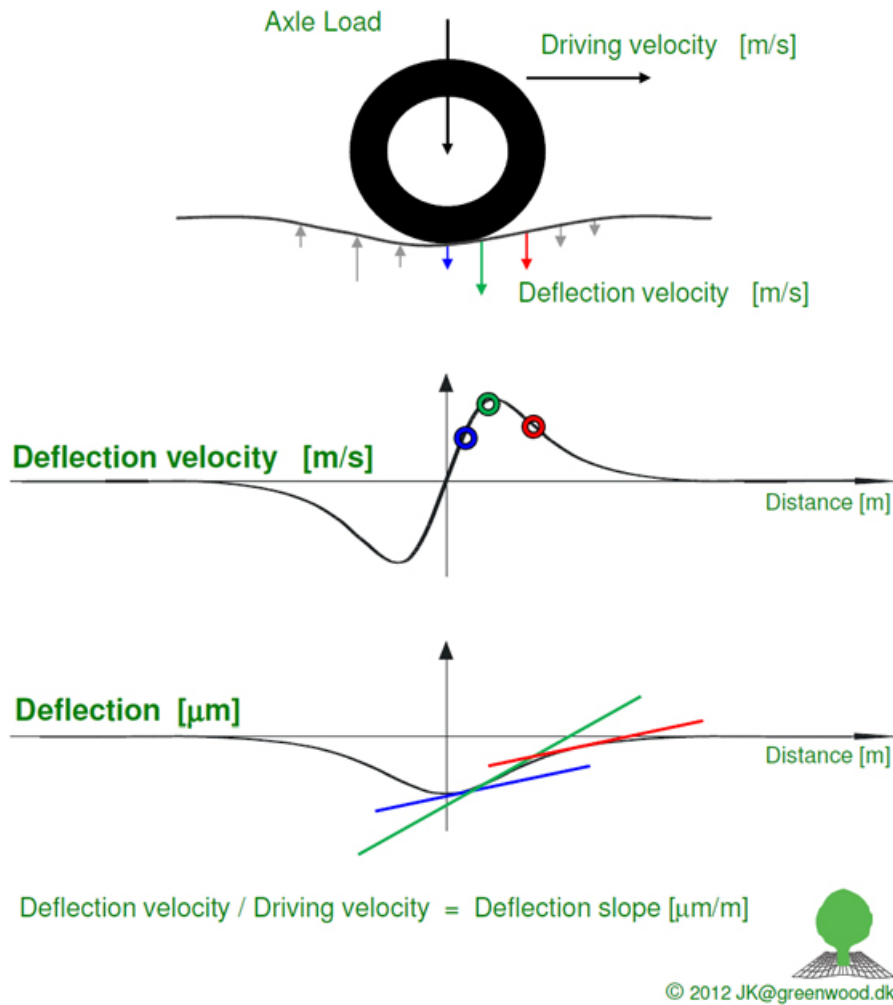


Kuva 25. Taipumien mittauspalkin Doppler anturit.

Puoliperävaunullinen kuorma-auto oli suunniteltu siten, että vetoauton ja perävaunun peräkkäisten akselien väli oli pitkä eikä vetoauto aiheuttanut vääristymiä päällysteen mittaustuloksiin. Anturit oli asennettu perävaunun taka-akselin eteen oikealle puolelle. Mittauksia voidaan tehdä jopa 70–80 km/h nopeudella miniminopeuden ollessa 38 km/h ja maksimimittausnopeuden 90 km/h. Akselipainona käytetään yleensä 10 tonnia. Tarkempi kuvaus mittaustiedon käsittelystä on esitetty lähteessä (Rasmussen et al. 2008).

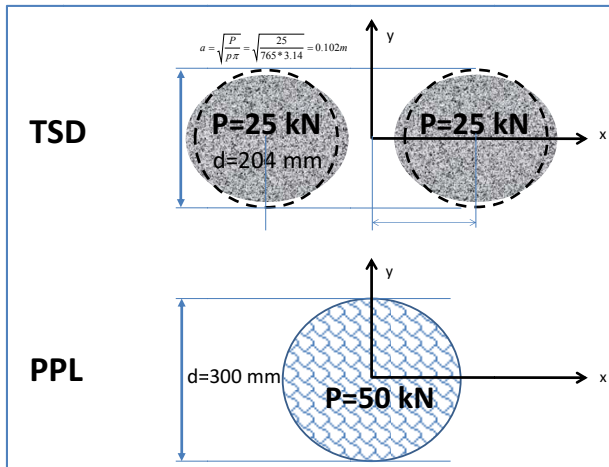
Mittauslaitteen etuja perinteiseen taipumamittaukseen verrattuna ovat mm., että

- Mittauksessa käytettävä pyöräpaino vastaa todellista ajoneuvon painoa ja kuormitusta.
- Se on asetettu vastaamaan kuormituskertaluvun laskennassa ja mitoituksessa käytettävää 10 t standardiakselin painoa.
- Mittauksen yhteydessä mitataan ilman ja päällysteen pinnan lämpötilat lämpötilakorjausta varten.
- Mittaus tapahtuu jatkuvana ja ilman pysähdyksiä, jolloin se on nopeampaa ja lämpötilavaihtelujen (ja korjausten) kannalta vakioidumpaa.
- Mittaustulokset ovat lisäksi vertailukelpoisia pudotuspainolaitteen kanssa.



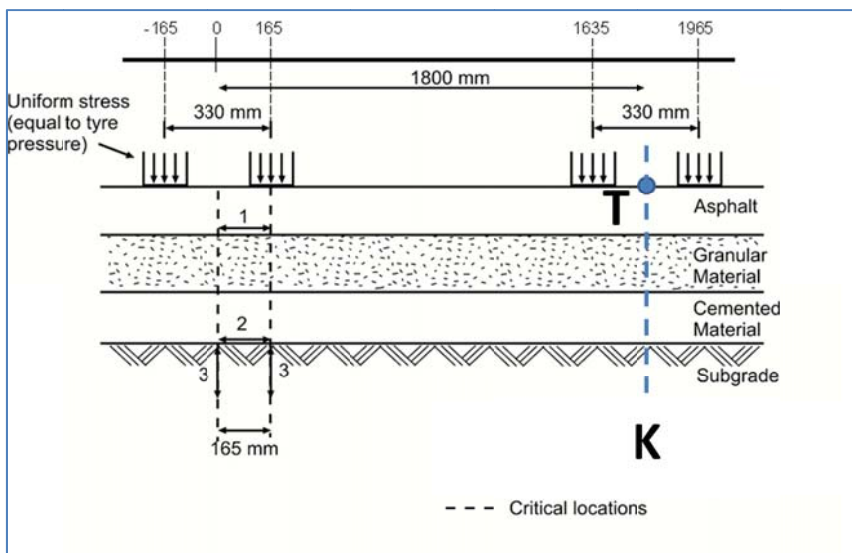
Kuva 26. Doppler-anturit mittaavat taipumanopeutta. Taipumanopeus muunnetaan taipumiksi. [24].

Taipuman mittaustapa on yleensä pudotuspainolaitteen menetelmäkuvauksessa esitetty tapa [23]. Pudotuspainolaitteessa paino on yleensä 50 kN tai 707 kPa. TSD:n kuormitustilanne on erilainen [18, 19]. Mittaus tapahtui liikenteen tyypillisellä nopeudella ajoneuvolla, jonka kuormittava pyörä on paripyörä rengastuksella varustettu staattiselta pyöräpainoltaan 50 kN pyörä, jossa rengaspaine oli 765 kPa ja kummankin renkaan kosketuspinnan säde 102 mm.



Kuva 27. Kuormitus tilanne PPL- ja TSD-mittauksissa.

Toinen kuormituksen liittyvä ero on, että PPL-laitteen kuorma on taipumanmittauspisteeseen nähden kohdassa (0,0) kun se TSD-mittauksessa on pisteissä (-0.16,0) ja (0.16,0) (Kuva 27, Kuva 28).

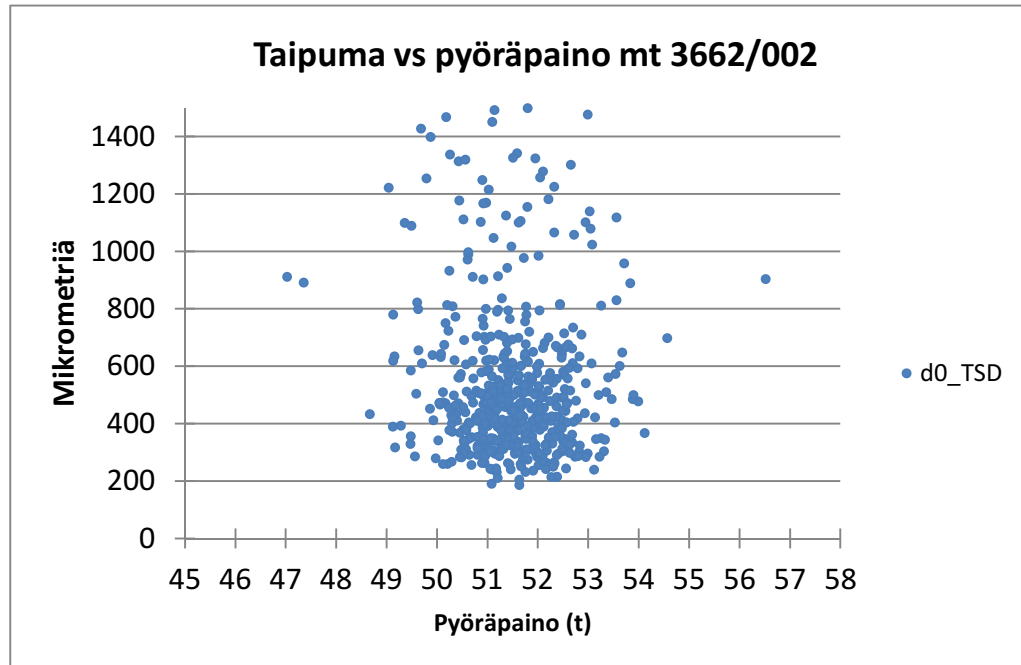


Kuva 28. Kerrospaksuuksien (K) ja taipuman (T) mittauskohdat tien poikki-leikkauksessa.

4.4.2 Normalisointi

Jos taipuman mittauksessa käytetty kuormitus poikkeaa standardiakselien määrittämisessä olevasta 50 kN:n pyöräpainosta, niin taipumat tulisi normalisoida vastaamaan 50 kN:n pyöräpainoa. TSD:ssä käytetty staattinen pyöräpaino oli 50 kN, mutta sen dynaaminen pyöräpaino vaihteli riippuen tien geometriasta ja epätasaisuudesta. Käytännössä mittaava pyöräpaino oli TSD-mittauksessa sivukaltevuuden takia suurempi ja epätasaisuudesta johtuen vaihteleva. Nämä seikat huomioitiin simuloimalla 2-akselisen 18 tonnin kuorma-auton liikkeitä ja pyöräpainoja. Tässä tutkimuksessa simuloitu oikean takapyörän pyöräpaino asetettiin taipuman mittauksen pyöräpainoksi. Normalisointi tehtiin kuitenkin vasta rakenneanalyyseissä kun laskettiin kerrosten kimmomoduuleja.

Kuvassa 29 on esitetty päätaipuma ja simuloitu pyöräpaino ja siitä nähdään, etteivät ne korreloi toistensa kanssa. Siitä voitaneen päätellä, ettei taipumassa havaittu vaihtelu johdu mittaavan pyöräpainon vaihtelusta tai se hukkuu tien rakenteen vaikutuksen alle.

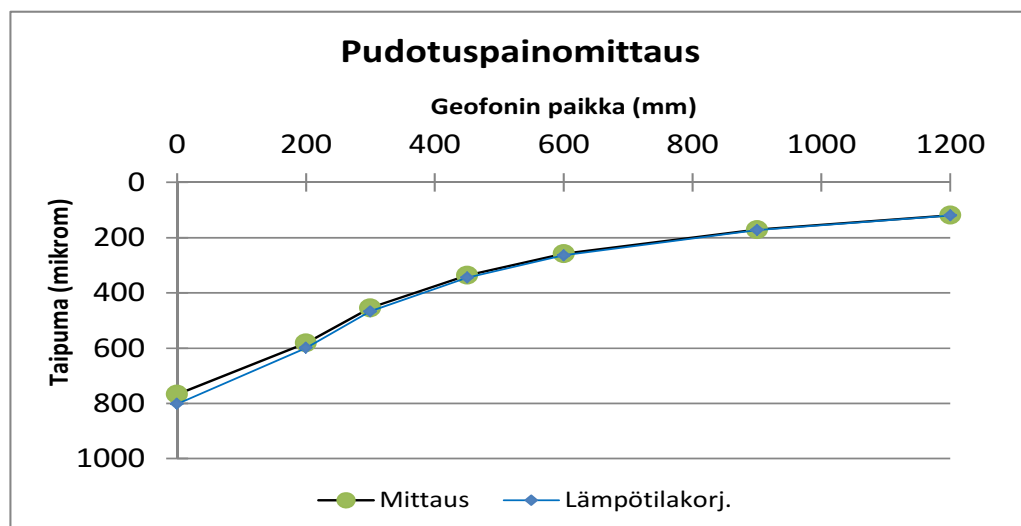


Kuva 29. Taipuman ja mittaavan pyöräpainon välinen riippuvuus.

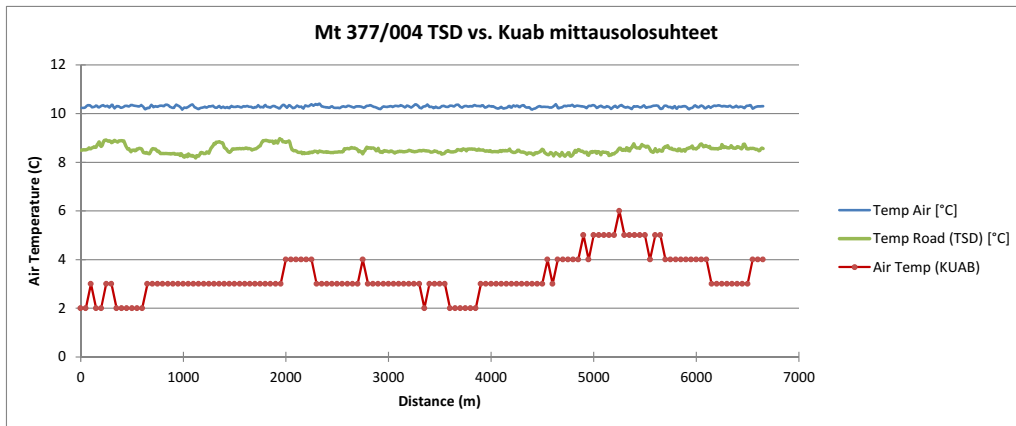
4.4.3 Lämpötilakorjaus

Taipumia ja niistä johdettuja indeksejä on totuttu käyttämään yleensä korjattuina tiettyyn referenssilämpötilaan, joka on Suomessa +20C. Lämpötilakorjaus perustuu vuonna 2001 tehtyyn tutkimukseen, missä määritettiin taipumamittausten lämpötilakorjauskertoimet. Lämpötilakorjaus tehdään vain taipumille d0-d450.

Kerrosmoduulien laskennassa suositellaan käytettäväksi lämpötilakorjaamattomia taipumia ja tekemään lämpötilakorjaus vasta kerrosmoduuleille. [18].



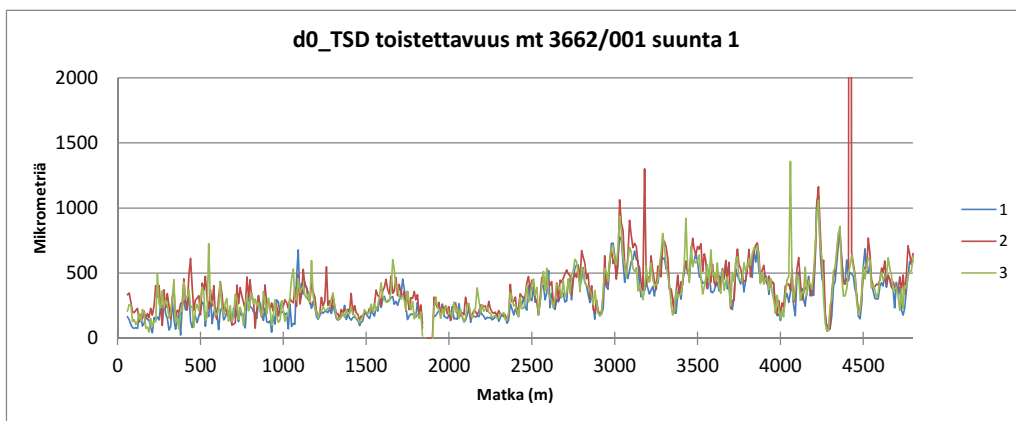
Kuva 30. Esimerkki pudotuspainomittauksen mitatusta ja korjatusta taipumasuppilosta. Päällysteen pinnan lämpötila mittaushetkellä +10 C.



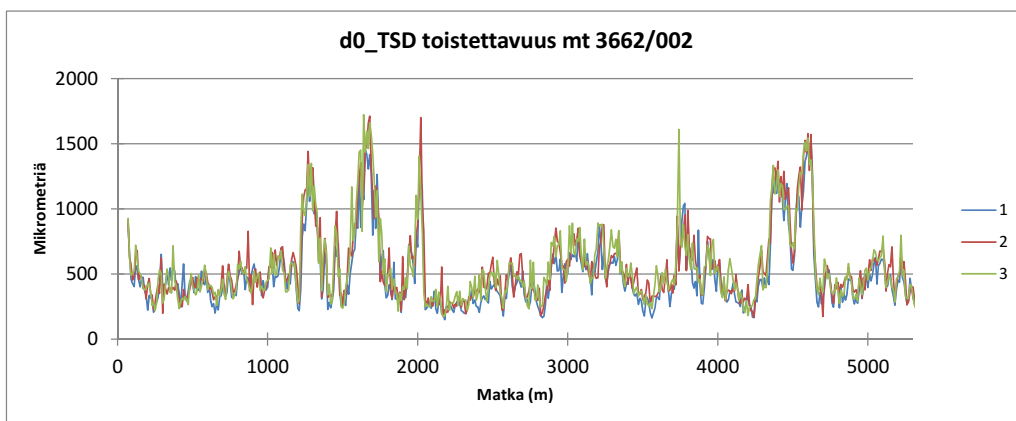
Kuva 31. Esimerkki mittauslämpötilojen välisistä eroista. Lämpötilan vaihtelualue KUAB:lla on 4 astetta ja TSD:llä alle 1 aste. Mittausresoluutio KUAB:lla 1 aste.

4.4.4 Toistettavuus

Jatkuvan kantavuusmittauksen toistettavuus oli 10 m jaksoille laskettujen toistokorrelaatioiden mukaan parhaimmillaan noin 90 %, mutta sitä laskivat helposti yksittäiset poikkeamat. Kolmen toiston tuottamia profiileja on esitetty seuraavissa kahdessa kuvassa. Yleisesti voidaan todeta, että toistettavuus noudatti muualla tehtyjen toistettavuustestien tuloksia ja oli suhteellisen hyvä.



Kuva 32. TSD:n päätaipumaprofiilit mt 3662/001 kolmeen kertaan mitattuna.



Kuva 33. TSD:n päätaipumaprofiilit mt 3662/002 kolmeen kertaan mitattuna.

4.4.5 Taipumaindeksit

Taipumamittauksista tuotettavia tavallisimpia tunnuslukuja ovat itse taipuma-arvojen lisäksi tierakenteen kantavuus, ja erilaiset taipumaindeksit. Tässä käsiteltäviä taipumaindeksejä olivat:

- SCI_{300} (Surface Curvature Index), joka on päätaipuman d_0 ja d_{300} erotus ja kuvaa sidottujen kerrosten ominaisuuksia.
- BDI (Base Damage Index), joka on taipumien d_{300} ja d_{600} erotus ja kuvaa ylempien sitomattomien kerrosten ominaisuuksia.
- BCI (Base Curvature Index), joka on taipumien d_{900} ja d_{1200} erotus ja kuvaa alimpien kerrosten ominaisuuksia.
- AREA, joka lasketaan kaavalla $150 \cdot (d_0 + d_{300} + d_{600} + d_{900}) / d_0$.
- DR (Deflection Ratio), joka kuvaa d_{600} :n ja d_0 :n suhdetta.

Kattavampi lista taipumista laskettavissa olevista indekseistä on esitetty taulukossa 11. Taipumaindekseistä ovat eniten käytettyjä tierakenteen yläosaa kuvaava SCI ja alaosa kuvaava BCI. Niihin pätee kuitenkin samat puutteet kuin mitä kantavuustun-
nusluvusta on aiemmin todettu eikä niillä ole pystytty ratkaisemaan rakenteellisen kunnan tunnuslukuongelmaa.

Taulukko 11. Taipumista laskettavia indeksejä.

Tunnusluku	Laskentakaava	Yksikkö	Tunnusluku kuvaava
Kantavuus	$E = \frac{160}{d_0}$	Mpa	Kuvaa koko rakennetta
Surface Curvature Index	$SCI_{300} = d_0 - d_{300}$	μm	Sidottujen kerrosten ominaisuus
Base Damage Index	$BDI = d_{300} - d_{600}$	μm	Kantavan kerroksen ominaisuus
Base Curvature Index	$BCI_{USA} = d_{600} - d_{900}$	μm	Alempien kerrosten ominaisuus
	$BCI_{FIN} = d_{900} - d_{1200}$	μm	Alempien kerrosten ominaisuus
	$BCI_{EST} = d_{1200} - d_{1500}$	μm	Alempien kerrosten ominaisuus
Area	$AREA = 150 \cdot \frac{(d_0 + d_{300} + d_{600} + d_{900})}{d_0}$	-	Alempien kerrosten ominaisuus
Area under pavement profile	$AUPP = \frac{(5d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900})}{d_0}$	-	Ylemmät kerrokset
Shape Factors	$F_1 = \frac{d_0 - d_{600}}{d_{300}}$	-	Kerrokset eri syvyydessä
	$F_2 = \frac{d_{300} - d_{900}}{d_{600}}$	-	Kerrokset eri syvyydessä
Deflection Ratio	$DR = \frac{d_{600}}{d_0}$	-	Kerrokset ko. syvyydessä

4.4.6 Tilastolliset tunnusluvut

Taipumista laskettujen taipumaindeksien keskiarvoja on esitetty taulukossa 12. Niiden avulla voidaan arvioida, minkälaisia eroja kohteilla on ja mitkä kohteet olisivat mielenkiintoisimpia tarkasteltaviksi tarkemmin.

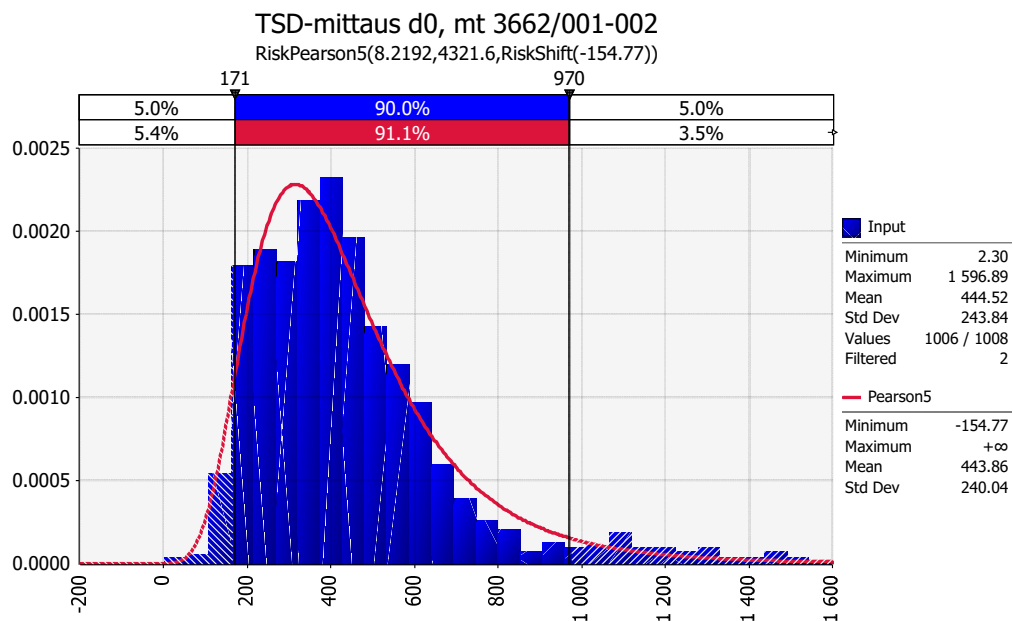
- Valtateiden osalta indeksien arvot olivat melko pieniä ja siksi epäluotettavia. Poikkeuksen muodosti AREA-tunnusluku, jonka keskiarvot olivat suurimpia juuri valtateillä.
- Maanteiden osalta indeksien keskiarvot olivat tavanomaisella tasolla.
- Mt 3842 erottui muista suurten SCI-, BDI- ja BCI-arvojen takia.
- Mt 3662 tieosalla 1 oli suurin BCI-keskiarvo ja tieosalla 2 oli suurimmat shape factoreiden arvot.

Taulukko 12. Taipumaindeksien keskiarvot.

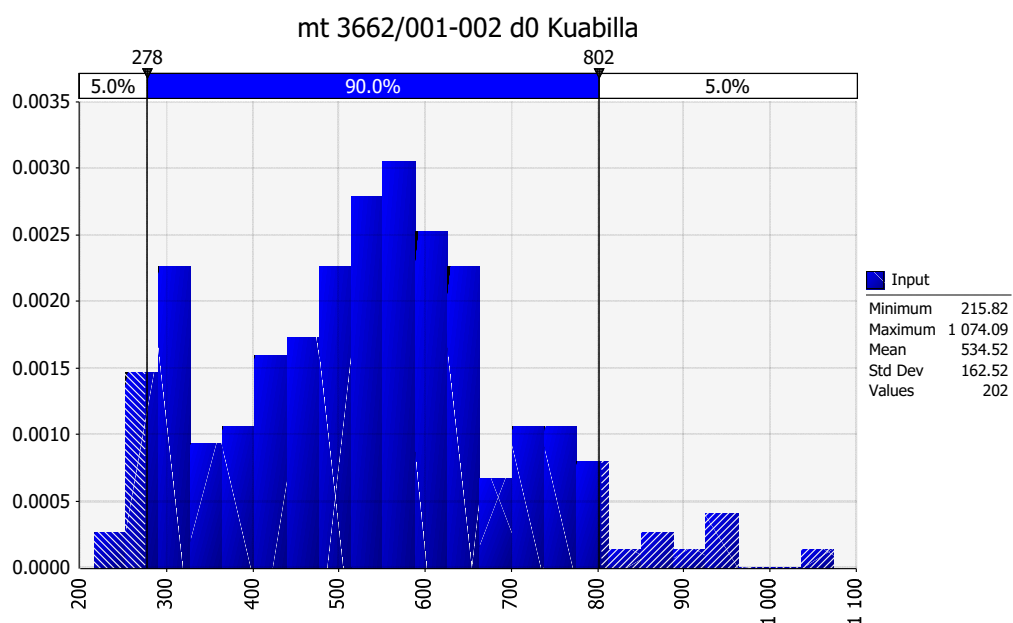
tie/osa	Taipumaindeksi					
	SCI	BDI	BCI	AREA	SF1	SF2
vt 6/205	70	52	32	15	0.9	1.3
vt 6/206	24	19	16	18	0.6	0.8
vt 6/212	21	19	22	21	0.2	0.3
vt 15/013	68	59	51	16	0.6	0.8
mt 368/005	240	104	45	11	1.9	2.0
mt 377/004	188	106	49	11	2	1.9
mt 377/005	235	118	55	11	1.7	2.2
mt 3662/001	245	141	69	11	1.5	2.0
mt 3662/002	206	98	41	10	2	3.5
mt 3842/001	314	158	66	11	1.9	2.4
yt 14705/002	159	82	42	13	1.4	1.8

4.4.7 Taipumajakaumat

TSD:lla mitattu päätaipuma vaihteli maantiellä 3662 välillä 2–1600 µm ja oli keskimäärin 444 µm. Valtaosa taipumista oli välillä 200–800 µm. Vaihtelualue oli laajempi ja jakauma oli säännöllisempi kuin KUABn vastaavat.



Kuva 34. TSD-do-taipumien jakauma mt 3662.

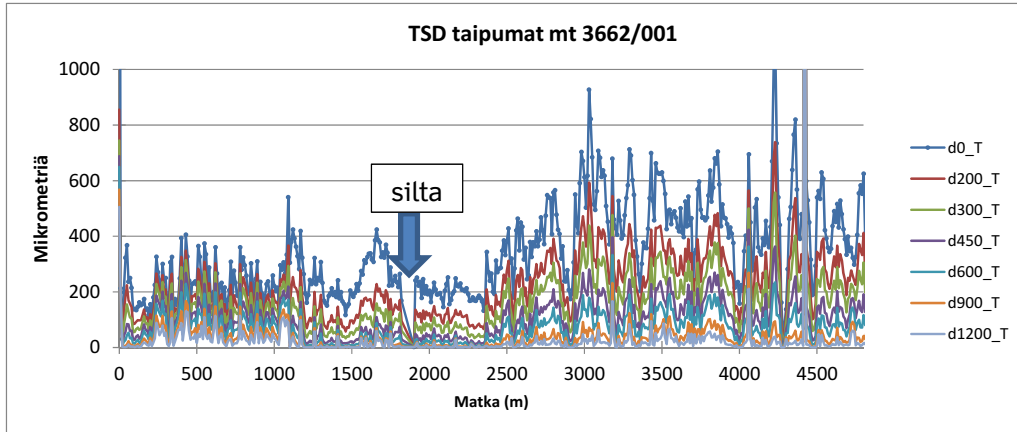


Kuva 35. Kuab-do-taipumien jakauma mt 3662.

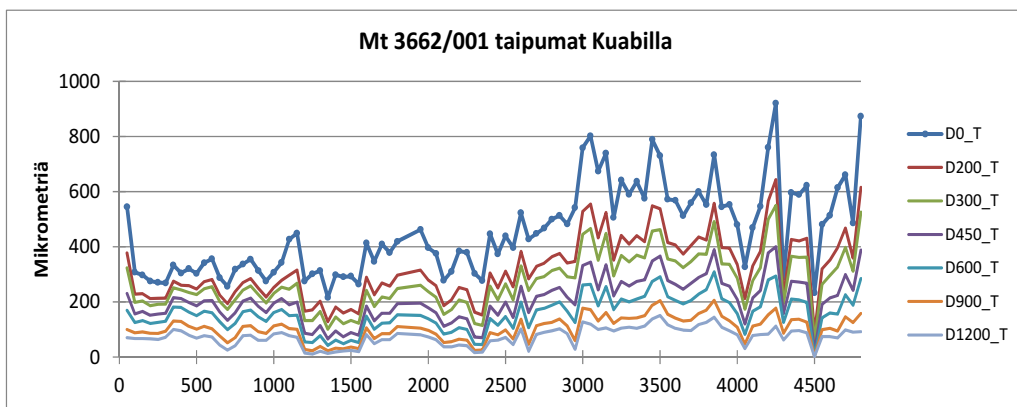
4.4.8 TSD-KUAB vertailu

4.4.8.1 Taipumaprofiilit

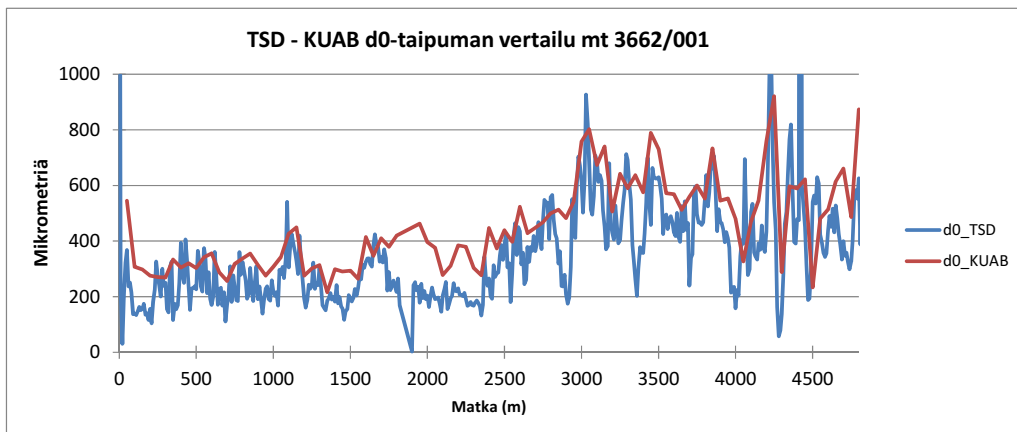
Kuvassa 36 on esitetty TSD-taipumien profiilit maantieltä 3662 tieosalta 1. Päätaipumat saivat pienimmillään noin 200 ja suurimmillaan noin 1000 mikrometrin arvoja. Taipumasuppilon muut taipumat olivat tavanomaisen näköisiä. Kuvassa 37 ovat vastaavat taipumat KUAB:lla mitattuna. Tieosan profiilit olivat melko yhteneväiset, molemmista kuvista tunnistetaan samat yksityiskohdat. KUAB:n taipumat olivat hiukan pienempiä silloin kun TSD:n taipumat ovat suuria. KUAB:n mittausväli oli harvempi ja osa taipumien vaihtelusta jäi tunnistamatta.



Kuva 36. Taipumaprofiilit jatkuvalla taipumien mittauslaitteella.

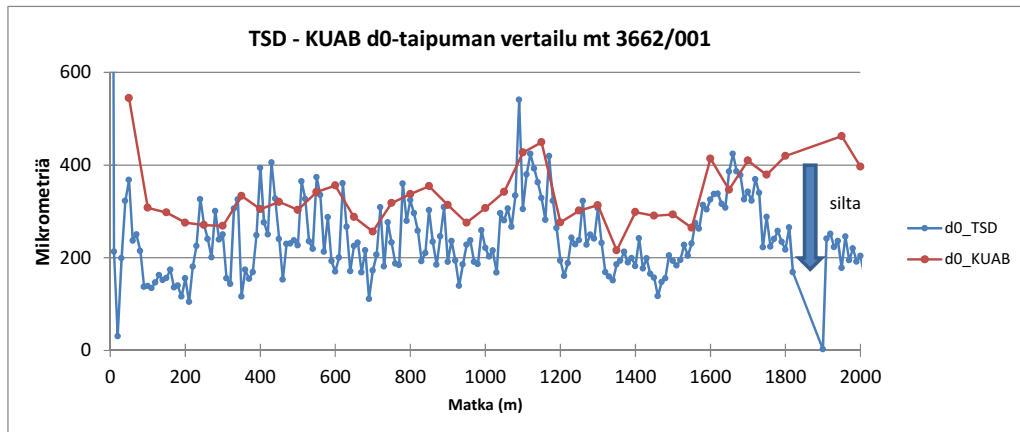


Kuva 37. Taipumaprofiilit pistekohtaisella taipumien mittauslaitteella.

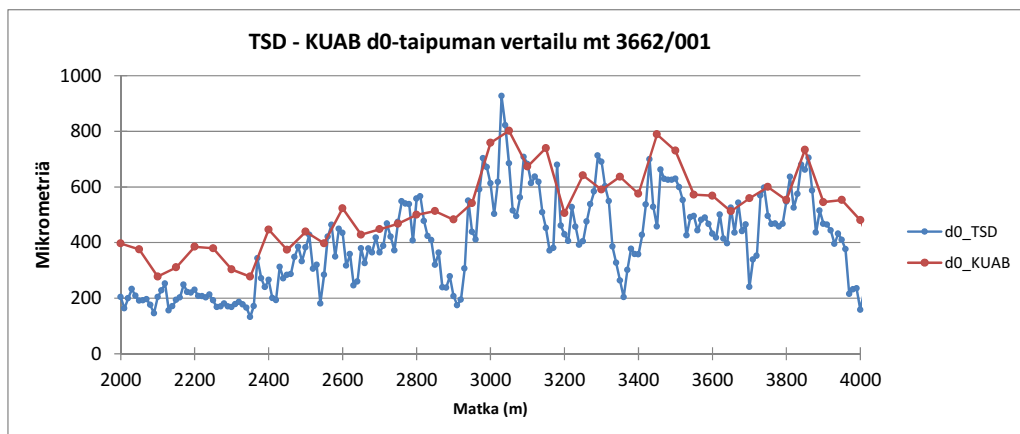


Kuva 38. TSD-KUAB päätaipumaprofiilit mt 3662/001 suunta 1.

Kuvassa 39 on vertailtu TSD:n ja KUAB:n päätaipumia maantiellä 3662 tieosalla 1. Kuvissa 39–40 vaaka-akselia on skaalattu 2 km:n pituisiin osiin. KUAB:n päätaipumat olivat hiukan suurempia kuin TSD:n taipumat. Tieosalla olevat suuret tai pienet taipumakohdat olivat tunnistettavissa molemmista profiileista, tosin KUAB:n taipumasta puuttui mittausvälin pituuden takia arvoja, jotka TSD-laitteella olivat tunnistettavissa. Kohdassa 1900 oli silta, jonka nollataipuma näkyy TSD:n tuloksissa.

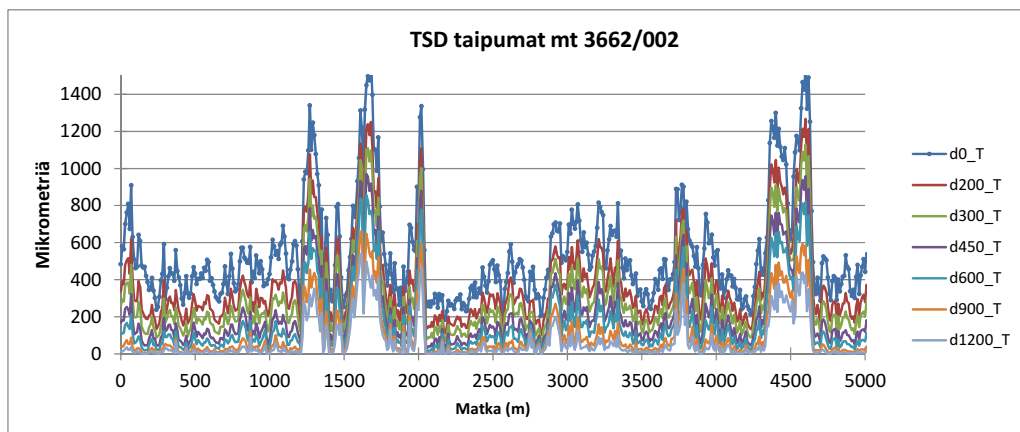


Kuva 39. Jatkuvan ja pistekohtaisen taipumamittauksen vertailu, d0-päätaiipuma, mt 3662/001 ensimmäisellä kilometrillä.



Kuva 40. TSD- ja KUAB-taipumamittausten vertailu, paaluvälit 0-2000 ja 2000-4000.

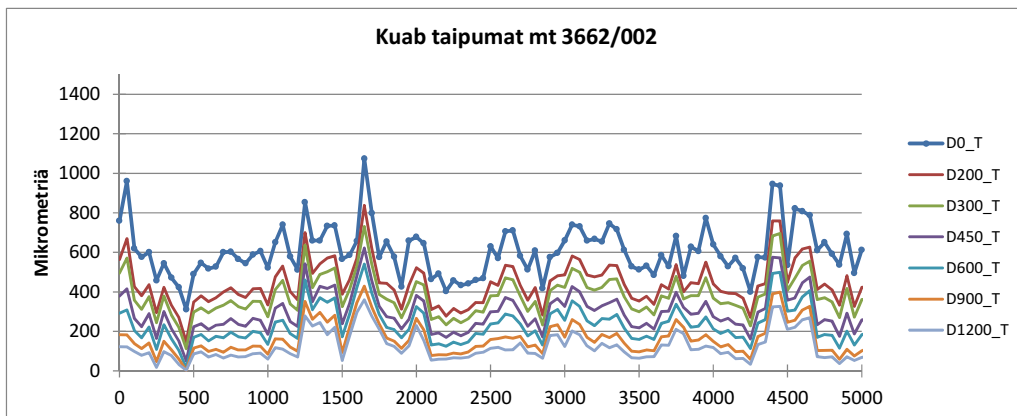
Kuvassa 41 on esitetty TSD-taipumien profiilit maantieltä 3662 tieosalta 2. Siitä on tunnistettavissa viisi suurten taipumien kohtaa selkeämmin. Suuria taipumia oli paalujen 1300, 1600, 2000, 4400 ja 4600 kohdilla. TSD:n päätaiipumat vaihtelevat välillä 300–1500 mikrometriä.



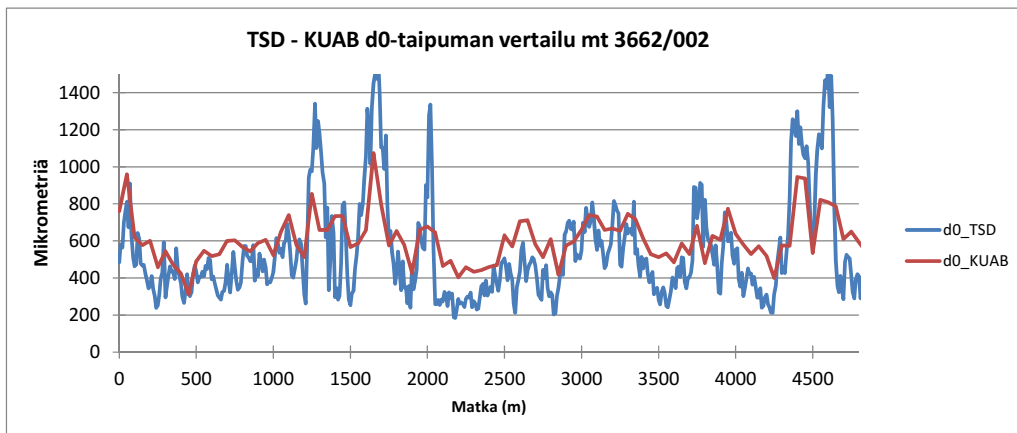
Kuva 41. TSD-taipumaprofiilit mt 3662 tieosalla 2.

Kuvassa 42 on vastaavat KUAB-taipumat. Päätaipuma vaihtelee välillä 300–1100 mikrometriä. Vaihtelu on selvästi pienempää, mutta suurten taipumien kohdat ovat silti juuri ja juuri tunnistettavissa. Muut taipumat ovat KUABilla suurempia kuin TSD:llä.

Kuvassa 43 ovat sekä KUABin että TSD:n päätaipumat samassa kuvassa. TSD:n taipumat vaihtelevat enemmän. KUABin taipumassa on havaittavissa sama profiilin muoto, mutta selvästi lievempänä. Osa pienemmästä vaihtelusta johtuu harvemmasta havaintojen välistä, mutta se ei selitä vaihtelujen eroja kokonaan. Kun TSD:n taipumaprofiilista on tunnistettavissa ainakin viisi suurta taipumakohtaa, on KUABin taipumaprofiilista tunnistettavissa juuri ja juuri vain yksi tai kaksi.



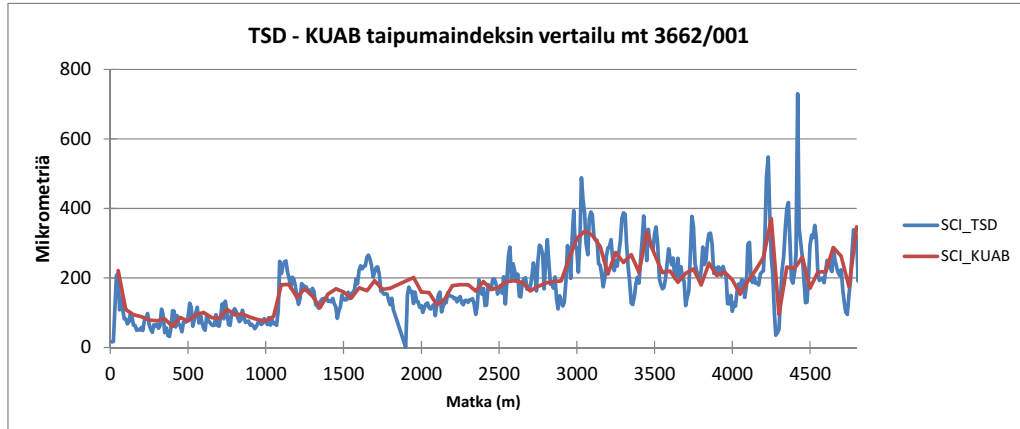
Kuva 42. KUAB-taipumaprofiilit mt 3662 tieosalla 2.



Kuva 43. TSD-KUAB päätaipumaprofiilit mt 3662 tieosalla 2.

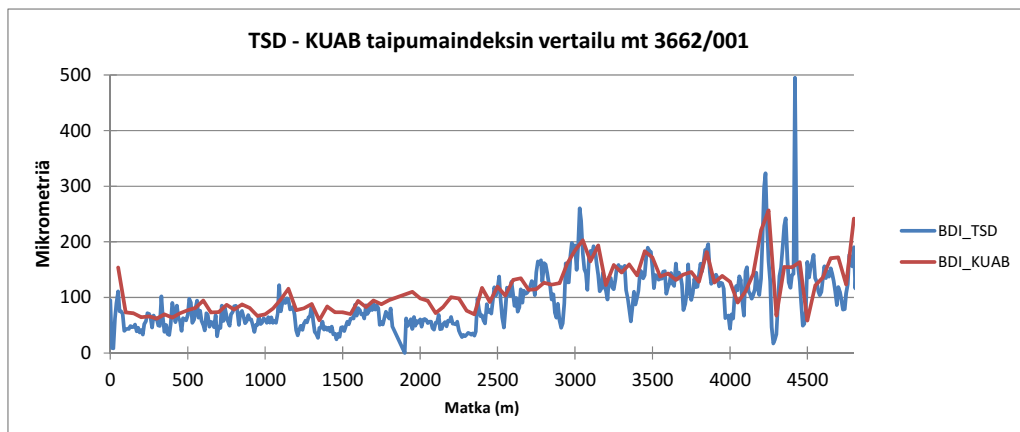
4.4.8.2 Taipumaindeksien profiilit

Käytetyimpiä taipumaindeksejä ovat SCI ja BCI. TSD ja KUAB tuottivat melko yhteneväisiä SCI-arvoja, mistä esimerkkinä seuraava kuva maantieltä 3662. KUABin SCI-käyrä oli melkein kuin 50 m väleille keskiarvoistettu TSD:n SCI-käyrä. Tämä viittaa siihen, että molemmat mittaustekniikat tuottivat melko yhteneväisiä tuloksia lähellä kuormituskohtaa oleville taipumille.

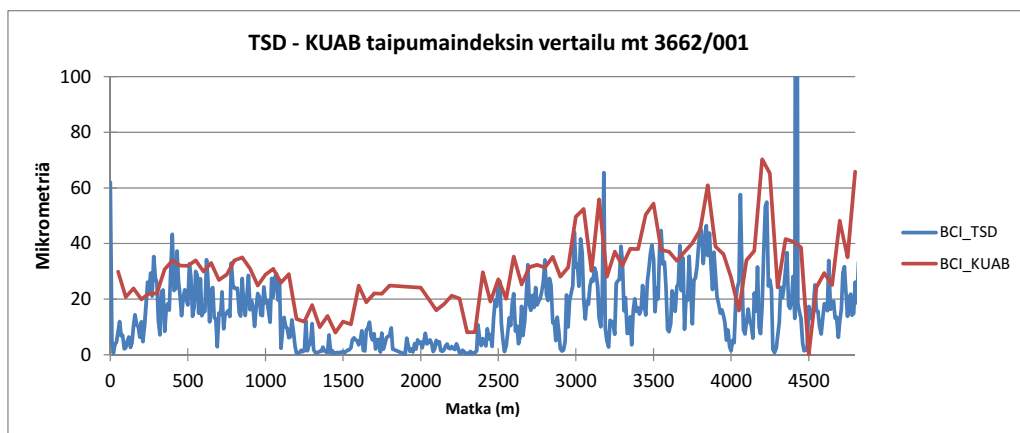


Kuva 44. SCI-indeksin profiilivertailu TSD:n ja KUAB:n välillä maantiellä 3662.

BDI-indeksin käyrissä oli pieni mutta selvästi havaittava tasoero siten, että KUABin käyrä oli hiukan TSD:n käyrää ylempänä. BCI-indekseissä tasoero oli suurempi. Mitä kaukaisemmista pisteistä kuormituskohdasta lukien oli kyse, sitä selkeämpi oli ero taipumissa KUABin tuottaessa suurempia arvoja kuin TSD.



Kuva 45. BDI-indeksin profiilivertailu TSD:n ja KUAB:n välillä maantiellä 3662.

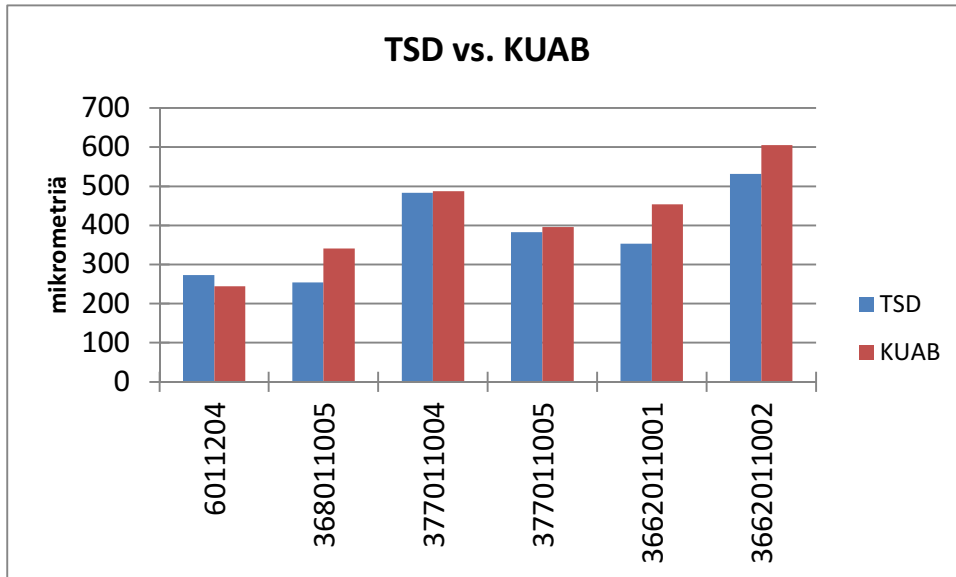


Kuva 46. BCI-indeksin profiilivertailu TSD:n ja KUAB:n välillä maantiellä 3662.

Yhteenvedon voidaan todeta, että TSD ja KUAB tuottavat samansuuntaisia tuloksia tietyllä tasoerolla, mutta KUAB-tuloksista jää harvemman mittaussvälin takia osa vaihtelusta tunnistamatta.

4.4.8.3 Päätaipumien keskiarvot

Jatkuvatoiminen taipumamittauslaite tuotti pääasiassa pienempiä taipumia kuin pistekohtainen mittauslaite. Ainoa kohde, jolla tulokset olivat toisinpäin, oli vt 6 tieosa 204. Maantiellä 377 tulokset olivat hyvin yhteneväisiä. Mt 3662 jatkuva mittaus tuotti noin 13–22 % pienempiä arvoja kuin pistekohtainen mittaus.



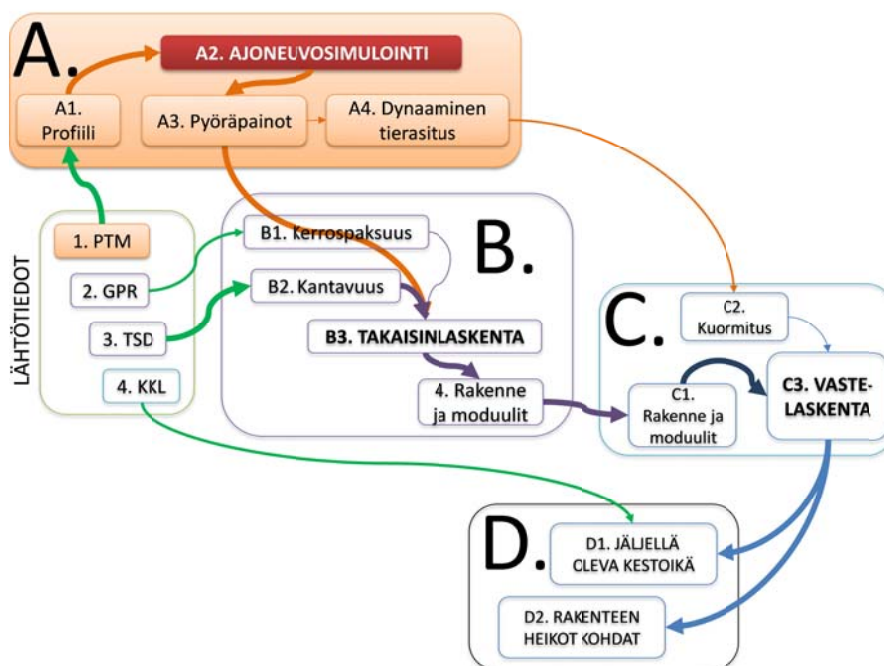
Kuva 47. TSD:n ja KUAB:n väliset taipumakeskiarvot kohteittain.

5 Rakenteellinen kunto

5.1 Kuormitusanalyysi – ajoneuvosimulointi

Laskennallisen analyysin ensimmäinen vaihe oli kuormitusanalyysi, joka suoritettiin ajoneuvosimuloinnilla käyttäen PTM-mittausten pituusprofiileja. Laskenta oli käytännössä lähes samanlaista kuin IRI:n laskenta sillä poikkeuksella, että simuloinnissa käytettiin kokonaista raskasta ajoneuvoa, tiekohtaista nopeutta ja molempien ajoerien pituusprofiileja. Mallista käytetään nimitystä Ride-malli, koska se ottaa huomioon ajomukavuuteen liittyviä pystysuuntaisia liikkeitä. Käytännössä laskentavaihe oli jatke PTM-mittauksista saatavan datan jalostamisessa ja se oli integroitu olemassa olevaan tiedonkäsittelyyn.

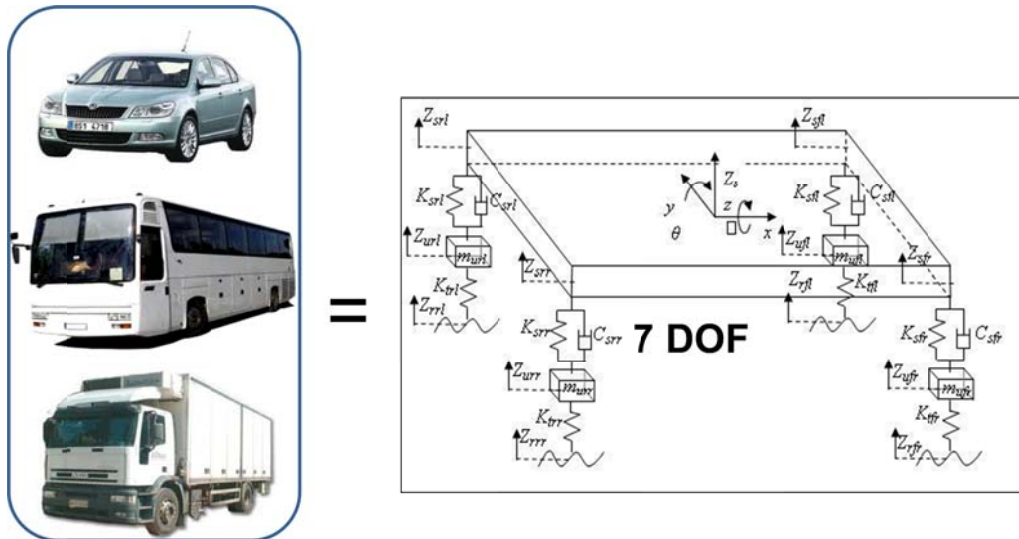
Kun simulointimallina käytetään pelkkää Ride-mallia, niin lähtötiedoksi riittää vasen ja oikea pituusprofiili ja tien (tai ajoneuvon) nopeusrajoitus. Ride-malli tuotti vain pystysuuntaiset liikkeitä. Ulostulona simuloinnista tuotettiin mm. pyöräpainot ja dynaaminen tierasitus.



Kuva 48. Laskennallisen analyysin ensimmäinen osa on pyöräpainojen ja tierasitusten simulointi lähtien PTM-laitteen tuottamasta profilista.

5.1.1 Simulointimalli

Dynaamisen kuormituksen laskennassa käytettiin 2-akselisen kuorma-auton 7 vapausasteen pystyliikemallia, jossa oli 18 tonnin kuorma-auton mitat ja parametrit. Mallille annettiin lähtötietona tien pintaprofiilit vasemman ja oikean ajouran kohdalta sekä ajonopeus. Malli tuotti ulostulona ajoneuvon korin pystyliikkeet sekä sivuheilahtelu- ja nyökkimisliikkeet, joiden kautta saatiin pyöräpainot sekä tien dynaaminen rasitus.



Kuva 49. Pystyliikemalli.

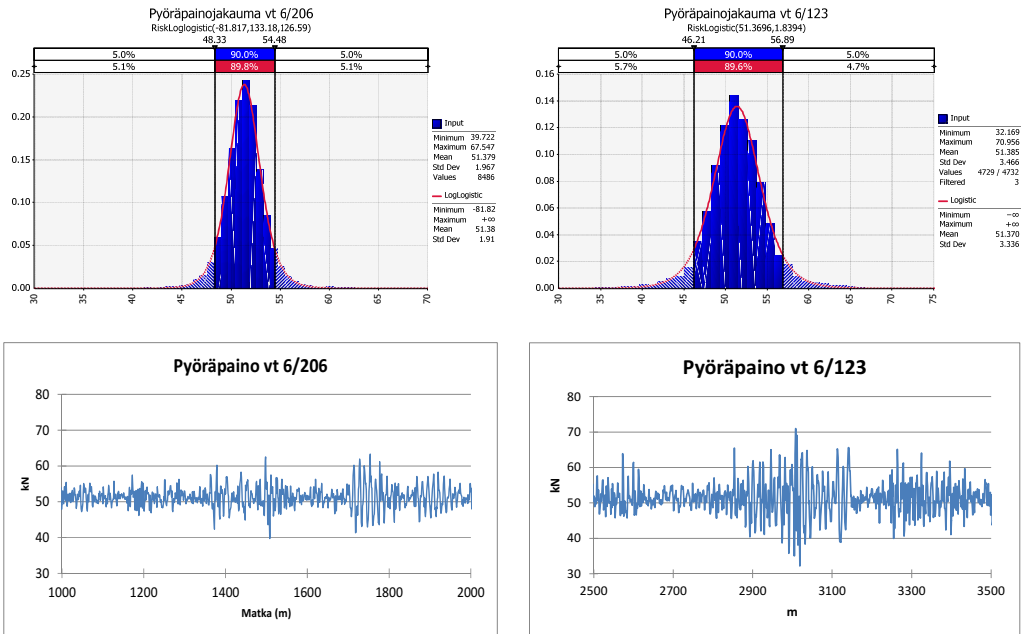
Pystyliikemalliin syötettiin vakionopeudella PTM-raakatiedosta saatavaa tien ajo-urien pintaprofiilia 10 cm:n välein. Simulointi suoritettiin aikadomainissa, jonka aikaväli riippui simulointinopeudesta. Simulointinopeutena käytettiin kukin tieosan nopeusrajoitusta. Simulointinopeuden maksimi oli raskaille ajoneuvoille sama kuin ajoneuvokohtainen nopeusrajoitus. Simuloinnin aikaväli riippui ajoneuvotyypistä ja nopeusrajoituksesta seuraavan taulukon mukaan. Simuloinnissa käytettiin Matlab/ Simulink-ohjelmistoja.

Taulukko 13. Simuloinnin aikaväli ja taajuus eri nopeuksilla.

Nopeusrajoitus		Aikaväli ms			Taajuus Hz		
km/h	m/s	Henkilöauto	Linja-auto	Kuorma-auto	Henkilöauto	Linja-auto	Kuorma-auto
60	16.7	6.0	6.0	6.0	167	167	167
80	22.2	4.5	4.5	4.5	222	222	222
100	27.8	3.6	3.6	4.5	278	278	222
120	33.3	3.0	3.6	4.5	333	278	222

5.1.2 Pyöräpainot

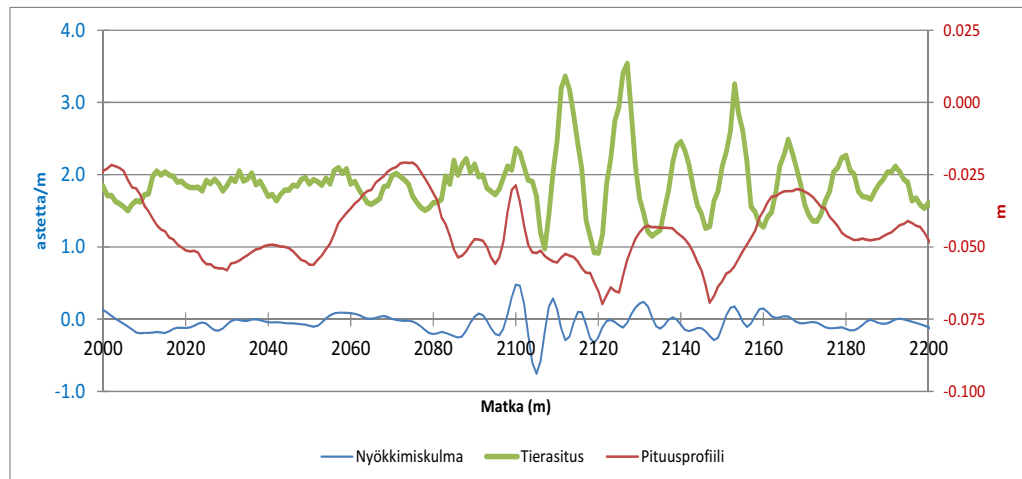
Ajoneuvosimuloinnista saatiin kaikkien pyörien pyöräpainot yhden metrin keskiarvoina ja ne muutettiin 10 m keskiarvoiksi. Pyöräpainoja käytettiin tierasituksen ja pyöräpainon sivusiirtymäsuhteen laskemisessa. Oikean takapyörän pyöräpainoa käytettiin mittaavana pyöräpainona silloin kun taipumamittauksista tuotettiin kerrosmoduuleja takaisinlaskennalla. Tyypillistä pyöräpainon vaihtelua on kuvassa 50. Kuvan vasen pyöräpainojakauma on normaalikuntoiselta valtatieltä ja se vaihteli välillä 41–60 kN ollen keskimäärin 51.2 kN. Epätasaisella valtatiellä, vt 6 tieosalla 123 pyöräpaino vaihteli välillä 32–71 kN ollen keskimäärin 51.3 kN. Keskimääräinen pyöräpaino riippui tien kaarteisuudesta ja sivukaltevuudesta. Oikealle kaartavissa kaarteissa painoa siirtyi keskihakuvoiman takia oikealta vasemmalle ja sivukaltevuuden takia vasemmalta oikealle. Vasemmalle kaartuvissa kohdissa painon siirtymä oli päinvastaisiin suuntiin.



Kuva 50. Ajoneuvosimuloinnilla tuotettu kuorma-auton oikean takapyörän pyöräpainon vaihtelu valtatiellä 6 tieosilla 206 ja 123 simulointinopeudella 80 km/h.

5.1.3 Tierasitus

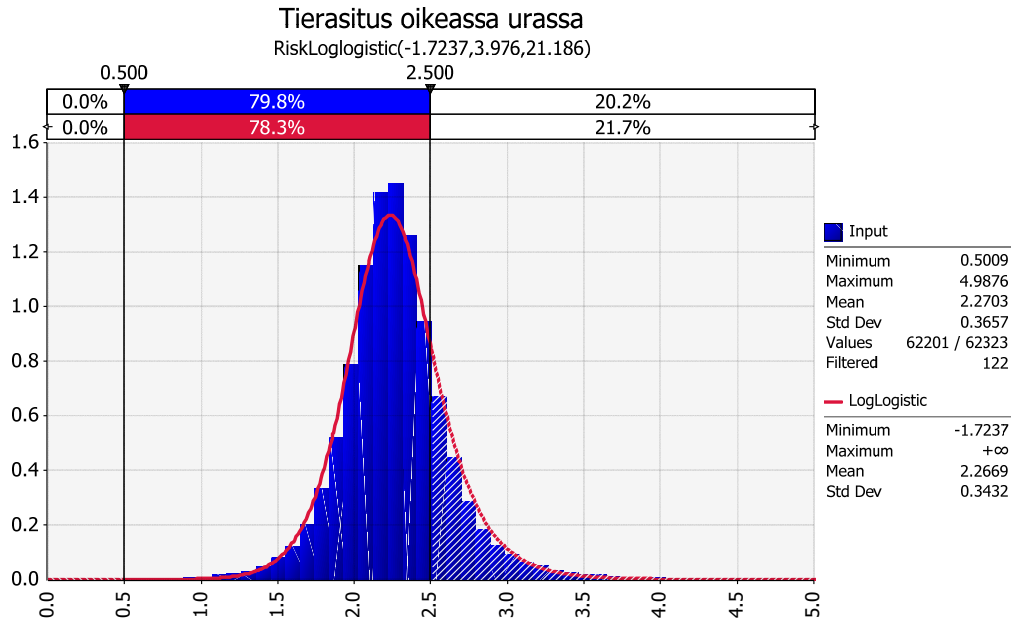
Kuvassa on 200 m osuus, josta nähdään, että pituusprofiilissa oleva epätasaisuus aiheuttaa ajoneuvon nyökkimisliikettä ja sen kautta tierasituksen vaihtelua. Simuloitu tierasitus on keskimäärin 2 ja vaihtelee välillä 1–4.



Kuva 51. Pyöräpainon vaihtelua vt 6 tieosalla 123 paaluvälillä 2000–2200.

Koska tien taipumatieto mitattiin oikeasta ajourasta ja kestävyyslaskenta kohdistui oikean ajouran tietoihin, käytettiin vastelaskennassa oikean puolen pyöräpainoa. Seuraavassa kuvassa on ajoneuvon oikeanpuoleisten pyörien aiheuttama tierasituksen jakauma, missä rasitus on keskimäärin 2,27 ja sen hajonta 0,37. Oikealle viettävän sivukaltevuuden takia tierasitus oli oikeassa ajourassa keskimäärin 13 % staattista rasiitusta suurempi.

Kuvassa rasisitus on rajattu välille 0,5–5,0, mutta se sai metritason datassa jopa yli 10 meneviä arvoja. Aineistossa oli 20 % sellaisia kohtia, joissa rasisitus oli yli 25 % (>2,5) staattista arvoa suurempi.

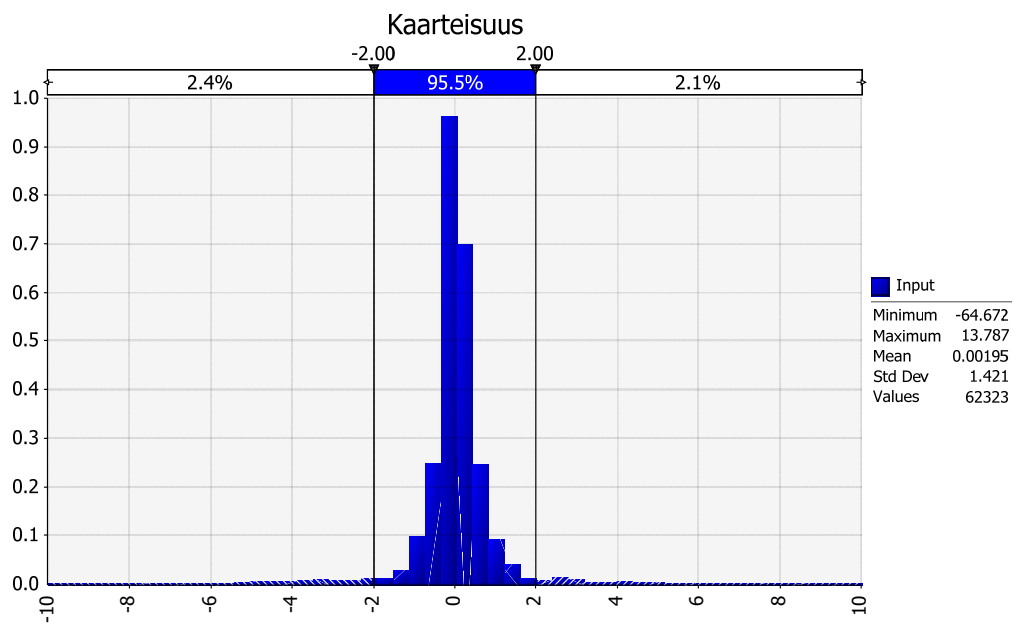


Kuva 52. Tierasituksen jakauma oikeassa ajourassa (koko aineiston 1m data). Staattinen tierasitus 2.0.

5.1.4 Pyöräpainon sivusiirtymä

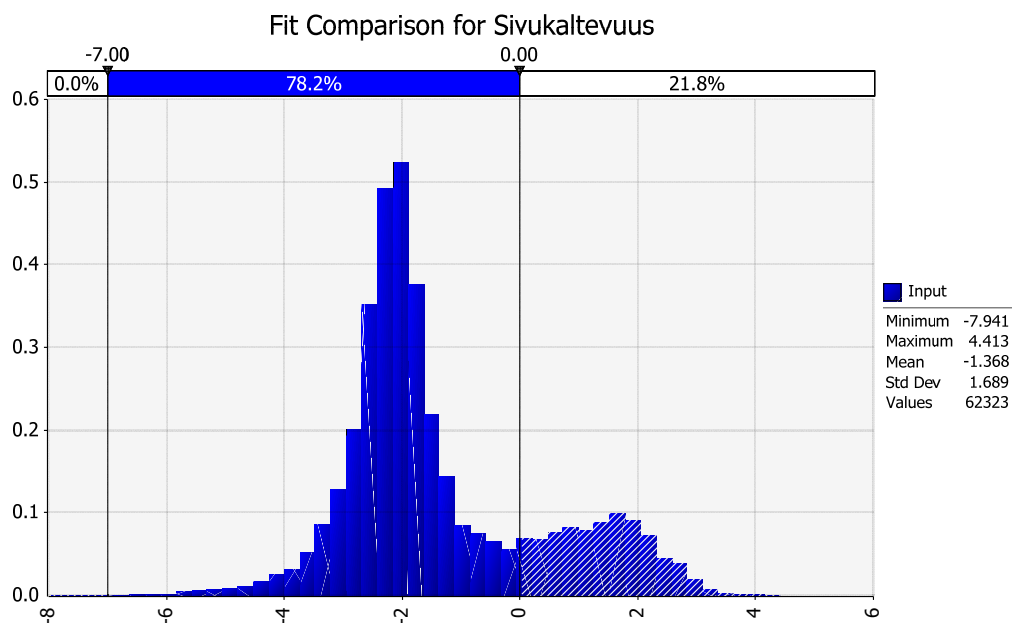
Tiellä kulkeva ajoneuvo heiluu myös sivusuunnassa. Heilumisen suuruuteen vaikuttaa tien geometria ja sivusuunnan epätasaisuus. Ajoneuvosimuloinneissa laskettiin pyöräpainon sivusiirtymäsuhdetta, LTR (Load Transfer Ratio), jolla tarkoitetaan sitä osuutta, jonka verran pyöräpainoa siirtyy ajoneuvon sivuttaisheilumisen takia puolelta toiselle. Painon siirtymistä aiheuttavat:

- kaarregeometria,
- sivukaltevuus ja sen vaihtelu sekä
- pituussuuntainen epätasaisuus ja mäkisyys.

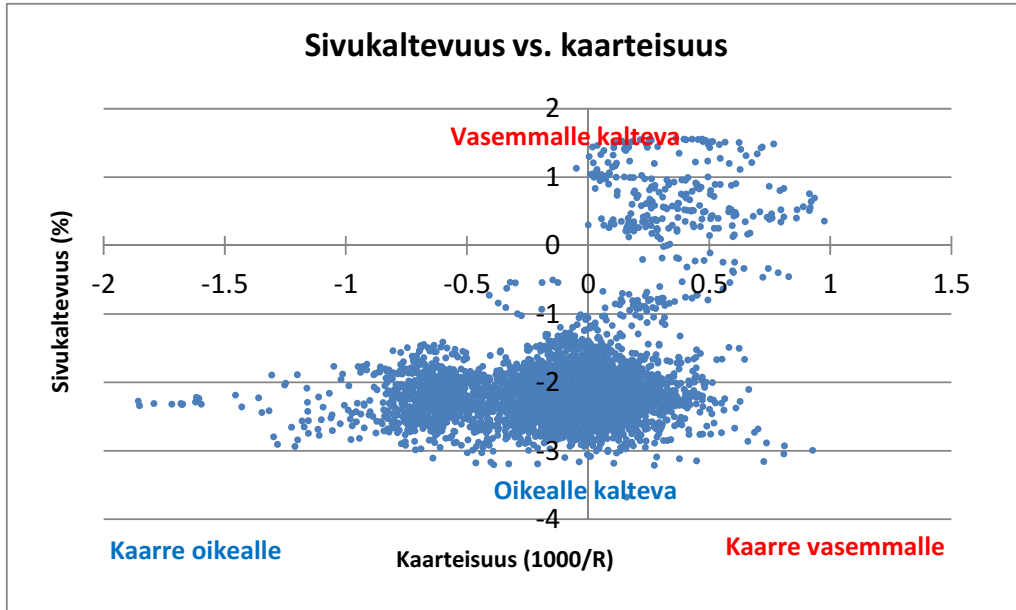


Kuva 53. Kohteiden kaarteisuusjakauma (1000/R).

Aineistossa oli 22 % sellaisia kohtia, joissa sivukaltevuus oli positiivinen eli vasemmalle viettävä. Muulloin sivukaltevuus oli oikealle viettävä.

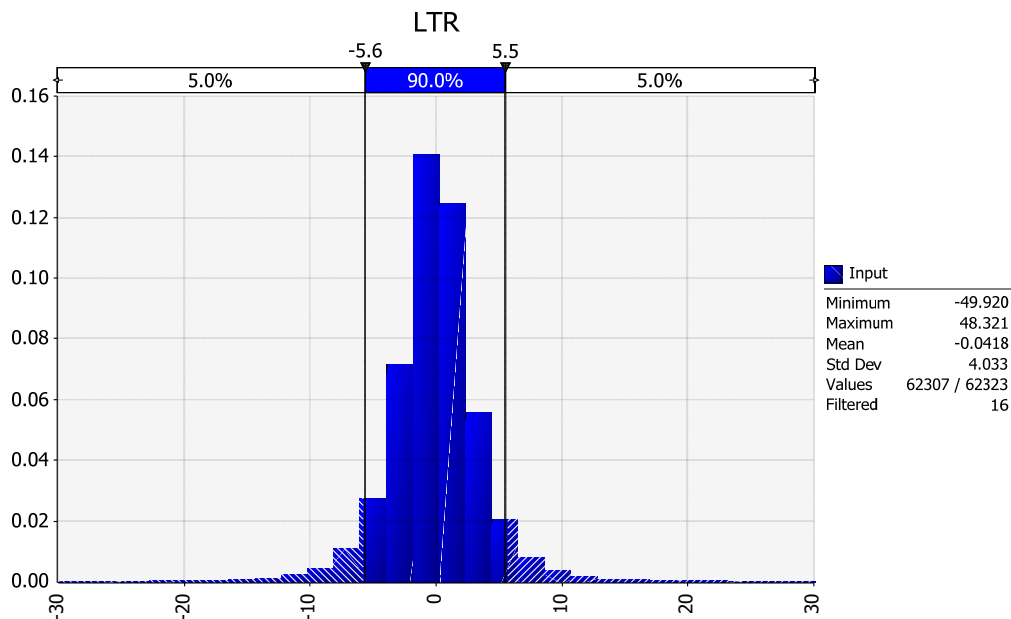


Kuva 54. Kohteiden sivukaltevuusjakauma (1m datasta).



Kuva 55. Valtatien 6 tieosan 123 kaarregeometria (1m datasta).

Sivuttaisheilahtelu aiheutti jopa 50 % pyöräpainon siirtymiä puolelta toiselle, mutta pääsääntöisesti ne olivat alle ± 10 %.

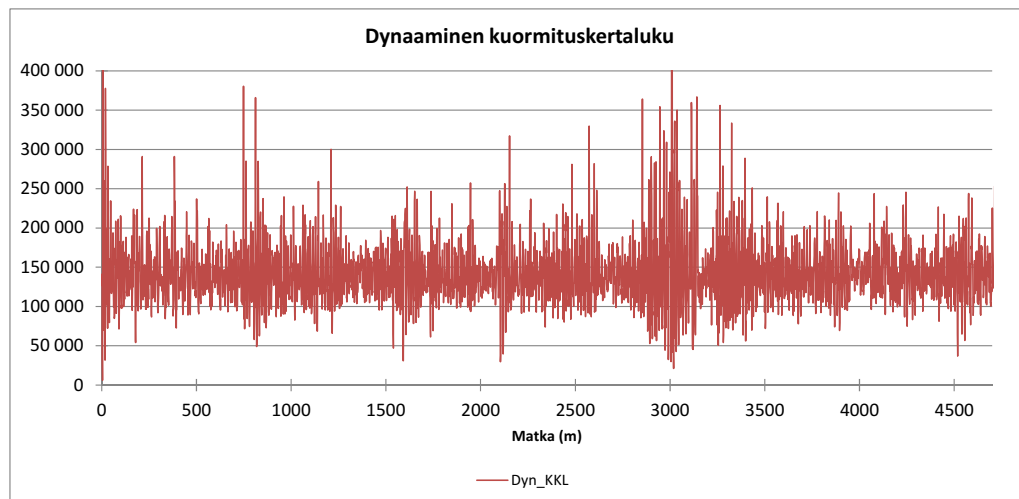


Kuva 56. Kohteiden pyöräpainon sivusiirtymäsuhteen (LTR) jakauma (%).

5.1.5 Kuormituskertymä

Yhtenä tiestötietona oli tierekisterin yleistiedoissa kullekin tieosalle vuotuinen kuormituskertaluku. Kuormituskertaluku on laskettu liikennemäärien ja akselimassatutkimuksissa määritettyjen kuormitusvastaavuuskertoimien avulla. Yksiajorataisella tiellä se on puolet koko tien kuormituskertaluvusta. Valtatien 6 tieosan 123 suunnan 1 vuotuinen kuormituskertaluku on tierekisteritiedon mukaan 123904 standardiakselia vuodessa. Kun otetaan huomioon oikeassa ajourassa tapahtuva pyöräpainon vaihtelu ja oletetaan, että kaikki raskaat ajoneuvot käyttäytyvät samalla tavalla, saadaan

kuormituskertaluvulle erittäin vaihteleva profiili. Epätasaisella tiellä kuormituskertaluku oli hetkittäin jopa kolminkertainen staattiseen arvoon verrattuna. Kuormituskertaluku on vanhalla tiellä todellisuudessa hyvin vaihteleva suure eikä sitä voida siten kuvata vakioluvulla. Rakenteellisen kunnon näkökulmasta liikennesäätöön huomioon ottaminen pelkällä vakioluvulla ei riitä, vaan sen dynaamisuus on otettava huomioon.



Kuva 57. Valtatien 6 tieosan 123 suunnan 1 vuotuinen dynaaminen kuormituskertaluku oikeassa ajourassa 1m tiedoilla laskettuna (kun tierekisterin staattiseen tietoon on lisätty simuloinnilla saatu dynaaminen lisä).

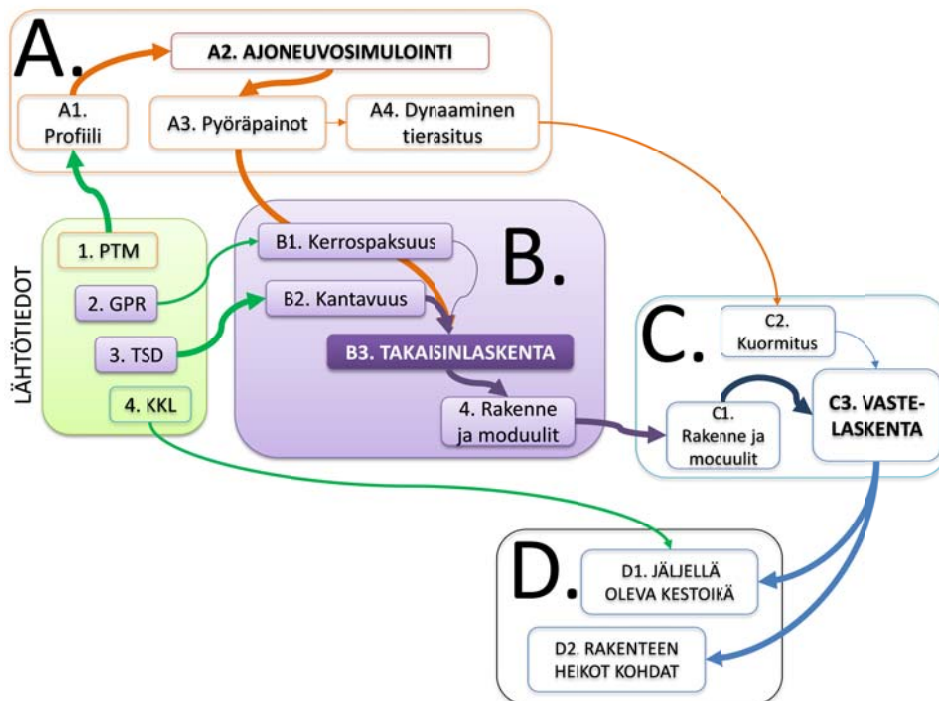
5.2 Rakenneanalyysi – takaisinlaskenta

5.2.1 Laskentamenetelmä

Rakenneanalyysin lähtötietoja olivat taipumamittausten ja maatulka-analyysien tulokset sekä kuormitussimuloinnista saatu mittaavan pyörän pyöräpaino. Rakenneanalyysillä tuotettiin rakennekerrosten kimmomoduulit. Rakenneanalyysin lähtötiedot (taipumat ja kerrosten paksuudet) olivat ainoat merkittäviä kustannuksia aiheuttaneet lähtötiedot, joita ei ollut verkkotasolla ennestään saatavana. Rakennekerrosten kimmomoduulit tuotettiin takaisinlaskennalla.

Takaisinlaskennassa tierakenteen kerroksille haettiin sellaista kimmomoduulien sarjaa, jolla laskettu ja mitattu taipumasuppilo tulivat mahdollisimman lähelle toisiaan. Takaisinlaskentamenetelmiä on useita ja laskennasta on olemassa VTT:n tuottama menetelmäohje [18]. Takaisinlaskenta voidaan tehdä periaatteessa millä tahansa käytävissä olevalla laskentaohjelmalla.

Tulosten käytön kannalta on muistettava, että laskennalla tuotetut kimmomoduulit kuvaavat vain mittausajankohdan eli lokakuun tilannetta ja kimmomoduulien vuodenaikainen vaihtelu tulee muodostaa ennen vastelaskentaa esim. paikkakunnan sää- ja ilmastotietoihin perustuen.



Kuva 58. Laskennallisen analyysin toinen vaihe on kerrosmoduulien määrittämisen paksuus- ja taipumamittausten tuloksista takaisinlaskennalla.

5.2.2 Lähtötiedot

Rakenneanalyysin takaisinlaskennan lähtötietoja ovat:

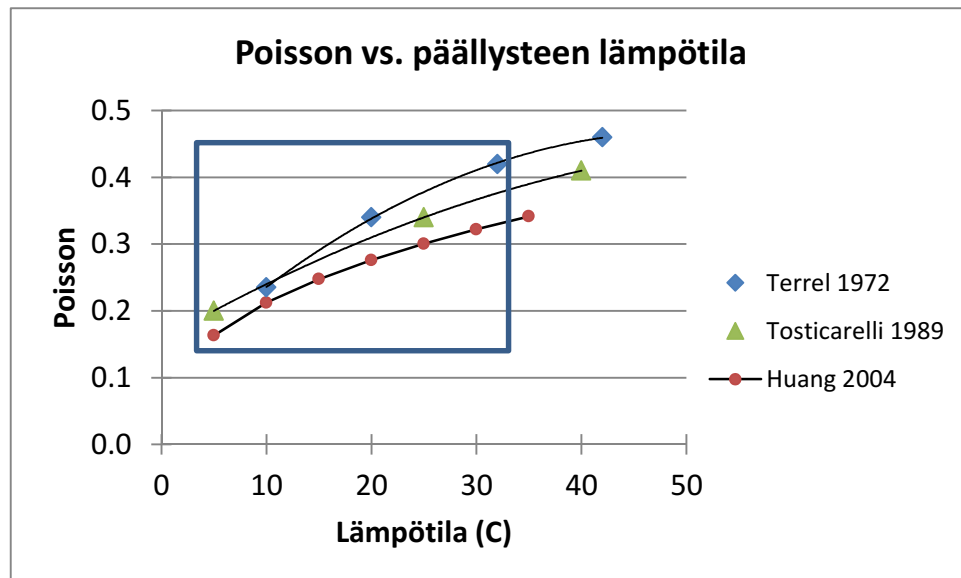
- rakennekerrosten määrä, tyyppi ja paksuudet
- taipuman mittaustapa ja sen tuottama taipumasuppilo
- muut lähtötiedot esim. Poissonin vakio
- vuodenaajat ja niiden aiheuttama vaihtelu

Rakennekerrosten määrä, tyyppi ja paksuudet saatiin maatukamittauksilla. Maatukauksista tulkitaan yleensä rakenne eriteltynä sidottuihin kerroksiin, sekä sitomattomiin kantavaan ja/tai jakavaan kerrokseen sekä pengermateriaaliin. Joskus maatukamittauksilla pystytään tuottamaan myös kovan pohjan syvyys. Maatukamittauksessa kerrospaksuudet mitataan samasta kohdasta kuin taipumatkin on mitattu.

Muita lähtötietoja olivat mittausajankohdan lämpötila ja kerrosten kokoonpuristumisominaisuutta kuvaava Poissonin luku. Poissonin luku kuvaa materiaalin kokoonpuristumisominaisuutta ja vaihtelee välillä $-1 - +0,5$. Käytännössä sen minimiarvo on kuitenkin nolla. Poissonin luku 0 tarkoittaa sitä, että materiaali painuu puristettaessa kasaan leviämättä sivuille. Poissonin luku 0,5 puolestaan tarkoittaa sitä, että materiaalin tilavuus ei puristettaessa muutu, vaan se leviää sivuille kokoonpuristumista vastaan määrän. Kaikille kerroksille suositellaan käytettäväksi Poissonin luvulle arvoa $\nu = 0,35$ [18].

Koska taipumamittaukset suoritettiin syksyllä lämpötilan ollessa välillä 5–10 astetta, niin tässä tutkimuksessa päällysteelle käytettiin takaisinlaskennassa Tosticarellin kaavan mukaista lämpötilasta riippuvaa kerrointa, missä lämpötilaa 20 C vastaa Poissonin luvun arvo 0.30. Vastelaskennan puolella jouduttiin tarkastelemaan suurempaa lämpötila-aluetta kuin takaisinlaskennassa ja sen takia jouduttiin ottamaan kantaa

siihen, mikä Poissonin arvo on esim. negatiivisilla lämpötiloilla. Siitä oli olemassa melko niukasti lähteitä. Kuvasta voidaan todeta, että sen arvon täytyy olla hyvin pieni ja välillä 0–0.15.



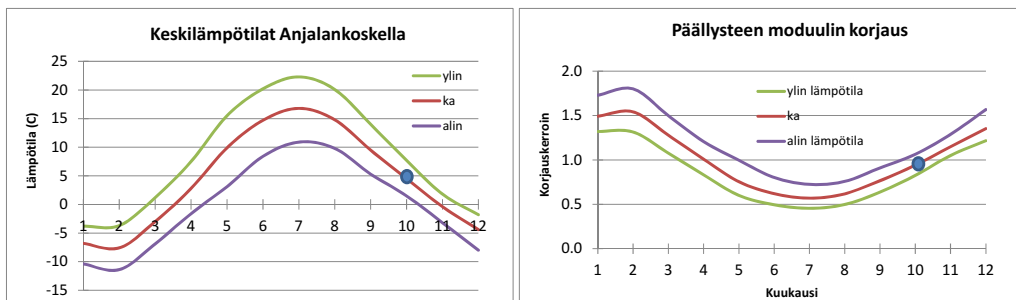
Kuva 59. Päällysteen Poisson -"vakion" lämpötilariippuvuuksia ja pudotuspainolaitteen menetelmäkuvauksen mukaan sallittu mittauslämpötila-alue.

Taipumia ei suositella takaisinlaskentaohjeen mukaan lämpötilakorjattaviksi ennen kerrosmoduulien laskentaa, vaan korjaus tehdään takaisinlaskennasta saaduille kerrosmoduuleille. Oulun yliopiston [20] tekemän selvityksen mukaan kerrosmoduulit voidaan korjata käyttäen seuraavaa kaavaa:

$$S_s = S_m * 0.96^{(T_s - T_m)} \quad (3)$$

Takaisinlaskennan tavoite oli tuottaa kerrosten jäykkyydet ensin niissä olosuhteissa, joissa taipumamittaukset oli tehty ja sen jälkeen sillä vuodenaikavaihtelulla, jota myöhemmin vastelaskennassa halutaan käyttää. Minimimenettelynä vuodenaikavaihtelun huomioon ottamiseen voitaneen pitää neljän vuodenajan käyttöä.

Edellä esitetty kaava on tehty tilanteisiin, missä päällysteen taipumanmittauslämpötilassa saatu jäykkyys muunnetaan +20 asteen referenssilämpötilaan, mutta sitä voidaan käyttää myös niin päin, että muunnetaan vastaava jäykkyys (vastelaskentaa varten) vuodenaikoja (kevät-kesä-syky-talvi) kuvaaville lämpötiloille.



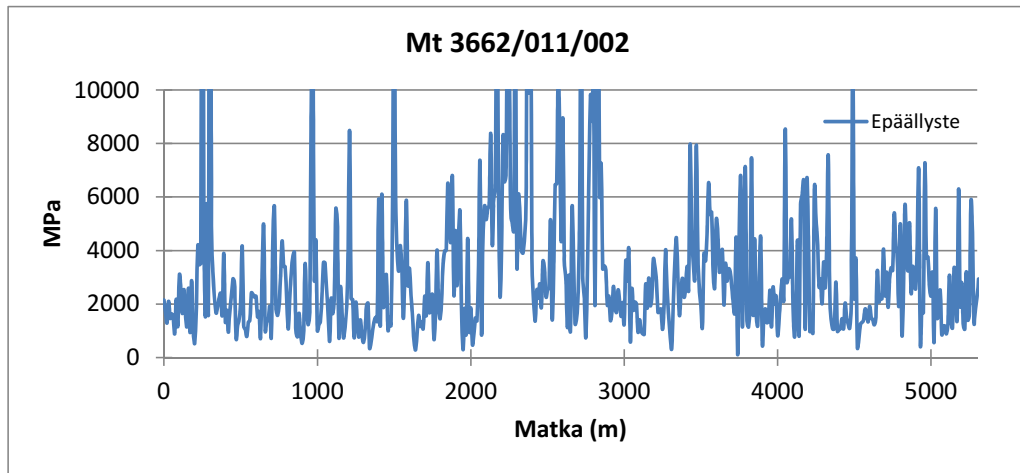
Kuva 60. Kuukausien keskilämpötilat Anjalankosken mittausasemalla vuosina 1971–2000 [15] sekä sen pohjalta määritetty päällysteen moduulien muunnoskerroin lähteestä [20]. Sininen piste edustaa taipumanmittausajankohdan olosuhteita.

Taulukko 14. Suositus vastelaskennan periodijaoksi ja moduulien muunnoskerroimiksi (ylempi) ja tässä työssä käytettävä karkeampi sovellus (alempi).

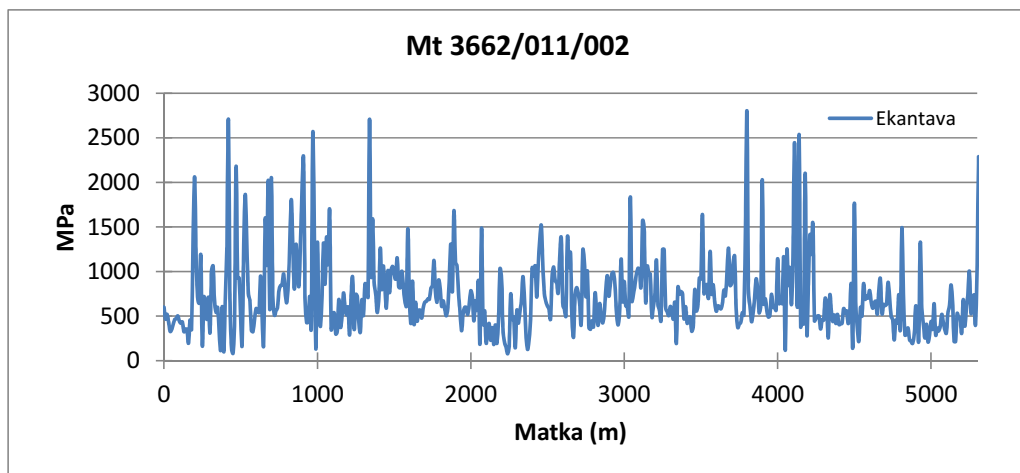
		1	2	3	4	5	6	7
		Talvi	Kevät	RoutaSula	Kesä	Helle	Syky	MyöhSyky
Pituus	(vko)	15-25	3-7	2-4	10-14	1	2-5	2-4
	(d)	150	30	15	95	5	30	30
Kosteusero	(%)	0	1	3	0	0	1	2
Päällyste	Lämpöt.riipp.	=f(T)	=f(T)	=f(T)	=f(T)	=f(T)	=f(T)	=f(T)
Sidottu kantava	kantava	=f(T,jänn)	=f(T,jänn)	=f(T,jänn)	=f(T,jänn)	=f(T,jänn)	=f(T,jänn)	=f(T,jänn)
Sitomaton kantava	kantava	x(5-10)	x(0.8-0.9)	x(0.6-0.9)	=f(jänn)	=f(jänn)	=f(jänn)	=f(jänn)
Sitomaton		x(5-15)	x(0.8-1.2)	x(0.5-0.8)	=f(jänn)	=f(jänn)	=f(jänn)	x(0.8-1)
Pohjamaa		x(5-20)	x(2-10)	x(0.4-0.7)	=f(jänn)	=f(jänn)	x(0.9-1)	x(0.7-0.9)
		1	2	3	4			
		Talvi	Kevät	Kesä	Syky			
Pituus	(vko)	15-25	5-11	11-15	4-9			
	(d)	150	55	100	60			
Kosteusero	(%)	0	2	0	1			
Päällyste	Lämpöt.riipp.	=f(T)	=f(T)	=f(T)	=f(T)			
Sidottu kantava		=f(T,jänn)	=f(T,jänn)	=f(T,jänn)	=f(T,jänn)			
Sitomaton kantava		x(5-10)	x(0.8-0.9)	=f(jänn)	=f(jänn)			
Sitomaton		x(5-15)	x(0.8-1.2)	=f(jänn)	=f(jänn)			
Pohjamaa		x(5-20)	x(2-10)	=f(jänn)	x(0.9-1)			
Kuukauden keskilämpötila		-6.3	3.2	15.4	4.5			

5.2.3 Kerrosten moduulit

Kohteiden tierakenteiden kerrosten jäykkyysmoduulit laskettiin takaisinlaskentaohjelmalla 10 m välein jatkuvana tietona vastaamaan taipumamittausajankohdan (syksyn) tilannetta. Kerroksille haettiin sellaista jäykkyysmoduulien kombinaatiota, jolla ennustettu ja mitattu taipumasuppilo yhtyivät mahdollisimman hyvin. Esimerkkinä kerrosten moduulien laskennasta on maantien 3662 tieosan 2 suunnan 1 moduulien profiilit kerroksittain.



Kuva 61. Päällysteen takaisinlaskettu kimmomoduuli maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.



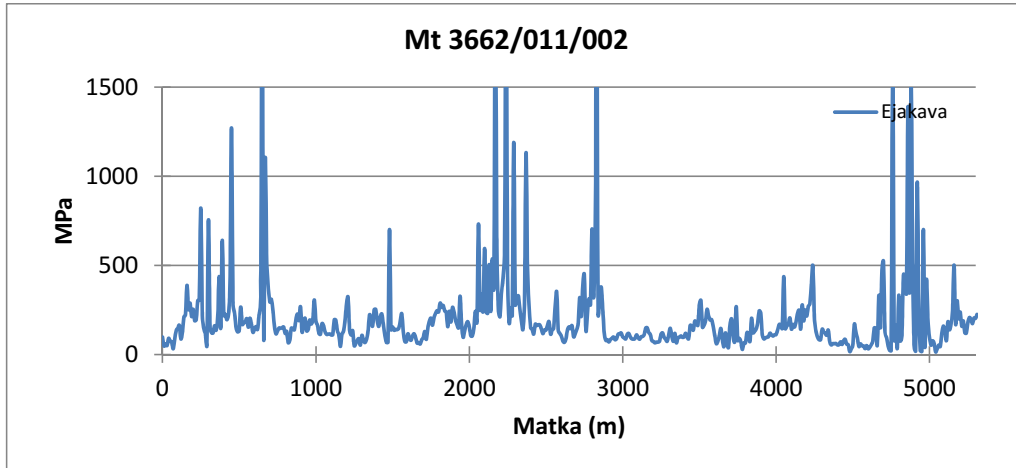
Kuva 62. Kantavan kerroksen takaisinlaskettu kimmomoduuli maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.

Maantiellä 3662 tieosalla 2 päällysteen keskimääräinen moduuli oli 2800 MPa ja se vaihteli välillä 100–10000 MPa. Alle 1000 MPa arvoja oli noin 10 %. Kantavan kerroksen keskimääräinen moduuli oli 727 MPa vaihdellen välillä 76–2800 MPa. Päällysteen ja kantavan kerroksen moduulien suhde oli keskimäärin 6 ja se vaihteli välillä 0.1–46. Noin 9.5 %:lla suhde oli alle 1 ja 29 %:lla suhde oli yli 6.

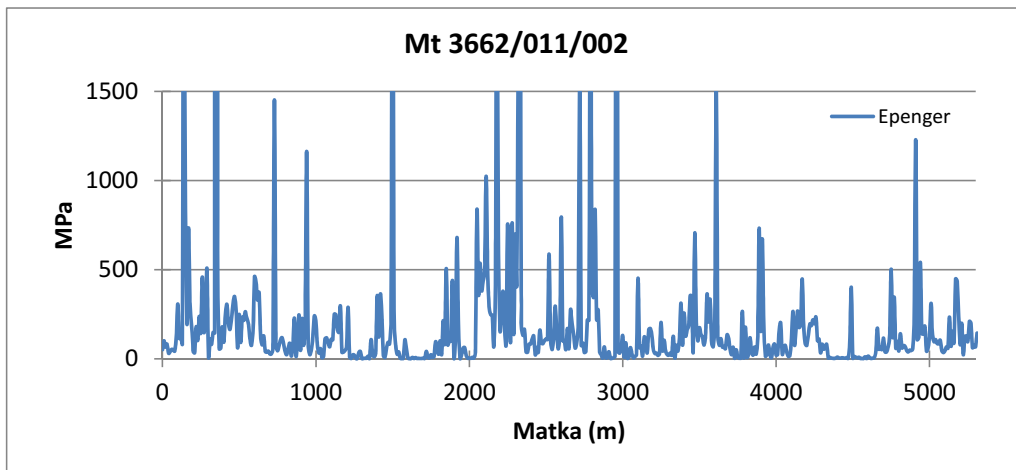
Jakavan kerroksen keskimääräinen moduuli oli 173 MPa ja se vaihteli välillä 14–966 MPa. Kantavan ja jakavan kerroksen moduulien suhde oli keskimäärin 6.1 ja se vaihteli välillä 0.04–43. Noin 8 %:lla suhde oli alle 1 ja 39 %:lla suhde oli yli 6.

Vastelaskennassa on yleisperiaatteena, että kahden peräkkäisen kerroksen moduulien suhde olisi välillä 1–6. Tässä vaiheessa ei pystytä sanomaan, mistä moduulien suhteen väärät arvoalueet johtuvat. Syynä voi olla takaisinlaskennan tuottama virheellinen tulos tai tiellä taipumanmittaushetkellä vallinneet olosuhteet, esimerkiksi, että jokin kerros olisi jopa jäänyt.

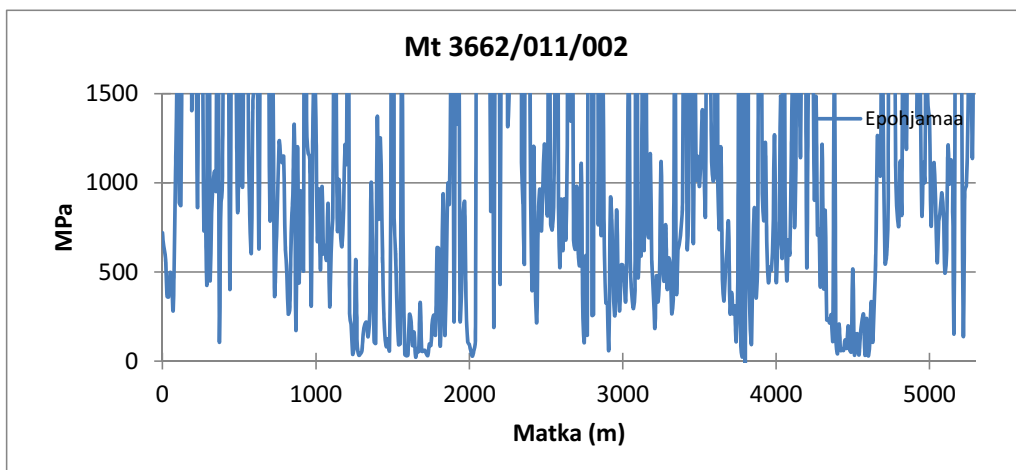
Koska taipuma- ja kerrospaksuustieto olivat jatkuvia (10m), myös kerrosten moduulit tuotettiin jatkuvina eikä esim. siltojen tai vastaavien kohdalla tehty poikkeusta. Tällaisissa kohdissa moduulit saattoivat saada poikkeuksellisia arvoja. Taipumamittausajankohta oli myöhäinen syksy ja on mahdollista, että osia mitatuilta kohteilta saattoi olla jäässä.



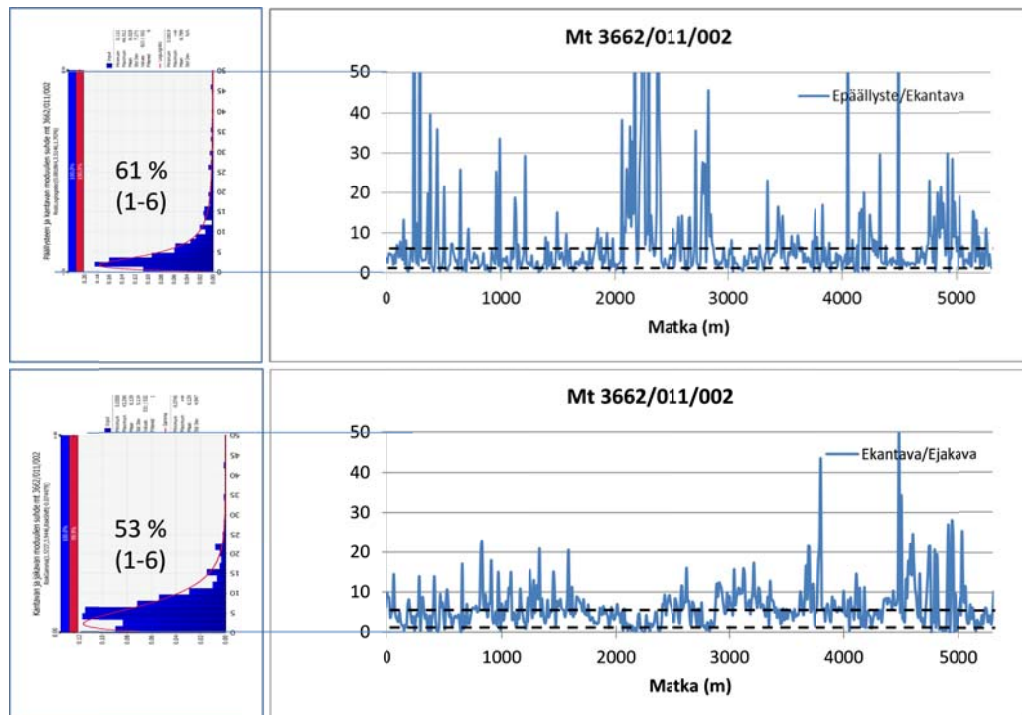
Kuva 63. Jakavan kerroksen takaisinlaskettu kimmomoduuli maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.



Kuva 64. Pengermateriaalin takaisinlaskettu kimmomoduuli maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.



Kuva 65. Pohjamaan takaisinlaskettu kimmomoduuli maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.

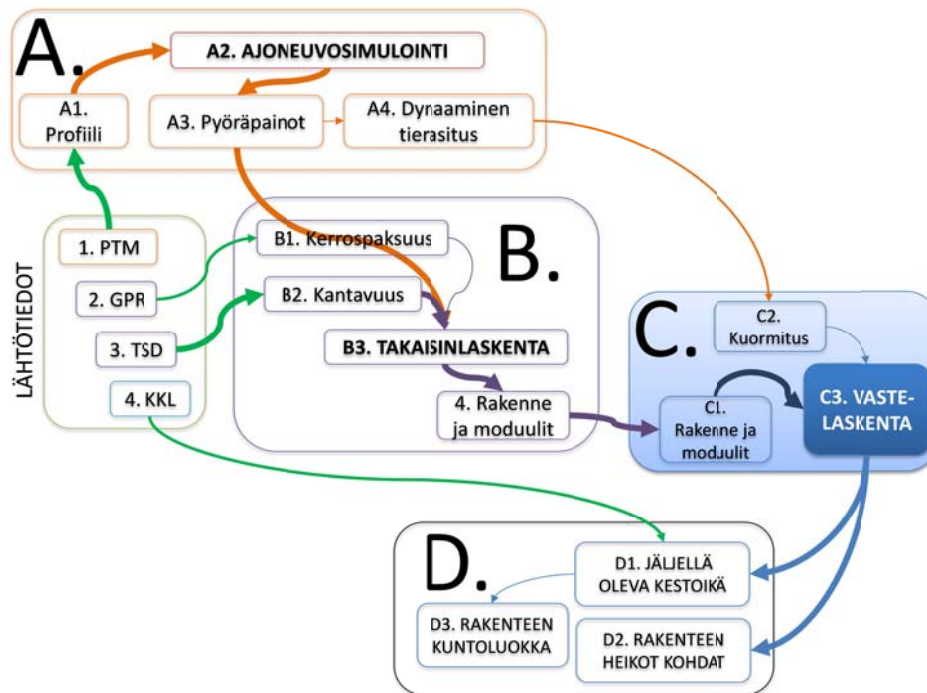


Kuva 66. Ylemmässä kuvaparissa päällysteen moduulin suhde kantavan moduuliin maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1(61 % sallitulla alueella) ja alemmassa kuvaparissa vastaavat kuvat kantavan ja jakavan moduulien suhteesta.

5.3 Kestävyysanalyysi - vastelaskenta

5.3.1 Monikerroslaskenta

Laskennallisen analyysin kolmas vaihe oli vastelaskenta, missä laskettiin tierakenteessa liikennekuormituksen aiheuttamia vasteita monikerrosohjelmalla. Monikerrosohjelmia on olemassa useita, joista tunnetuin Suomessa on APAS-ohjelma. Tässä selvityksessä ei varsinaisesti kehitetty vastelaskentaohjelmia, vaan käytettiin olemassa olevaa STRESS-ohjelmaa. STRESS-ohjelmaan tehtiin kuitenkin sellainen lisäpiirre, että laskenta voitiin suorittaa suurelle määrälle pisteitä eräajona. Periaatteessa vastelaskennan saisi suorittaa millä tahansa ohjelmalla ja mitä paremmin ohjelma ottaa huomioon todelliset olosuhteet sitä parempi. Vastelaskentamenetelmältä vaadittavat kaksi keskeisintä ominaisuutta ovat laskentatulosten realistisuus ja laskennan vasteajat. Realistisuus ja vasteajat ovat yleensä toistensa kanssa vastakkaisia ominaisuuksia ts. mitä parempi tai realistisempi laskentamenetelmä sitä hitaampi se yleensä on. Tässä työssä kiinnitettiin etusija laskennan nopeudelle, koska tarkastelutapa on kokonaisille tieosille tehtävä jatkuva laskenta. Monikerrosohjelmien alkuoletuksista johtuneista puutteista huolimatta oli tässä vaiheessa parempi käyttää nopeaa laskentaa, koska kyse oli monimutkaisen kokonaisuuden yhteensovittamisesta pituus suunnassa jatkuvaksi laskennaksi. Tieosakohtainen jatkuva vastelaskenta asetti paljon suuremman painon vasteajoille kuin mitä uuden rakenteen suhteellisen harvalla pistevälillä toteutettava vastelaskenta yleensä asettaa. Vastelaskennan osuutta tässä työssä kuvataan kuvassa 67.



Kuva 67. Laskennallisen analyysin kolmas vaihe – vastelaskenta.

5.3.2 Lähtötiedot ja parametrit

Vastelaskennan pääasialliset lähtötiedot olivat kuormitustilanne, tierakenteen kerrosten määrä ja kimmomoduulit. Lisäksi tarvittiin joukko parametreja ja laskentaperiaatteita, joista on annettu ohjeita mm. Tiehallinnon antamissa ohjeissa. Kerrosten lukumäärä, paksuudet ja kimmomoduulit saatiin takaisinlaskennan tuottamista tuloksista 10 m keskiarvoina.

Vastelaskennan eräs tärkeimmistä lähtötiedoista on pystyä arvioimaan ja ottamaan huomioon tierakenteen vuodenaikainen vaihtelu. Vuodenaikaisvaihtelussa tärkeimmät vaikuttavat asiat ovat lämpötila ja kosteus. Lämpötila ja kosteus vaikuttavat rakennekerrosten ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen. Vuodenajan vaikutus otettiin huomioon jakamalla vuosi neljään periodiin; kevät, kesä, syksy ja talvi. Kerrosten kimmomoduulit arvioitiin kunkin periodin olosuhteita vastaaviksi, jolloin vastelaskennalle tuotettiin neljän periodin kimmomoduulit.

Vuodenaikaisvaihtelu sisältää paljon epävarmuutta, ja se pitäisi oikeastaan ottaa huomioon vuodenaikaisseurannasta saatavan todellisen tiedon kautta. Johtuen piste-kohtaisesta taipumien mittaustekniikasta mittaaminen on ollut aiemmin hidasta eikä tietoa vuodenaikaisesta vaihtelusta ole kertynyt. Uusi jatkuva taipumien mittaustekniikka poistaisi tämän ongelman ja taipumatietoa eri vuoden aikoina olisi siten jatkossa helppo tuottaa.

Taulukko 15. Vastelaskennan lähtötiedot.

Lähtötieto	Yksikkö	Arvoalue	Vuodenaikaisvaihtelu
Kerosten lukumäärä, paksuus ja kimmomoduulit	kpl, cm, MPa	2–10	Lukumäärä ja paksuudet pysyvät laskentakohdille vakioina, mutta kimmomoduulit vaihtelevat lämpötilan paikallisen vuodenaikaisvaihtelun mukaan.
Poisson vakiot - Sidottu - Sitomaton - Pohjamaa	-	0.15–0.45 0.40 0.45	Sidotaan päällysteen osalta lämpötilan paikalliseen vuodenaikaisvaihteluun ja sitomattomille kerroksille käytetään vakioarvoja, jotka muuttuvat jännitystilän mukaan.
Kerrosten välinen kitka	-	1	Oletetaan kitka täydelliseksi.
Kuormitustilanne	-		2x25 kN (-16,0) ja (16,0) paripyörä.
Pyöräkuorma	kN	35–80	Pyöräpainona ei käytetä vakioarvoa vaan se saadaan ajoneuvosimuloinnista, joka tuottaa dynaamisen pyöräpainon.
Vasteiden laskentapisteet	-		Taipumanmittauskohdan alapuolella päällysteen päältä ja kerrosten rajapinnoista. ¹ Toinen laskentapiste oikean pyörän alta tai sen oikealta puolelta.
1) Laskentapisteiden lukumäärä ja sijainti riippuvat siitä, mitä vauriomekanismeja ja väsymiskriteeriä halutaan käyttää. Vauriomekanismeja on useita ja ne tulisi periaatteessa ottaa kaikki huomioon, mutta niiden kaikkien huomioiminen on suuri haaste, jonka saavuttamiseen tarvitaan lisää tutkimusta.			

5.3.3 Vasteet

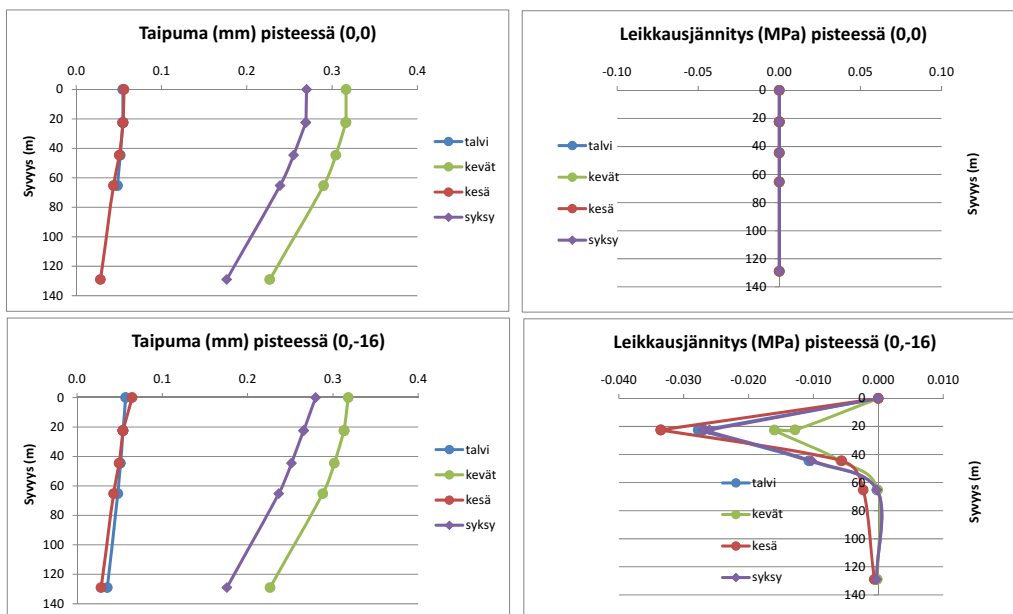
Vastelaskenta tuottaa tavanomaiset vasteet halutuissa laskentapisteissä vuodenajoin ja ne on lueteltu seuraavassa taulukossa. STRESS-ohjelma tuottaa yhteensä 12 vastetta kustakin laskentapisteestä. Koska kerroksia on yleensä pohjamaan päällä kolme tai neljä, tulee laskentapisteitä yhteensä neljä tai viisi. Laskenta tehdään vähintään kuormituskohdan alla, mutta se voidaan tehdä myös muissa kohdissa. Kukin laskentapiste tuottaa oman sarjan tuloksia. Lopuksi laskenta toistetaan niin monta kertaa kun on vuoden aikana jaksoja; nyt käytettiin neljää vuodenaikaa. Taulukossa 16 esitetyssä esimerkkilaskelmassa on yhteensä 480 vasteisiin liittyvää tulosta per laskentakohta. Tämä vastaa jatkuvassa laskennassa 48 000 tulosta kilometrin matkalle. Tästä syystä laskennan lähtötiedot ja määrä sekä tulosten käyttö on syytä miettiä huolella eikä turhia laskentoja kannattaisi tehdä. Vasteiden laskenta on kuitenkin tämän työn analyseissä se kaikkein nopein vaihe.

Taulukko 16. Tavanomaiset vastelaskennan tuottamat vasteet.

Vaste	Lyhenne	Yksikkö
Horizontaalijännitys suunnassa x (ajosuunta)	Sx	MPa
Horizontaalijännitys suunnassa y (poikkisuunta vasemmalle)	Sy	MPa
Vertikaalijännitys suunnassa z (pystysuunta)	Sz	MPa
Leikkausjännitys tasossa xy	Tz	MPa
Horizontaalinen muodonmuutos suunnassa x	Ex	strain
Horizontaalinen muodonmuutos suunnassa y	Ey	strain
Vertikaalinen muodonmuutos suunnassa z	Ez	strain
Pystysuuntainen taipuma	Wz	mm
Ensimmäinen pääjännitys	P1	MPa
Toinen pääjännitys	P2	MPa
Ensimmäinen päämuodonmuutos	E1	strain
Toinen päämuodonmuutos	E2	strain

z-suunta on pystysuunta, x-suunta on ajosuunta ja y-suunta on poikkisuunta

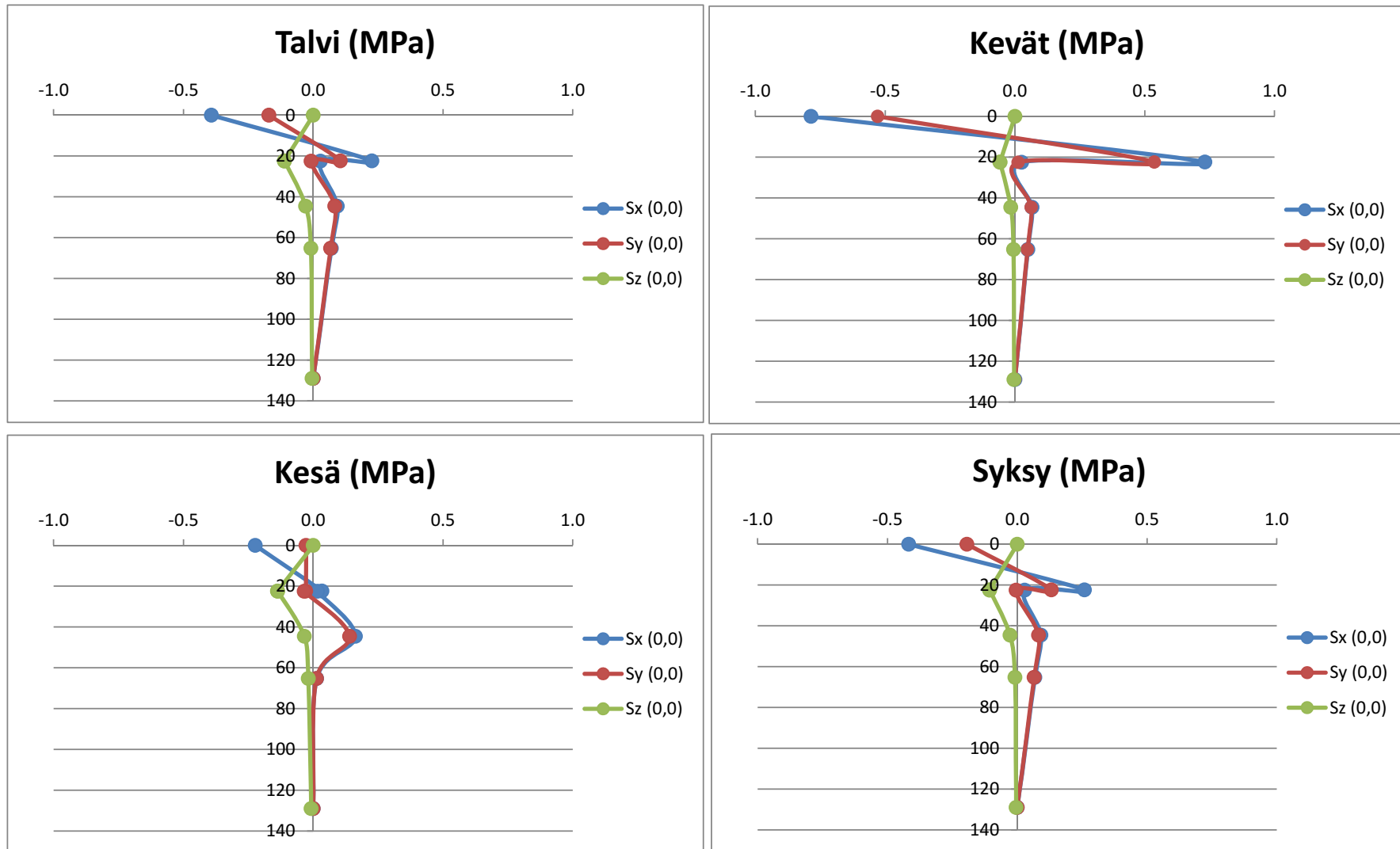
Taulukossa 16 esitetyt tulokset on esitetty ensimmäisen laskentapisteen osalta myös taulukossa 17 ja kuvissa 69–70. Kuvista nähdään, että vasteiden kannalta kriittisimmät vuodenaajat ovat kevät ja syksy.



Kuva 68. Esimerkki vastelaskennan tuloksista yhdelle kymmenmetriselle vuodenajoittain paripyörien välissä (0,0) ja oikean pyörän alla (0,-16).

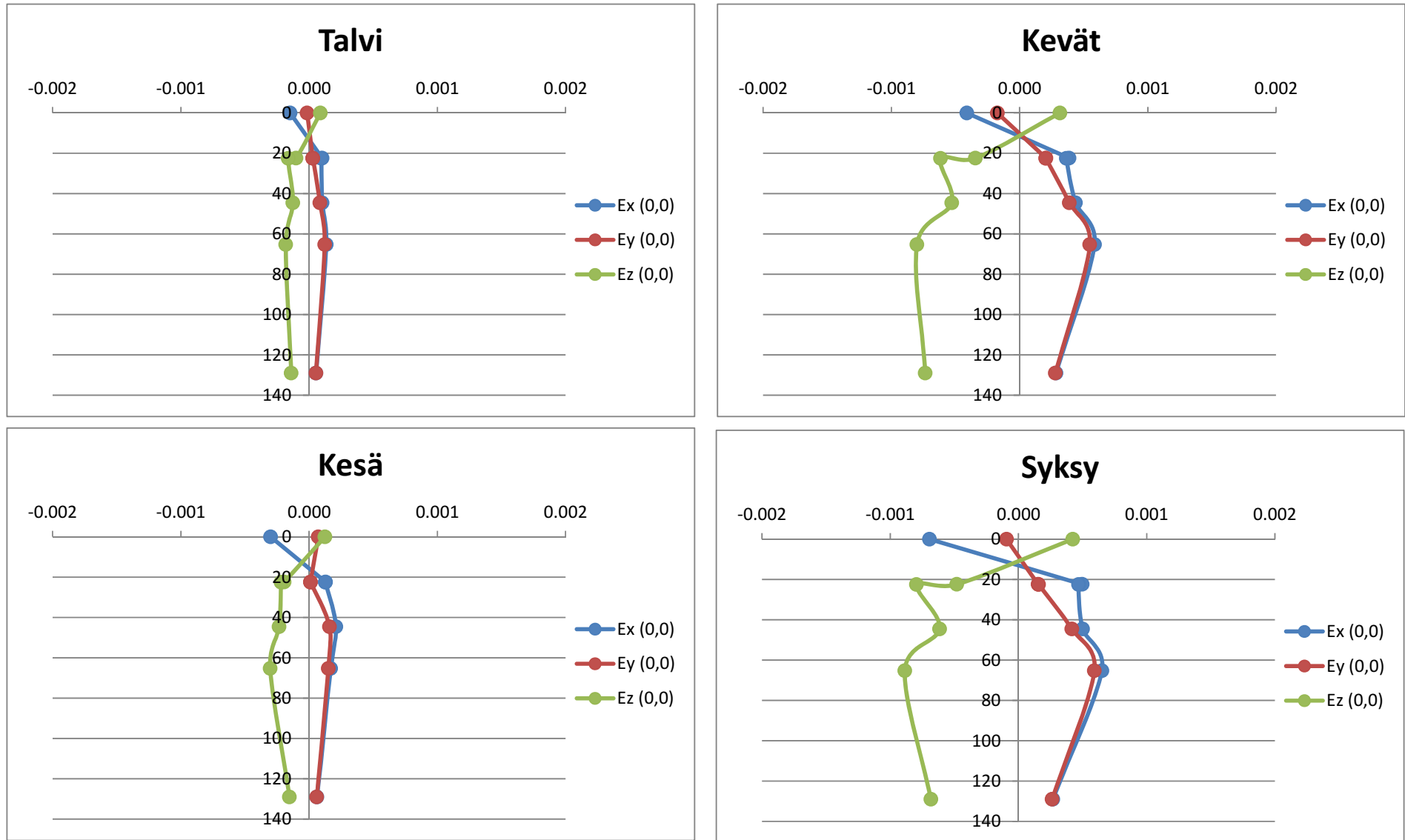
Taulukko 17. Esimerkki vastelaskennan tuloksista STRESS-ohjelmalla yhdelle kymmenmetriselle. Tulos laskettu neljälle eri vuodenajalle kahdessa eri kohdassa (0,0) ja (0,-16) viidessä eri syvyydessä.

Road	Carriageway	Direction	Start Sec	StartDist	Length	Serial	X	Y	LayerNr	Z	Sx (0,0)	Sy (0,0)	Sz (0,0)	Tz (0,0)	Ex	Ey	Ez	Wz	P1	P2	E1	E2
3662	0	1	2	talvi	10	1	0	0	1	0	-1.47	-1.66	-0.71	0.00	-0.0003	-0.0004	0.0002	0.14	-1.47	-1.66	-0.0003	-0.0004
3662	0	1	2	talvi	10	1	0	0	1	9	0.14	0.23	-0.49	-0.05	0.0001	0.0002	-0.0003	0.14	0.23	0.14	0.0002	0.0001
3662	0	1	2	talvi	10	1	0	0	2	24	0.16	0.23	-0.18	-0.05	0.0002	0.0003	-0.0004	0.13	0.23	0.16	0.0003	0.0002
3662	0	1	2	talvi	10	1	0	0	3	55	0.19	0.21	-0.03	0.00	0.0003	0.0004	-0.0005	0.12	0.21	0.19	0.0004	0.0003
3662	0	1	2	talvi	10	1	0	0	4	79	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.0002	0.0002	-0.0006	0.10	0.00	0.00	0.0002	0.0002
3662	0	1	2	talvi	10	2	0	36	1	0	-0.37	-0.19	0.00	0.00	-0.0001	0.0000	0.0001	0.12	-0.17	-0.39	0.0000	-0.0001
3662	0	1	2	talvi	10	2	0	36	1	9	-0.13	-0.23	-0.01	0.08	0.0000	-0.0001	0.0001	0.12	-0.13	-0.23	0.0000	-0.0001
3662	0	1	2	talvi	10	2	0	36	2	24	0.06	-0.01	-0.03	0.07	0.0001	0.0000	-0.0001	0.12	0.06	-0.01	0.0001	0.0000
3662	0	1	2	talvi	10	2	0	36	3	55	0.13	0.10	-0.02	0.00	0.0003	0.0002	-0.0003	0.11	0.13	0.10	0.0003	0.0001
3662	0	1	2	talvi	10	2	0	36	4	79	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.0002	0.0002	-0.0005	0.10	0.00	0.00	0.0002	0.0002
3662	0	1	2	kevät	10	1	0	0	1	0	-2.89	-3.38	-0.71	0.00	-0.0010	-0.0015	0.0010	0.88	-2.89	-3.38	-0.0010	-0.0015
3662	0	1	2	kevät	10	1	0	0	1	9	1.58	2.01	-0.33	-0.06	0.0007	0.0011	-0.0011	0.88	2.01	1.58	0.0011	0.0007
3662	0	1	2	kevät	10	1	0	0	2	24	0.16	0.21	-0.13	-0.04	0.0012	0.0018	-0.0023	0.85	0.21	0.16	0.0018	0.0012
3662	0	1	2	kevät	10	1	0	0	3	55	0.17	0.19	-0.02	0.00	0.0019	0.0023	-0.0030	0.77	0.19	0.17	0.0023	0.0019
3662	0	1	2	kevät	10	1	0	0	4	79	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.0013	0.0014	-0.0035	0.67	0.00	0.00	0.0014	0.0013
3662	0	1	2	kevät	10	2	0	36	1	0	-0.83	-0.34	0.00	0.00	-0.0005	0.0000	0.0003	0.76	-0.28	-0.88	0.0000	-0.0005
3662	0	1	2	kevät	10	2	0	36	1	9	0.15	-0.28	-0.02	0.09	0.0002	-0.0002	0.0000	0.76	0.18	-0.31	0.0002	-0.0003
3662	0	1	2	kevät	10	2	0	36	2	24	0.09	0.04	-0.03	0.06	0.0007	0.0002	-0.0007	0.76	0.10	0.03	0.0008	0.0001
3662	0	1	2	kevät	10	2	0	36	3	55	0.13	0.11	-0.02	0.00	0.0016	0.0012	-0.0020	0.72	0.13	0.10	0.0017	0.0010
3662	0	1	2	kevät	10	2	0	36	4	79	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.0012	0.0010	-0.0029	0.64	0.00	0.00	0.0012	0.0010
3662	0	1	2	kesä	10	1	0	0	1	0	-1.03	-1.16	-0.71	0.00	-0.0005	-0.0008	0.0001	0.16	-1.03	-1.16	-0.0005	-0.0008
3662	0	1	2	kesä	10	1	0	0	1	9	-0.20	-0.19	-0.54	-0.06	0.0001	0.0001	-0.0006	0.16	-0.19	-0.20	0.0001	0.0001
3662	0	1	2	kesä	10	1	0	0	2	24	0.45	0.59	-0.15	-0.02	0.0005	0.0008	-0.0009	0.15	0.59	0.45	0.0008	0.0005
3662	0	1	2	kesä	10	1	0	0	3	55	0.03	0.04	-0.05	-0.01	0.0004	0.0005	-0.0009	0.11	0.04	0.03	0.0005	0.0004
3662	0	1	2	kesä	10	1	0	0	4	79	0.00	0.00	-0.04	-0.01	0.0003	0.0003	-0.0008	0.09	0.00	0.00	0.0003	0.0003
3662	0	1	2	kesä	10	2	0	36	1	0	-0.20	-0.07	0.00	0.00	-0.0002	0.0000	0.0001	0.11	-0.05	-0.22	0.0000	-0.0003
3662	0	1	2	kesä	10	2	0	36	1	9	-0.07	-0.08	-0.01	0.08	-0.0001	-0.0001	0.0001	0.11	-0.07	-0.08	0.0000	-0.0001
3662	0	1	2	kesä	10	2	0	36	2	24	0.11	-0.03	-0.05	0.04	0.0002	-0.0001	-0.0001	0.11	0.12	-0.05	0.0003	-0.0001
3662	0	1	2	kesä	10	2	0	36	3	55	0.02	0.01	-0.04	0.02	0.0003	0.0002	-0.0005	0.10	0.02	0.01	0.0004	0.0001
3662	0	1	2	kesä	10	2	0	36	4	79	0.00	0.00	-0.03	-0.01	0.0002	0.0002	-0.0005	0.08	0.00	0.00	0.0003	0.0002
3662	0	1	2	syksy	10	1	0	0	1	0	-1.56	-1.76	-0.71	0.00	-0.0014	-0.0019	0.0009	0.70	-1.56	-1.76	-0.0014	-0.0019
3662	0	1	2	syksy	10	1	0	0	1	9	0.21	0.33	-0.48	-0.05	0.0005	0.0008	-0.0013	0.70	0.33	0.21	0.0008	0.0005
3662	0	1	2	syksy	10	1	0	0	2	24	0.16	0.23	-0.18	-0.05	0.0010	0.0016	-0.0022	0.67	0.23	0.16	0.0016	0.0010
3662	0	1	2	syksy	10	1	0	0	3	55	0.18	0.21	-0.03	0.00	0.0016	0.0020	-0.0026	0.60	0.21	0.18	0.0020	0.0016
3662	0	1	2	syksy	10	1	0	0	4	79	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.0011	0.0012	-0.0030	0.51	0.00	0.00	0.0012	0.0011
3662	0	1	2	syksy	10	2	0	36	1	0	-0.40	-0.19	0.00	0.00	-0.0007	-0.0001	0.0004	0.58	-0.17	-0.42	0.0000	-0.0007
3662	0	1	2	syksy	10	2	0	36	1	9	-0.13	-0.24	-0.01	-0.08	-0.0001	-0.0004	0.0002	0.58	-0.12	-0.24	-0.0001	-0.0004
3662	0	1	2	syksy	10	2	0	36	2	24	0.06	0.00	-0.03	0.07	0.0005	-0.0001	-0.0003	0.58	0.07	-0.01	0.0006	-0.0002
3662	0	1	2	syksy	10	2	0	36	3	55	0.12	0.10	-0.02	0.00	0.0013	0.0009	-0.0016	0.55	0.13	0.10	0.0014	0.0007
3662	0	1	2	syksy	10	2	0	36	4	79	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.0010	0.0008	-0.0024	0.48	0.00	0.00	0.0010	0.0008



Kuva 69.

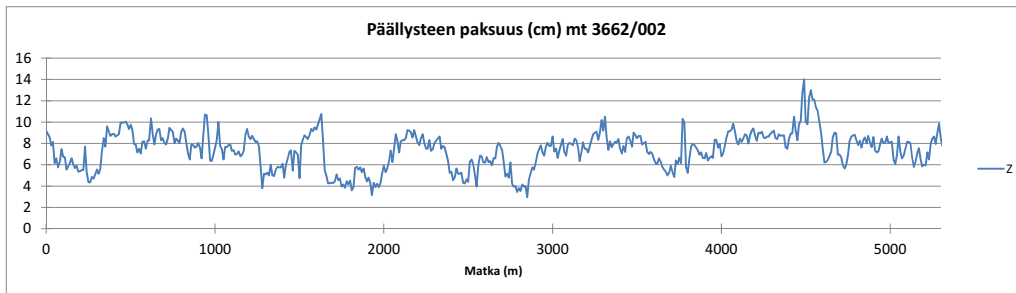
Esimerkki vastelaskennan tuloksista yhdelle kymmenmetriselle vuodenajoittain kohdassa (0,0). S_x , S_y ja S_z jännityksiä eri laskentapisteissä. Pystyakselillä syvyys (cm)



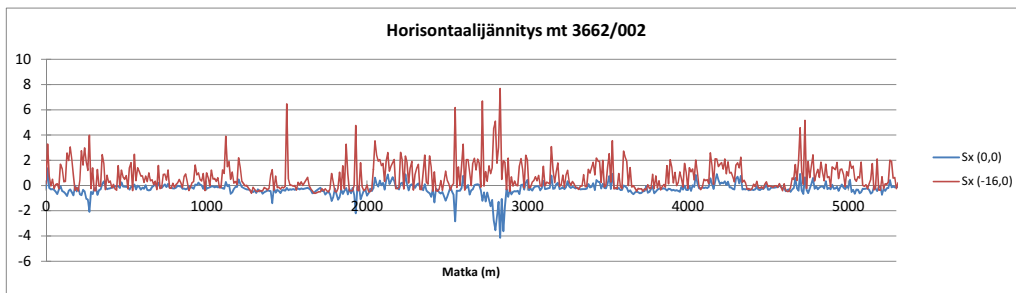
Kuva 70. Esimerkki vastelaskennan tuloksista yhdelle kymmenmetriselle vuodenajoittain pisteessä (0,0). Ex , Ey ja Ez muodonmuutoksia eri laskentapisteissä

5.3.3.1 Maantie 3662 tieosa 2 suunta 1

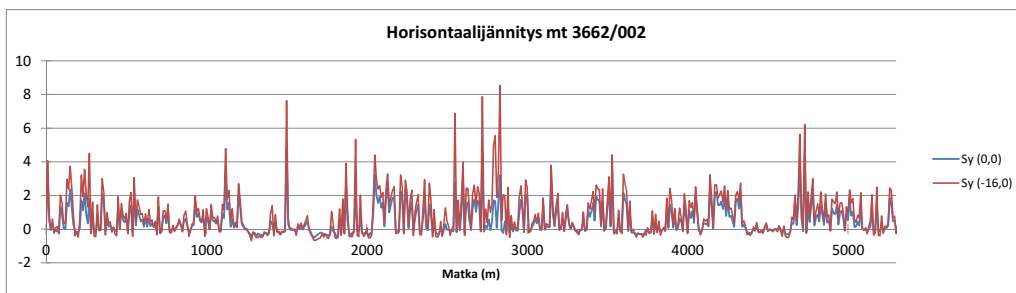
Oheisissa kuvissa on esitetty maantielle 3662 laskettujen vasteiden profiilit matkan suhteen. Ensimmäisessä kuvassa on päällysteen paksuustieto (cm), josta voidaan verrata, onko paksuudella vaikutusta tuloksiin. Kirjallisuudessa on todettu usein, ettei mitoitustaskelmia tulisi tehdä monikerrososohjelmilla alle 8 cm päällysteille. Tarkastelussa olevan tieosan päällysteestä on noin 60 % alle 8 cm päällystettä ja 40 % paksumpaa. Mikä on erikoista, on se, että päällysteen paksuus vaihtelee noinkin paljon, vaikka tielle on tehty vain kaksi päällystystoimenpidettä sen päällystyshistoriassa.



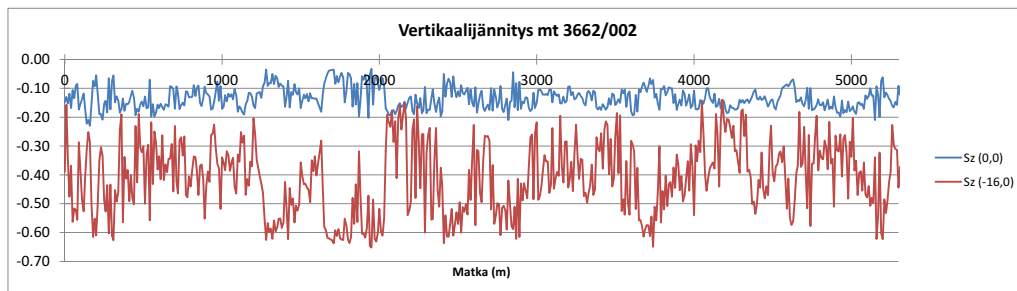
Kuva 71. Päällysteen paksuus mt 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.



Kuva 72. Horisontaalijännitys päällysteen alapinnassa x-suunnassa pisteissä (0,0) ja (-16,0). Jännitys on pyörän kohdalla vetoa (+) ja paripyörien välissä puristusta (-).

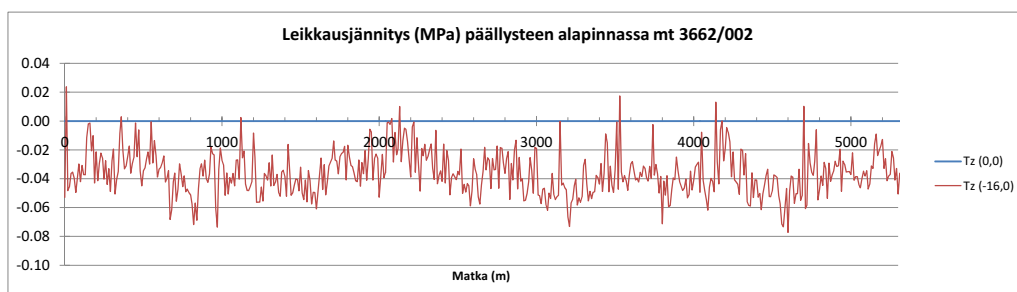


Kuva 73. Horisontaalijännitys päällysteen alapinnassa y-suunnassa pisteissä (0,0) ja (-16,0).

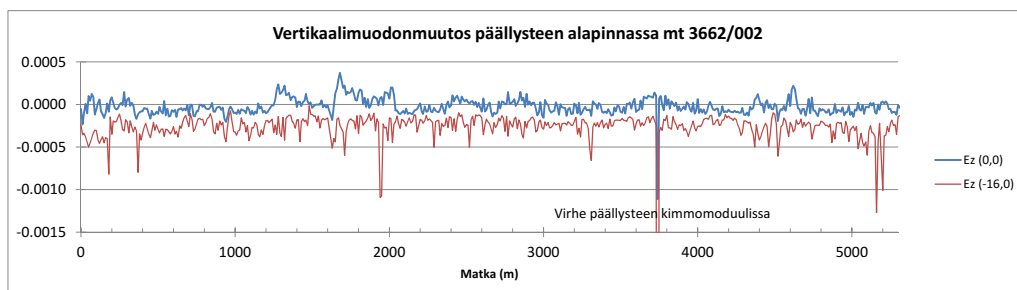


Kuva 74. Vertikaalijännitys (MPa) päällysteen alapinnassa pisteissä (0,0) ja (-16,0).

Kuvissa esitetyt vasteet on laskettu syksyn tilanteessa eli rakennekerrosten jäykkyyksinä on käytetty takaisinlaskennasta saatuja tuloksia sellaisenaan ilman vuodenaikaisvaihtelutiedon soveltamista. Muille vuodenaajoille vastaavat tulokset lasketaan erikseen käyttäen vuodenaikaisvaihtelusta saatavia jäykkyyksien muunnoksia.



Kuva 75. Leikkausjännitys (MPa) päällysteen alapinnassa pisteissä 1 ja 2.



Kuva 76. Vertikaalimuodonmuutos (strain) päällysteen alapinnassa pisteissä 1 ja 2.

Väsymistarkasteluissa käytetään asfalttipäällysteelle pääasiassa kuvan 76 mukaista vertikaalista muodonmuutosta. Toinen päällysteisiin liittyvän väsymistarkastelun vaste on kuvan 74 pisteessä 2 eli toisen pyörän alta laskettu vertikaalijännitys.

5.3.4 Väsymiskriteerit

5.3.4.1 Päällyste

Tien rakennekerrosten väsymiskriteereissä voidaan lähteä liikkeelle suunnitteluohjeiden ja mitoitusohjelmien sisältämistä kriteereistä. Väsyminen esitetään yleensä kaavana, jolla lasketaan kuinka suuren määrän rakenne kestää tietyinsuuruisia muodonmuutoksia:

$$N = A \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^B$$

missä ϵ =muodonmuutostaso (strain)

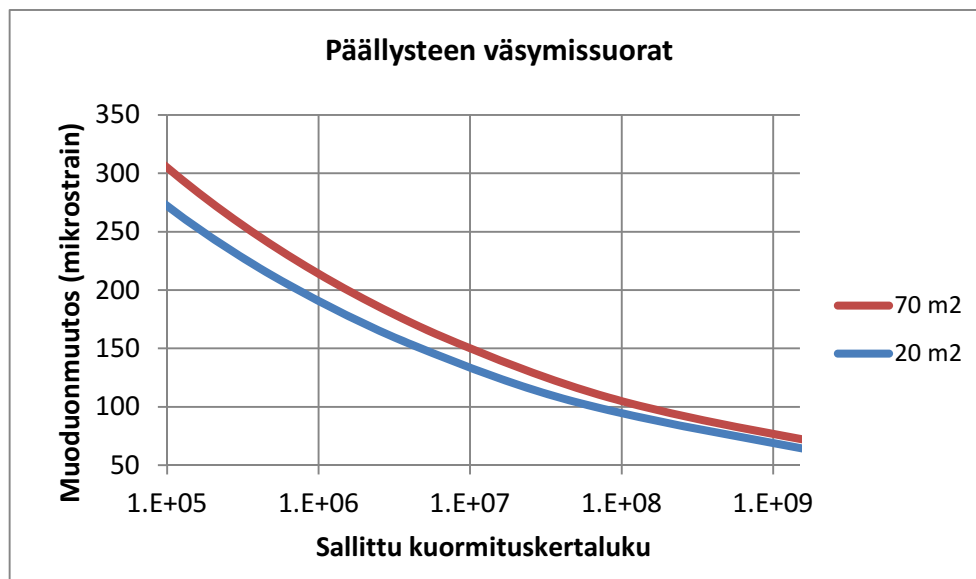
N= muodonmuutostasoa vastaava kuormituskertojen määrä

ja A ja B ovat väsymissuoran parametrit

Asfalttipäällysteen väsymissuorat on esitetty kuvassa 77, missä sininen käyrä edustaa vähän vaurioitunutta päällystettä ja punainen käyrä suhteellisen vaurioitunutta päällystettä. Rakenteellista kuntoa ajatellen tarvittaisiin kolme väsymissuoraa,

- joista ensimmäinen kuvaisi tilannetta, missä päällysteeseen alkaa tulla halkeamia, mutta ne eivät välttämättä näy pinnassa.
- Toinen väsymissuora kuvaisi tilannetta, jossa päällyste on hajonnut ja edellyttää parantamista.
- Kolmas väsymissuora kuvaisi tilannetta, missä päällyste on niin huono, että hajoaminen on kiihtyvää ja korjaamisen kustannukset alkavat nousta.

Kuvassa 77 on asfalttipäällysteen väsymissuorat, jotka vastaavat päällystevaurioinventoinnin vauriosummatasoja 20 m² ja 70 m². Niitä voitaisiin ajatella sovellettavan rakenteellisen kunnon laskemisessa siten, että ensimmäinen käyrä vastaisi kakkoskäyrää ja toinen kolmoskäyrää. Tämä tulisi tietenkin todentaa paremmin. Kevytpäällysteille ei näytä löytyvän vastaavia väsymissuoria.



Kuva 77. Asfalttipäällysteen väsymissuorat [3].

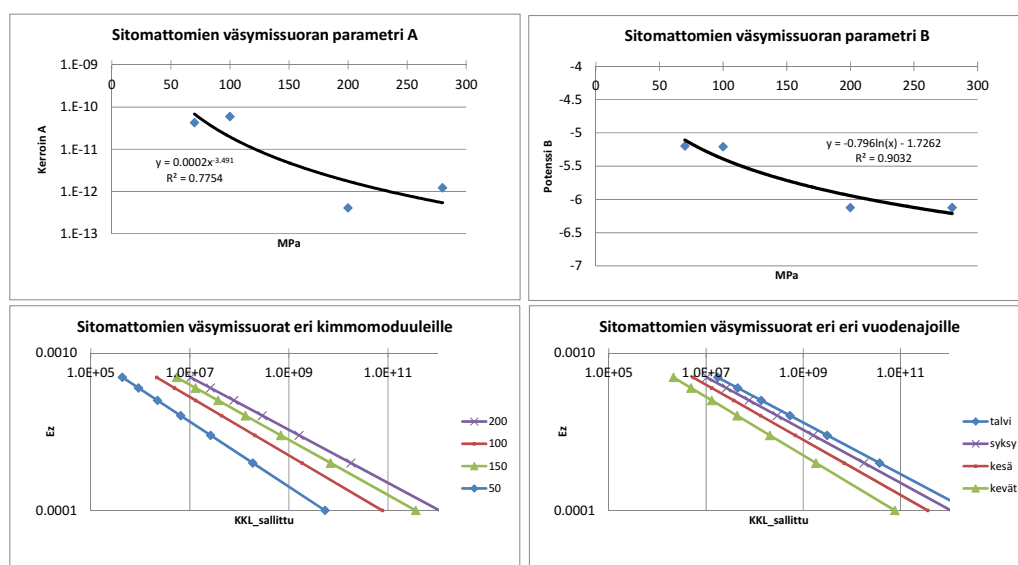
5.3.4.2 Sitomattomat kerrokset

Sitomattomien kerrosten väsymissuorat on yleensä esitetty materiaalilajeittain. Materiaalilajeille on esitetty tyypilliset jäykkyysmoduulit. Kuvassa 78 materiaalilajien väsymissuorien parametrit A ja B on mallinnettu jäykkyysmoduulien funktiona, jolloin väsymissuorista saadaan ”jatkuvia”. Tällöin kertoimien A ja B arvot olisivat laskettavissa kaavoilla:

$$A = 0.0002x^{-3,491}$$

$$B = -0,903\ln(x) - 1,726$$

missä x on materiaalin jäykkyysmoduuli.



Kuva 78. Sitomattoman materiaalin väsymissuorien parametrit (A, B) sekä laskennalliset väsymissuorat eri kimmomoduulien materiaaleille sekä kimmomoduulin 280 MPa materiaalin väsymissuorat eri vuodenajoille, muokattu lähteestä [3].

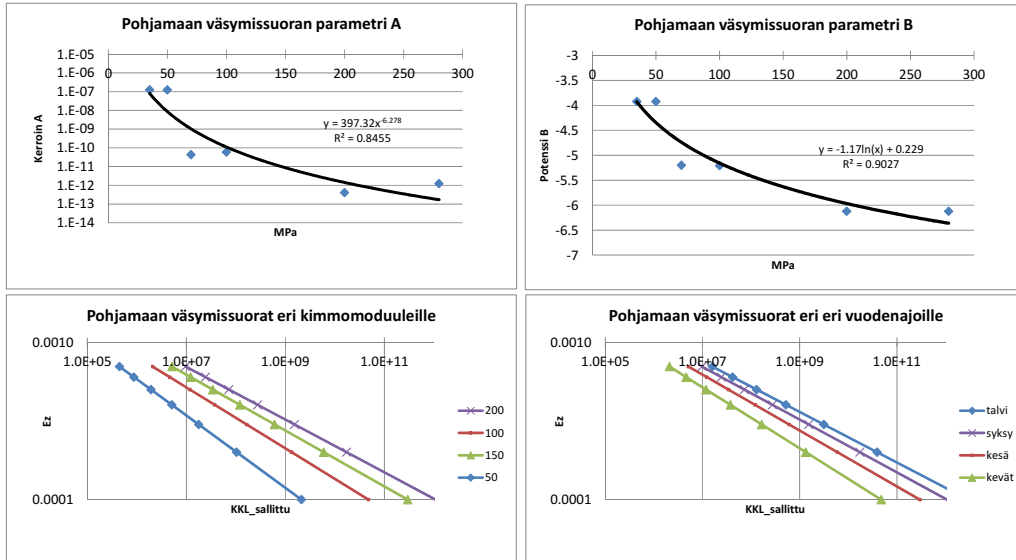
5.3.4.3 Pohjamaa

Pohjamaalle on esitetty maalajityypeittäiset kimmomoduulit ja niiden väsymissuorien parametrit lähteessä [3]. Väsymissuorien parametrit ja väsymissuorat on muokattavissa samaan tapaan kuin sitomattomien kerrosten kohdalla jatkuviksi väsymissuoriksi seuraavan kuvan tapaan. Kertoimet A ja B ovat laskettavissa seuraavilla kaavoilla:

$$A = 397x^{-6,278}$$

$$B = -1,17\ln(x) + 0,229$$

missä x on materiaalin jäykkyysmoduuli.

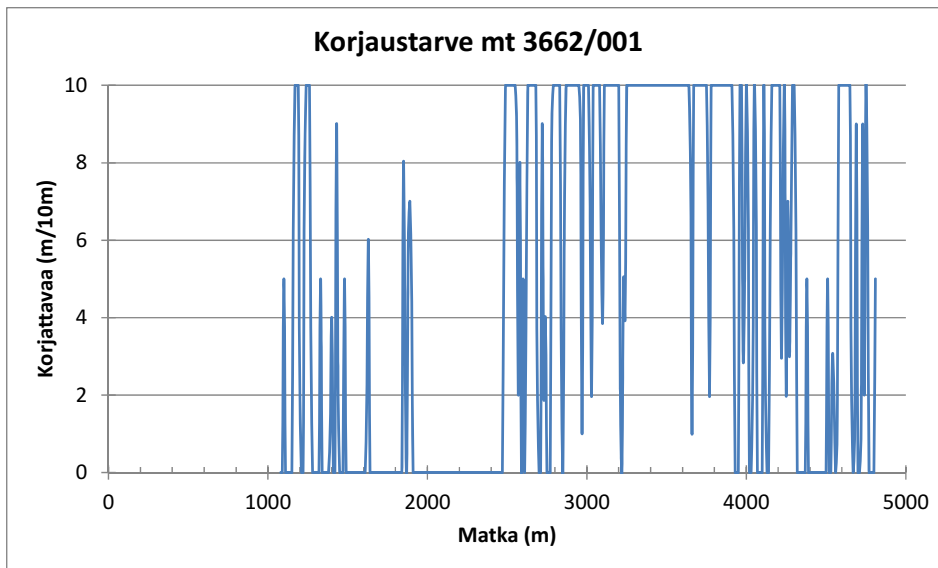


Kuva 79. Pohjamaan väsymissuorien parametrit (A, B) sekä laskennalliset väsymissuorat eri kimmomoduulien materiaaleille sekä kimmomoduulin 280 MPa materiaalin väsymissuorat eri vuodenojoille, muokattu lähteestä [3].

5.3.5 Validointitarkastelut

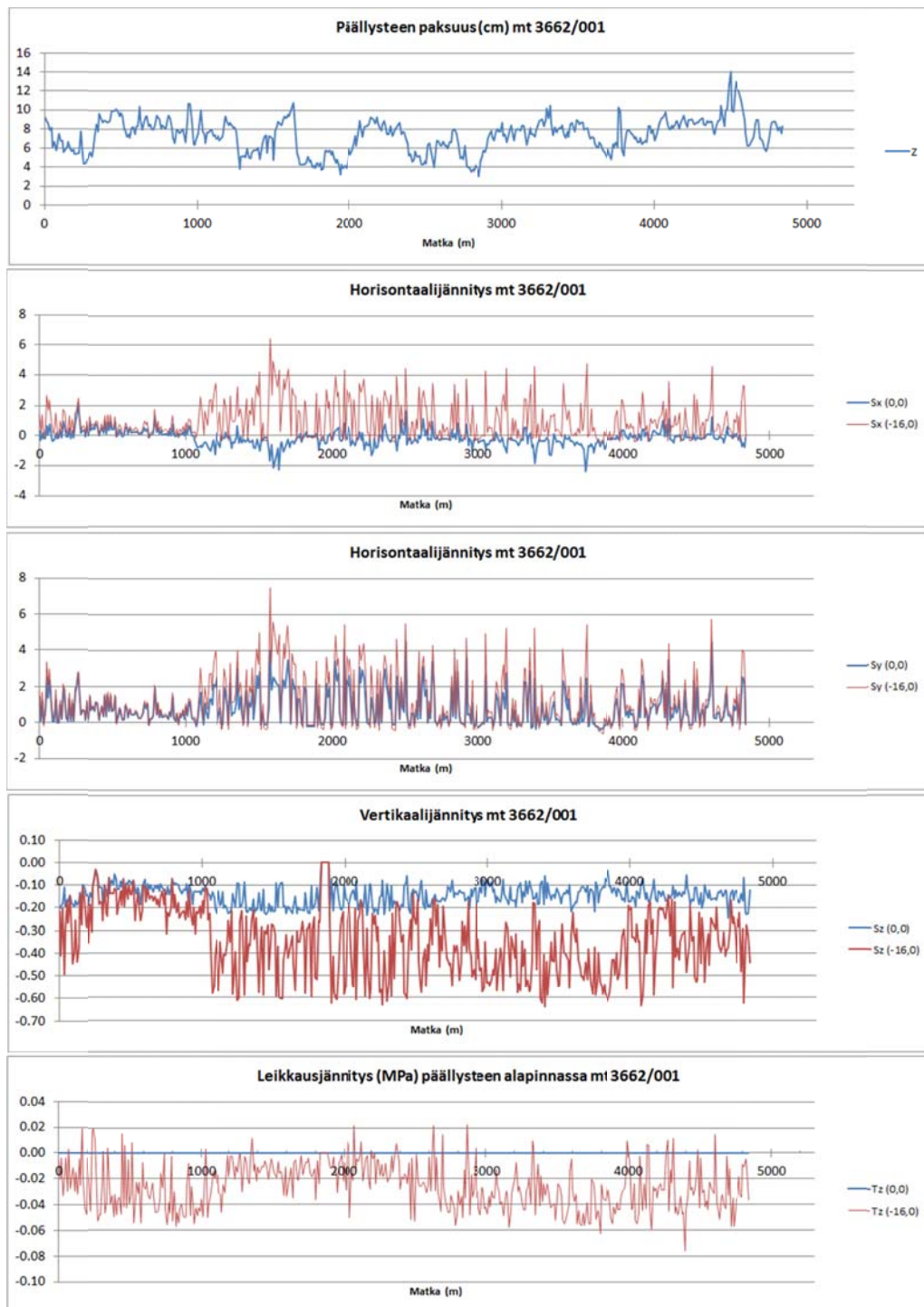
5.3.5.1 Mt 3663 tieosa 1

Maantien 3663 tuloksia käytettiin rakenteellisen kunnan tunnusluvun validoinnissa. Tieosalla 1 oli 2.5 km AB-päällystettä ja loppu oli PAB-B-päällystettä. Päällystevaurioiden kartoitustieto oli olemassa vain paalulta 1000 lähtien. Tieosalla 1 oli havaittavissa melko vaurioitunut jakso paaluvälillä 2500–4300, jota edelsi noin 500 m pituinen täysin ehjä jakso (AB-päällystettä).



Kuva 80. Maantien 3662 tieosan 1 päällysteen korjaustarve.

Monikerrosohjelman tuottamista vasteista on esitetty profiilit kuvassa 81. Kuvissa on kaksi käyrää eli kummastakin tarkastelupisteestä (0,0) ja (-16,0) omansa. Kakkospisteelle (-16,0) saatiin suurempia vasteita (punainen käyrä) eli tarkastelu kannatti keskittää siihen. Jännityksissä näkyi suuri vaihtelu, joka aiheutui sekä kuormituksen, että kerrosmoduulien vaihtelusta. Päällysteen alapinnan horisontaalijännitykset saivat noin 4 MPa:n arvoja kun vertikaalijännitykset saivat noin 0.6 MPa:n arvoja (puristusta). Leikkausjännitykset saivat noin 0.06 MPa:n arvoja.



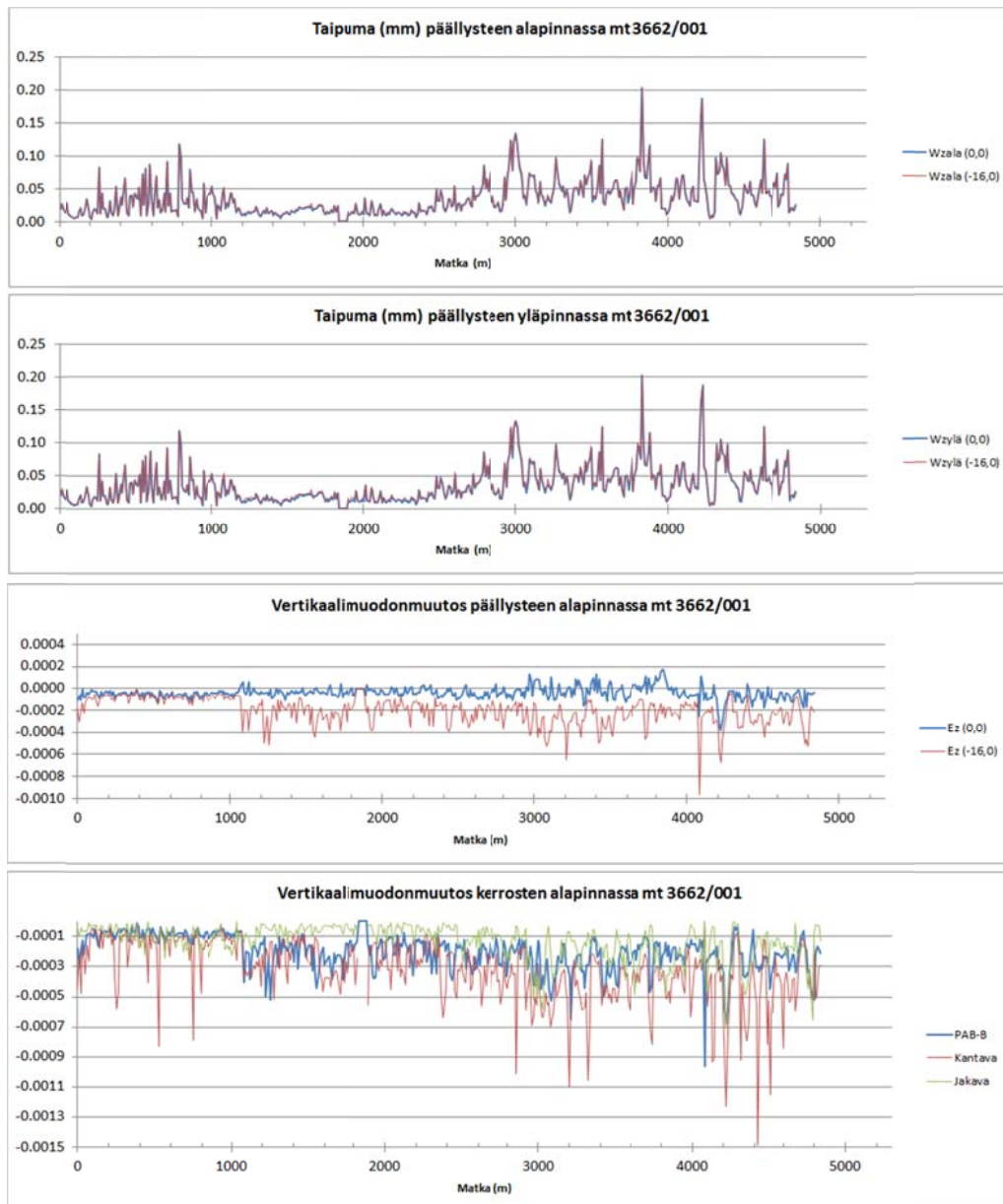
Kuva 81. Monikerrosohjelman tuottamia päällysteen alapintaan kohdistuvia vasteita mt 3662 tieosalla 1 syksyllä 2013.

Vertikaalijännityksistä nähtiin, että tieosan alussa ensimmäinen kilometri sai pienempiä arvoja kuin muu tieosa. Vertikaalijännitykset menivät noltaan sillan kohdalla n. 1900, mikä johtui siitä, että sillä kohdalla rakenteen jäykkyys oli pienen taipuman takia suuri.

Vastaavia muodonmuutoksia on tarkasteltu kuvassa 82. Päällysteen taipumat saivat pienimmät arvonsa välillä 1000–2500 ja suurimmat välillä 3000–4800. Päällysteen väsymiseen liittyvä kriteeri, vertikaalimuodonmuutos, sai pieniä arvoja tieosan ensimmäisellä kilometrillä ja suhteellisen suuria arvoja muulla osalla.

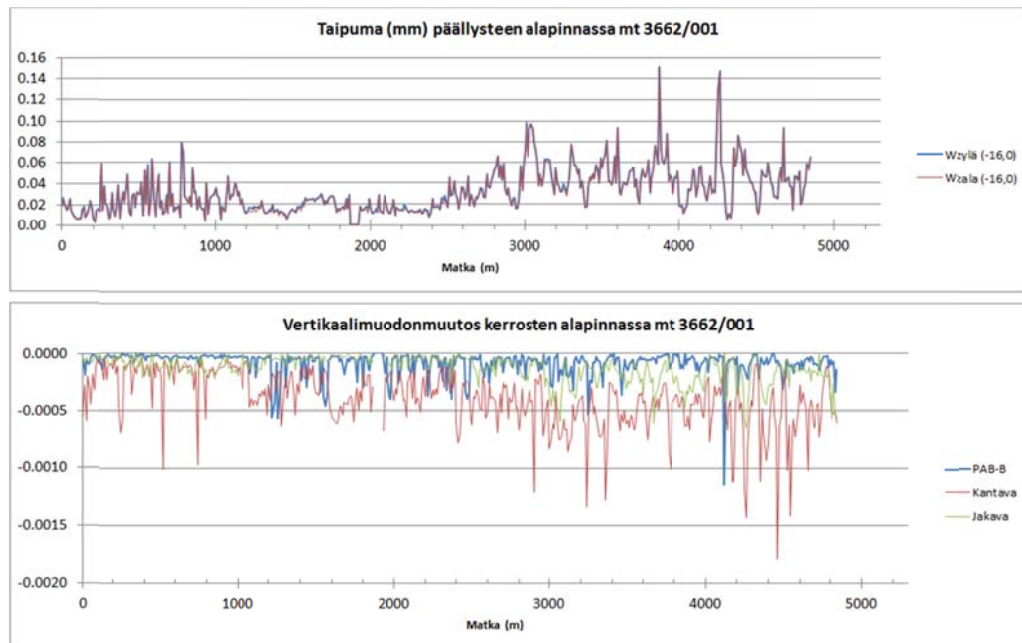
Kantava kerros sai myös suuria arvoja lukuun ottamatta väliä 1000–2500. Päällysteen ja kantavan kerroksen suuret muodonmuutosarvot eivät osuneet aina samoille paaluille. Tämä viittasi siihen, että tien rakenteen ongelmakohtat olivat välillä päällysteessä, välillä kantavassa kerroksessa ja välillä molemmissa.

Yleistoteamuksena voidaan sanoa, että tieosalla oli tiheään toistuvia suuria vasteita erityisesti paaluvälillä 1000–4800, mutta jonkun verran myös alkuosalla.

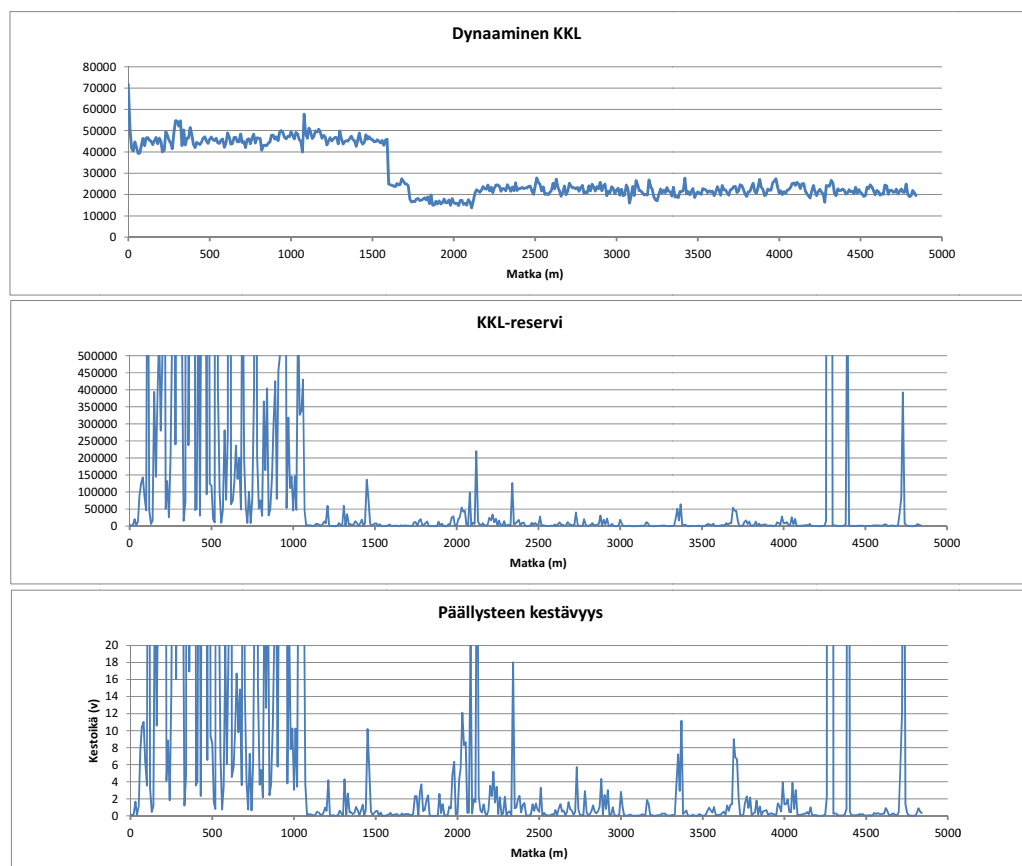


Kuva 82. Monikerrosohjelman tuottamia vasteita mt 3662 tieosalla 1 syksyllä 2013.

Kuvassa 83 on esitetty päällysteen alapinnan taipuma ja kerrosten vertikaalimuodonmuutokset kevään tilanteessa. Profiilit olivat hyvin yhtenevät syksyn tulosten kanssa, mutta arvot olivat luonnollisesti suurempia.



Kuva 83. Monikerrosohjelman tuottamia vasteita mt 3662 tieosalla 1 keväällä.

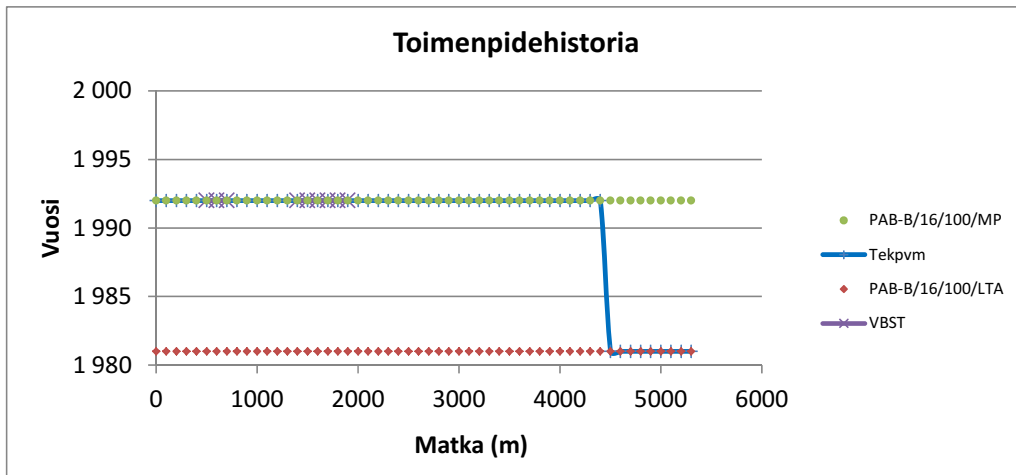


Kuva 84. Maantien 3662 tieosan 1 dynaaminen kuormituskertaluku, vastelaskennan tuottama päällysteen KKL-reservi ja päällysteen jäljellä oleva kestoikä (kevät+syksy).

Kun päällysteen kestävyttä tarkasteltiin edellä esitettyjen vasteiden avulla, voitiin todeta, että päällysteen kestoikä on paalulta 1000 lähtien lähes nolla ja paaluvälillä 0–1000 se vaihteli paljon (Kuva 84). Ts. tien rakenteellinen kunto oli lähes koko pituudeltaan huono, mikä oli melko samansuuntainen toteamus sen kanssa mitä päällystevaurioiden kartoitustiedosta voitiin päätellä (muistaen se, ettei siinä ollut eroteltu suuntia). Eli pelkästä päällysteen väsymistarkastelusta voitiin päätellä, että siinä oli potentiaalia tien rakenteellisen kunnan arvioimiseen. Muiden rakennekerrosten mukaan ottaminen tietysti parantaisi tilannetta.

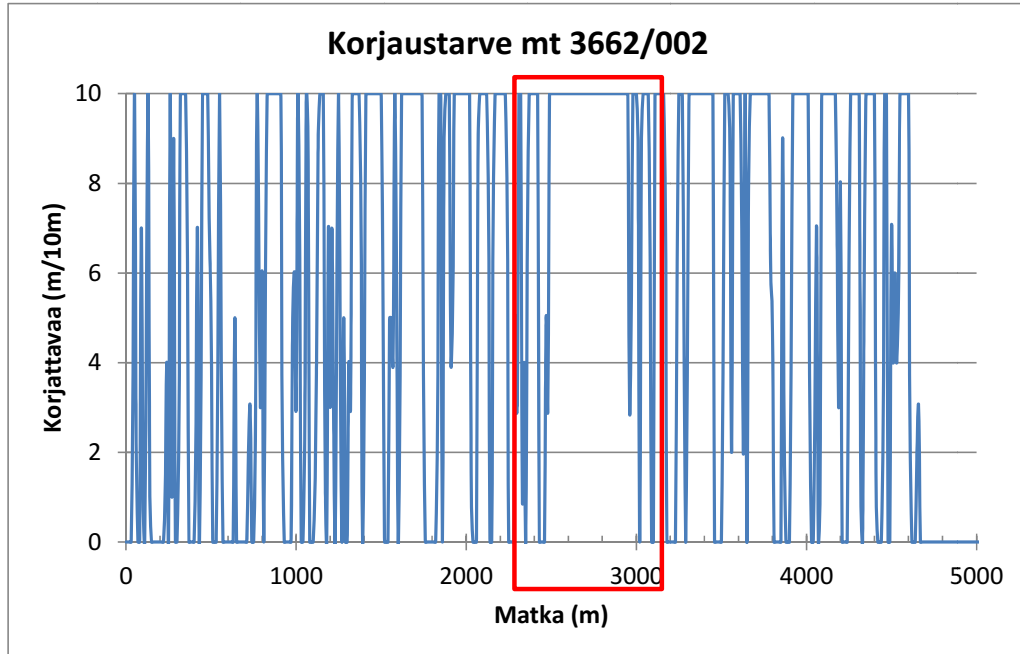
5.3.5.2 Mt 3663 tieosa 2

Maantien 3662 tieosa 2 oli tekniseltä iältään n. 22–34 vuotta vanha tie, jonka viimeinen päällyste (PAB-B/16/100/MP) oli tehty parantamisen yhteydessä vuonna 1992. Tieosalla 2 alkupäähän oli tehty paikka paikoin vaahtobitumistabilointia. Noin puolen kilometrin pituinen loppuosa oli tekniseltä iältään 34 v.



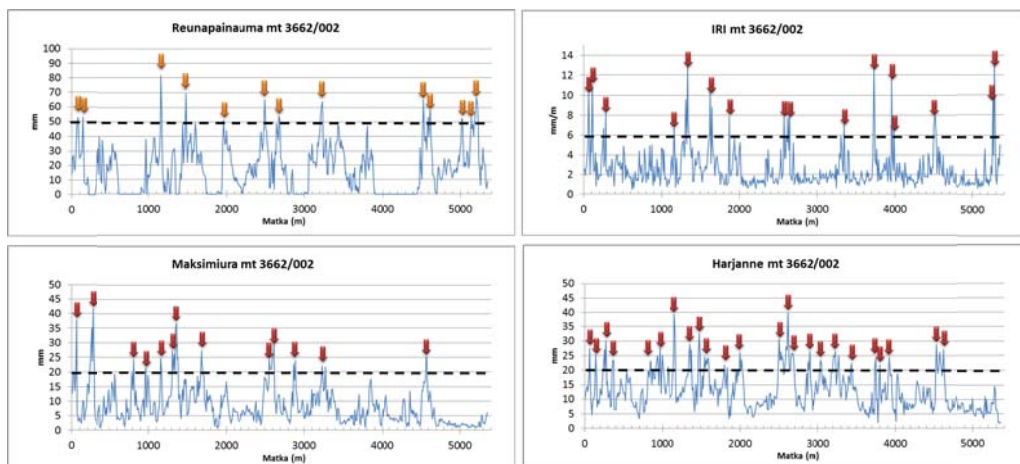
Kuva 85. Maantien 3662/002 toimenpidehistoria.

Kymmenen metrin välein tulostettu korjaustarve vaihteli oheisen kuvan mukaan välillä 0–10. Paaluväli 2200–3000 on yhtäjaksoisesti korjaustarpeessa. Muulla osalla korjaustarvetta oli vaihtelevasti muutaman kymmenen metrin pätkissä. Korjaustarpeen käyttämistä validointikriteerinä haittasi se, että se on inventoitu koko ajoradalta erittelemättä kaistoja. Siksi ei voitu olla varmoja siitä kumman suunnan kaistalle se pääasiassa kohdistui. Oli oletettava, että se kohdistui molempiin suuntiin. Siksi korjaustarve oli validointikriteerinä oikeastaan kyseenalainen ja toi epävarmuutta mallin toimivuuden testaamiseen.



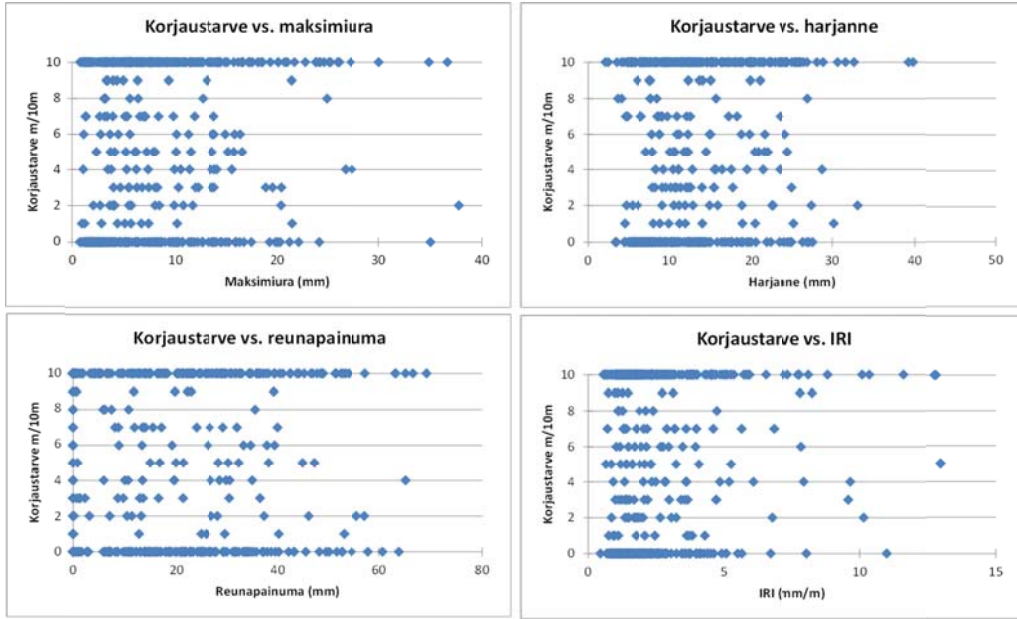
Kuva 86. Korjaustarve maantiellä 3662 10m välein (vasemmalla tieosa 1 ja oikealla tieosa 2).

Kun tarkasteltiin muita kuntomuuttujia (ura, harjanne, reunapainaus ja IRI) tieosalla 2, niin nähtiin, että niiden perusteella paaluväli 2200–3000 ei poikennut mitenkään muusta tieosasta. Jokaisen kuntomuuttujan suhteen oli kymmenmetrisiä, joilla muutuja sai suuria arvoja, mutta niitä oli läpi koko tieosan. Maksimiurassa, harjanteessa ja reunapainauksessa oli kohtia, joilla suuret arvot osuvat päällekkäin. Tällaisia kohtia ovat ko. jaksolla paaluvälit 2500–2700 ja 2800–2900. IRI-arvot olivat suuria kohdassa 2500–2700.

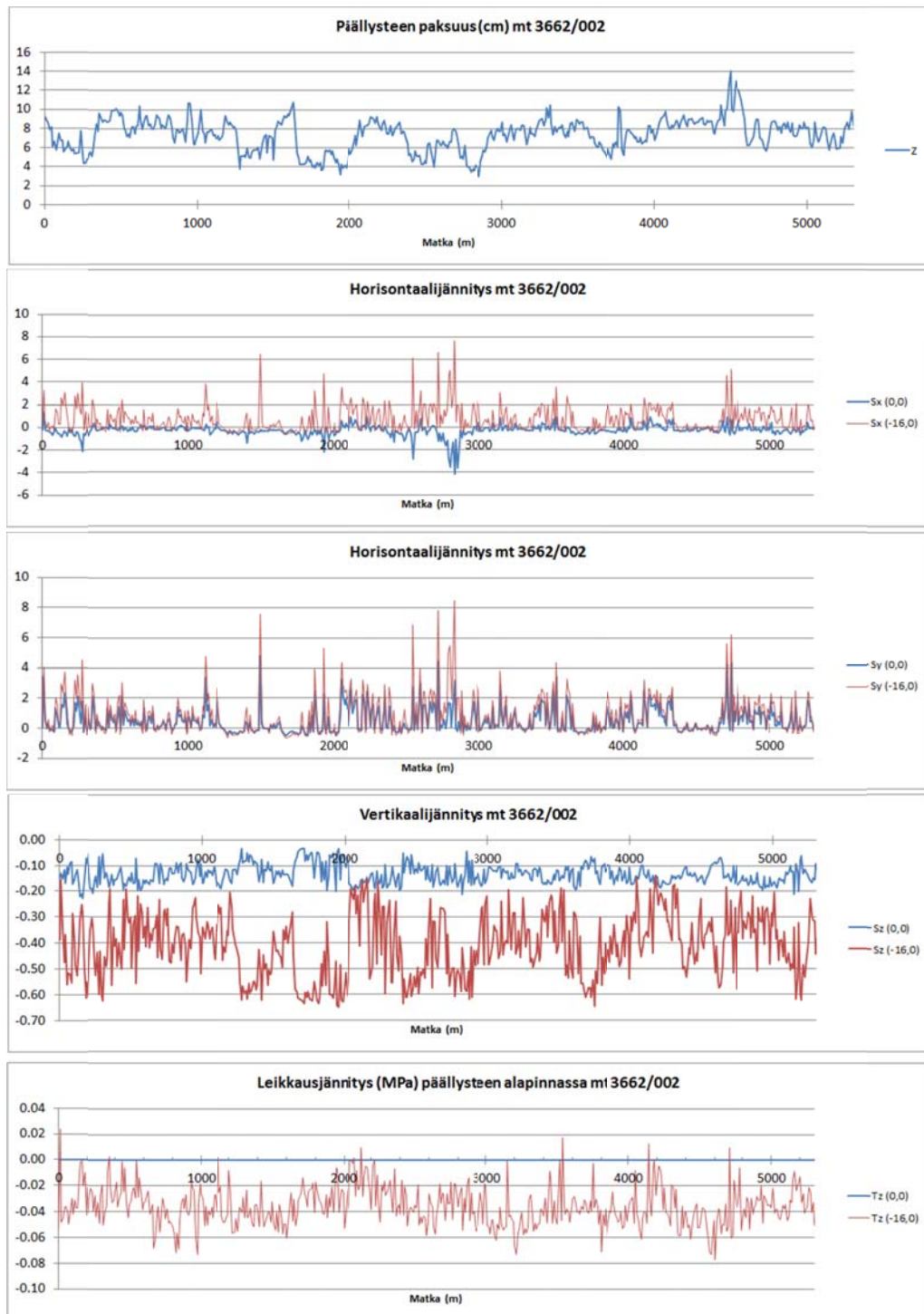


Kuva 87. Maantien mt 3662/002 reunapainaus, iri, maksimiura ja harjanne 1m välein vuonna 2013.

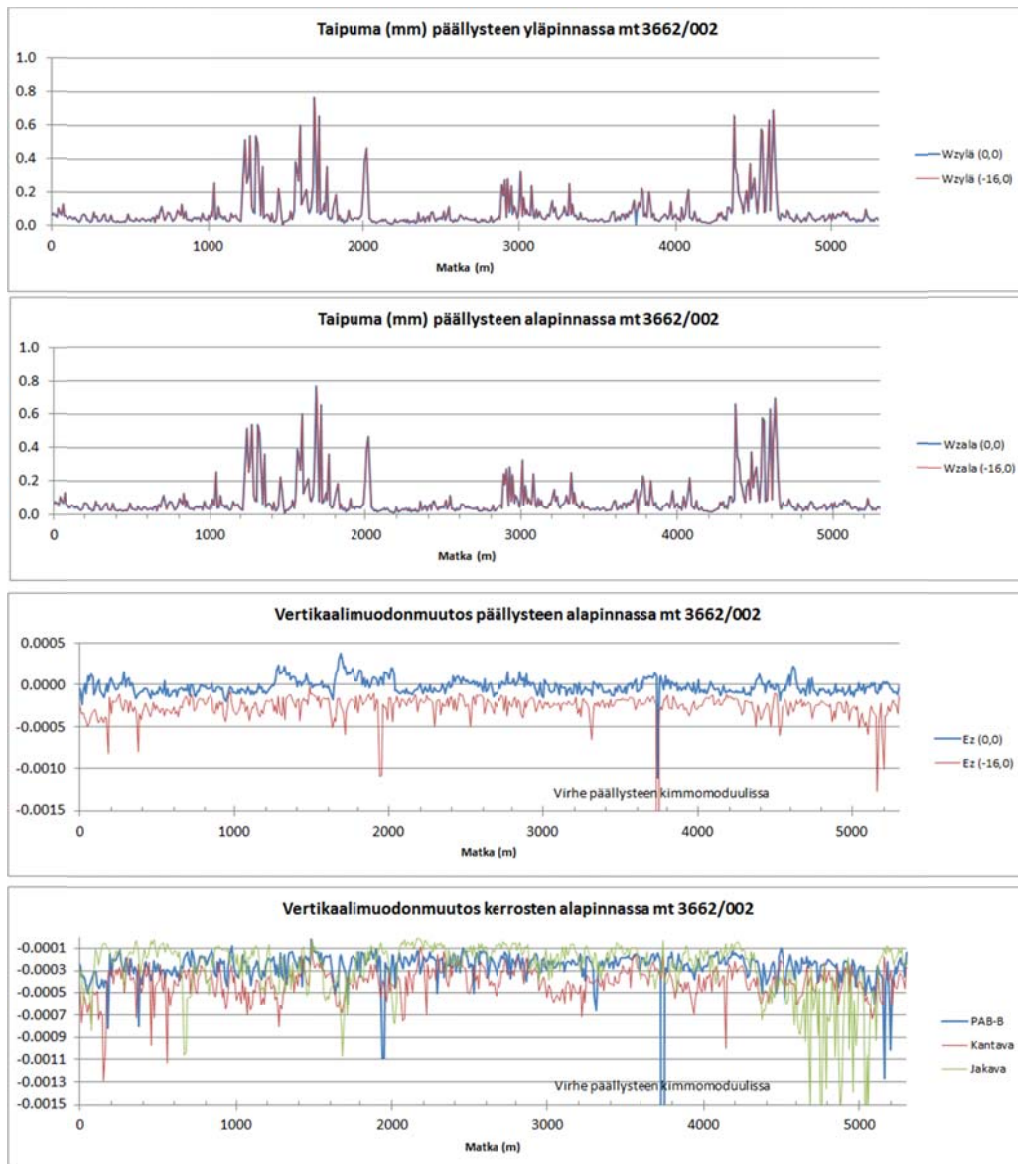
Kun vertailtiin korjaustarvetta muihin kuntomuuttujiin, niin voitiin todeta, etteivät ne juuri korreloineet keskenään. Korjaustarve oli tieto koko päällysteen poikkileikkauksesta ja muu kuntotieto oli suunta-/kaistakohtaista.



Kuva 88. Korjaustarve vs. ura, harjanne, reunapainuma ja epätasaisuus maantieteellällä 3662/002 10m arvoina.



Kuva 89. Monikerrosohjelman tuottamia päällysteen alapintaan kohdistuvia vasteita mt 3662 tieosalla 2 syksyllä 2013.



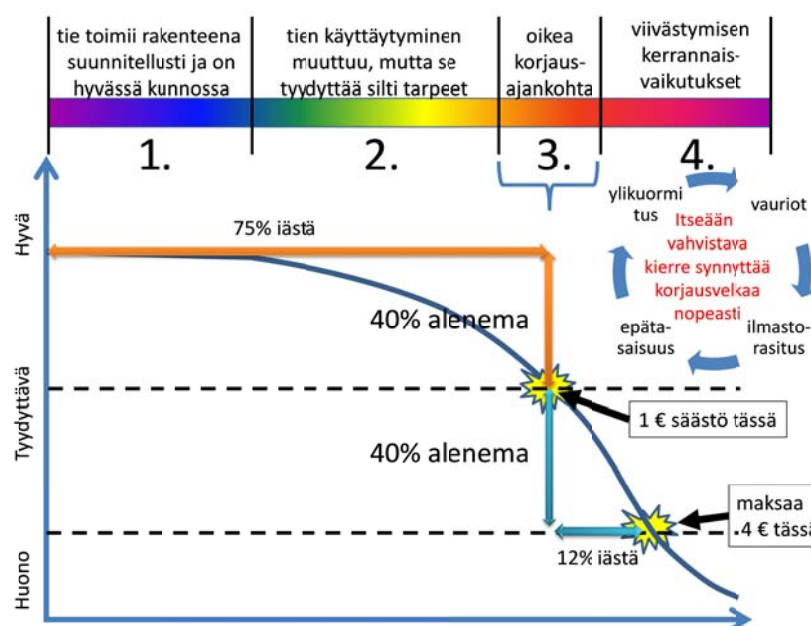
Kuva 90. Monikerrosohjelman tuottamia vasteita mt 3662 tieosalla 2 syksyllä 2013.

5.4 Rakenteellisen kunnon tunnusluku

5.4.1 Yleisperiaate

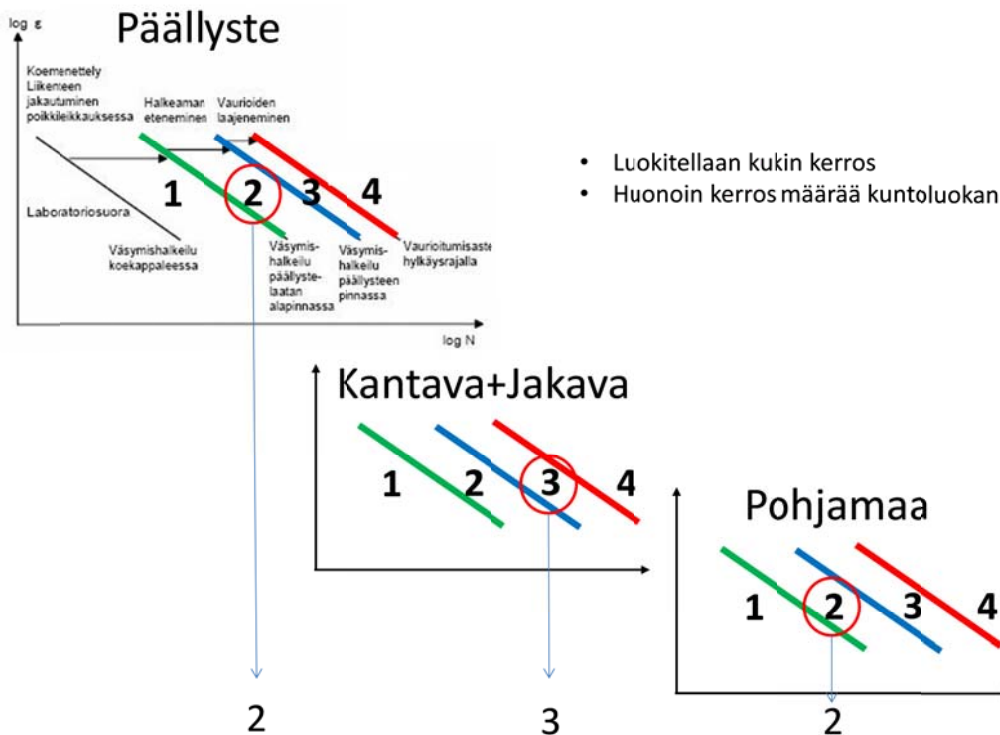
Rakenteellisen kunnon tunnusluvun keskeisin ominaisuus on ennakoida tien tuleva kehitys ja toisaalta osoittaa jos sen kunnonhallinnassa on selvästi myöhästytt. Sen tulee tuottaa jotain sellaista lisäinformaatiota, mitä pintakuntotieto ei sellaisenaan sisällä. Tavoitetta havainnollistetaan seuraavalla kuvalla, joka kuvaa tien elinkaarta rakenteen kunnon kannalta. Kuvassa on esitetty neliportainen luokitus, jonka luokat kuvaavat tien rakenteellista tilaa. Luokkia luonnehditaan seuraavasti:

1. Alussa tie on hyväkuntoinen ja palvelee käyttäjiä hyvin. Tien rakenne toimii niin kuin se on suunniteltu toimivan. Tien palvelutaso on hyvä eikä tien rakenne kiihdytä palvelutason heikkenemistä.
2. Iän ja kuormituksen kertyessä tien rakenteelliseen käyttäytymiseen alkaa tulla muutoksia. Tie alkaa toimia rakenteena osittain puutteellisesti. Tilanne ei ole tämän vaiheen alussa visuaalisesti havaittavissa, mutta se kehittyy tiettyyn suuntaan ja vaiheen lopussa merkkejä tilan heikkenemisestä alkaa esiintyä. Tämä vaihe on tilan seurannan kannalta tärkein vaihe, koska sen perusteella tulee pystyä ennustamaan kehitystä.
3. Kolmas vaihe kuvaa tien elinkaaressa sitä aikaikkunaa, jolloin sen parantaminen kannattaisi tehdä. Taloudellisissa laskelmissa tämä esitetään usein optimiajanakohtana, mutta laskentatarkkuuden takia käytännössä ei voida puhua tietyistä pisteistä vaan vaihteluvälistä tai aikaikkunasta. Jäljellä oleva käyttöikä lähestyy nolaa ja tien parantaminen olisi ajankohtaista.
4. Neljäs vaihe kuvaa tilaa, jossa tien rakenne ja palvelutaso heikkenevät kiihtyvällä vauhdilla, koska tilan ja kuormitusten välisestä vuorovaikutuksesta on syntynyt itseään vahvistava kierre. Tässä vaiheessa tien parantaminen on myöhässä ja sen kustannukset kasvavat kiihtyvällä vauhdilla. Jäljellä oleva kestoikä on negatiivinen.



Kuva 91. Periaatekuva tien palvelutason heikkenemisestä ja korjausvelan syntymisestä (modifioitu lähteestä 17).

Kuvassa 92 on esitetty periaate, jonka mukaan kunkin rakennekerroksen toimivuutta tarkastellaan määrittämällä missä elinkaaren vaiheessa (elinkaaren luokka) se on. Huonoimmassa kunnossa olevan kerroksen kuntoluokka määräisi koko tierakenteen kuntoluokan.

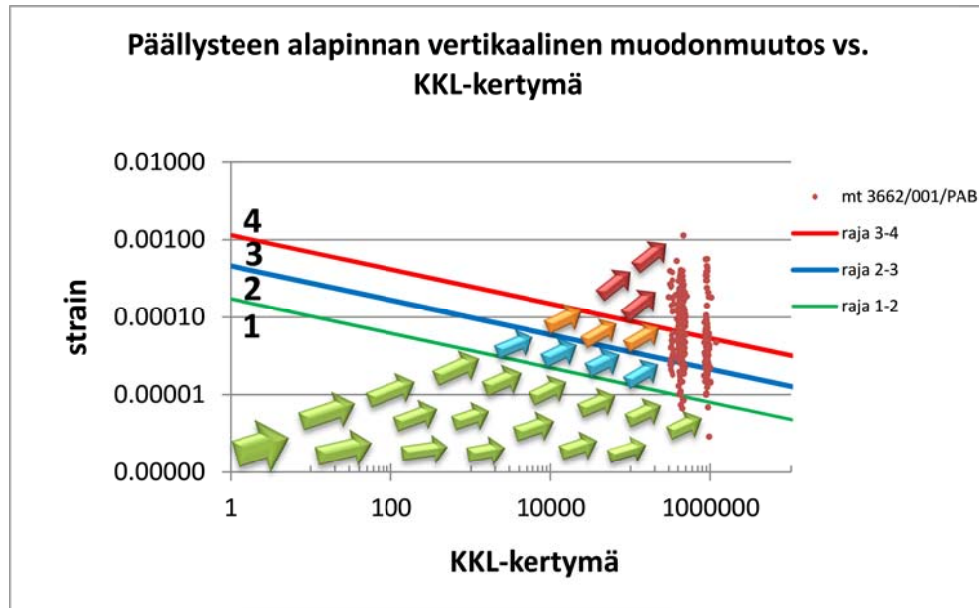


Kuva 92. Tierakenteen elinkaaren kerroksittainen kuntotilan luokittelu kullekin tarkasteltavalle jaksolle (=10m). Kuvan tapauksessa tierakenteen kuntoluokka on 3 ja ongelmakohta on sitomattomissa kerroksissa.

5.4.2 Mt 3662 tieosa 1

Kuvassa on esitetty esimerkki mt 3662 tieosan 1 päällysteen rakenteellisen kuntoluokan määräytymisestä. Kuntoluokkien määräytymisen väsymissuorat perustuvat asfalttipäällysteen väsymissuoraan, jota edustaa punainen raja-arvokäyrä sekä siitä johdettuihin (kuvitteellisiin) muiden kuntoluokkien raja-arvokäyriin. Pisteet ovat tieosalla olevia kymmenmetrisiä. Niiden strain-KKL-pisteparit on tuotettu kevään tilannetta kuvaavalla vastelaskennalla. Todellisuudessa vastelaskennassa olisi tullut tietenkin ottaa huomioon kaikki vuodenajat, mutta tässä tehtiin yksinkertaisuuden vuoksi näin.

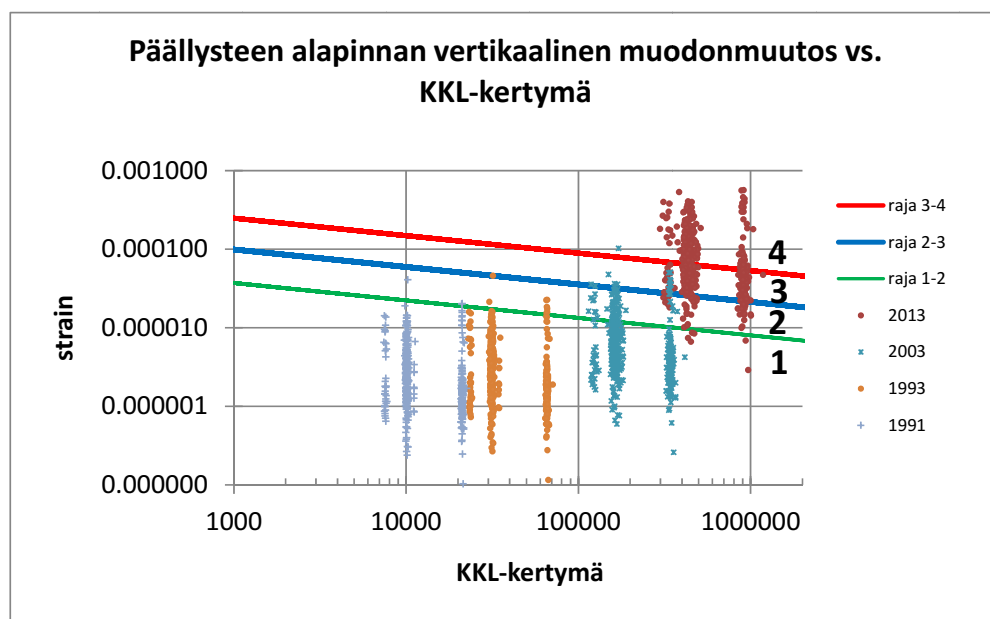
Luokittelemalla kohteen pisteet päällysteen kuntoluokkiin saatiin tulokseksi, että kyseinen tieosa jakaantui kuntoluokkiin 1, 2, 3 ja 4 suhteessa 1 %, 10 %, 47 % ja 42 %. Ts. kohteella oli 1 % kuntoluokassa 1, jolloin päällyste oli täysin ehjää, 10 % kuntoluokassa 2, jolla oli havaittavia vaurioita vähän ja yhteensä 89 % sellaista osuutta, jolla tie tuli parantaa. On kuitenkin muistettava, että tässä analysoitiin vain päällystekerros ja muiden kerrosten vastaavasta analyysistä tulisi omat kuntoluokkansa kullekin. Lopullinen rakenteellisen kunnan kuntoluokkajakauma olisi yhdistelmä niistä kaikista.



Kuva 93. Mt 3662 tieosan 1 päällysteen rakenteellinen kuntoluokka (10m) kevään tilanteessa. Asfalttipäällysteen väsymissuora = punainen viiva. Sininen ja vihreä viiva on tehty sen kanssa samansuuntaiseksi ja ne ovat vain periaatteellisia, eivätkä minkään tutkimuksen tuloksia.

Kuvassa 94 on esitetty maantien 3662 tieosan 1 päällysteen ekstrapoloitu väsyminen tieosalle tehdyn edellisen teknisen toimenpiteen jälkeen. Vuoden 2013 pisteet ovat nyt saatujen laskelmien strain-KKL tuloksia, joiden perusteella sekä strainit että kuormituskertymä on laskettu taaksepäin sillä oletuksella, että:

- kuormitus alkaa nollost
- strainit alkavat nollost
- dynaaminen osa kuormituksesta kasvaa vasta loppujaksolla
- liikenne on kasvanut 3 %/v



Kuva 94. Mt 3662 tieosan 1 päällysteen rakenteellisen kuntoluokan laskennallinen kehittyminen tien edellisestä teknisestä toimenpiteestä nykyhetkeen (2013) (10m) kevään tilanteessa.

Liikennesäätös oli vuonna 1991 noin 10000 standardiakselia ja se on kasvanut noin 20 v aikana lähes miljoonaan standardiakseliin. Päällysteen alapinnan pystysuuntainen muodonmuutos on kehittynyt hyvin pienistä alkuarvoista jopa 800 mikrostraiiniin (=0.0008). Väsymisen muodonmuutosten laskenta perustuu vain kevään tilanteeseen, mutta sen perusteella päällysteen strain-KKL-tila osuu väsymissuoralle sen molemmin puolin v. 2013. Kun verrataan saatua tilannetta päällystevauriokartoituksen tietoihin, voidaan todeta, että ne kertovat suurin piirtein samasta asiasta, eli että osa tieosan kymmenmetrisistä on kestoikänsä lopussa ja osa jo lähellä tulossa kohti sitä. Jos tarkastelu laajennettaisiin kaikkia rakennekerroksia koskeviksi, olisi tulos se, että tarkastettava tiejakso olisi lähes kokonaan kestoikänsä päässä.

Vaikka tieosan päällysteen väsymiskehitys onkin puoliksi laskennallinen, siitä nähdään periaate, jolla yhden tieosan päällyste väsyä tien ikääntyessä ja liikennekuormituksen kasvaessa. Edelleen siitä nähdään, että päällystekerroksen rakenteellinen kunto on luokiteltavissa kuntoluokkiin joko kuvassa esitettyjen väsymisasteiden perusteella tai sitten lopullisen kestoikänsä perusteella. Väsymissuorien toimivuutta eri kerroksilla tulisi kuitenkin tutkia enemmän.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tien rakenteellisen kunnon tunnusluvun problematiikkaa lähestyttiin mekanistis-empiirisestä näkökulmasta. Olemassa olevan tien mitattua kuntoa käytettiin hyödyksi tien sen hetkisen toimivuuden arvioimiseen. Olemassa olevien perinteisten kunto-tietojen lisäksi oli käytettävissä tierakenteiden kerrospaksuustieto ja jatkuva taipumatieto. Kerrospaksuustieto tuotettiin maatutkan tuloksista. Taipumatieto tuotettiin TSD-laitteella. Teitä käsiteltiin yhden tieosan pituisina osina yksi kaista kerrallaan. Rakenteellisen kunnon tunnusluvun tuottamisessa käytettiin kolmea eri analyysiä, jotka olivat kuormitusanalyysi, rakenneanalyysi sekä vastelaskenta ja sen yhteydessä tehtävä kestävyysanalyysi.

Ensiksi tuotettiin dynaaminen kuormitus simuloimalla kaksiakselisen kuorma-auton 50 kN:n painoisen taka-pyörän pyöräpainoa. Simuloinnissa käytettiin tien palvelutasomittauksista saatua pituussuuntaista profiilitietoa kummastakin ajourasta 10 cm intervallilla. Ajoneuvomallina oli 18 tonnin painoinen 7 vapausasteen perävaunun kuorma-automalli. Simuloinnissa käytettiin kullekin kohteelle tien tyypillistä raskaiden ajoneuvojen nopeusrajoitusta. Pyöräpainot ja muut simuloinnista saatavat tulokset tuotettiin 1 m välein ja ne keskiarvoistettiin myöhemmin 10 m väleille. Simuloinnissa käytetyn ajoneuvon taka-akseli oli painoltaan samanlainen kuin taipumanmittausauton kuormittava akseli. Simuloinnin tarkoituksena oli tuottaa tien nykyistä pituusprofiilia vastaava dynaamisesti vaihtuva kuormitus. Siitä käytettiin nimitystä kuormitusanalyysi. Kuormitusanalyysin mukaan tien oikeaa ajouraa kuormittaa pyöräpaino, joka ei ole vakio (50 kN), vaan siihen vaikuttaa tien sivukaltevuus ja epätasaisuus. Pyöräpaino vaihteli tyypillisesti välillä 40–60 kN, mutta vaihtelu oli hyvin epätasaisilla teillä jopa 30–70 kN.

Dynaaminen pyöräpaino toimi yhtenä lähtötietona tien rakenneanalyysille, jossa tuotettiin takaisinlaskennalla tien rakennekerroksille kimmomoduulit käyttäen tien jatkuvaa taipumatietoa ja kerrospaksuuksia. Laskentaväli oli 10 m. Kimmomoduulit kuvasivat syksyn ajankohtaa, koska taipumamittaukset tehtiin syksyllä (2013). Yhtenä takaisinlaskennan lähtötietona oli myös tien pinnan lämpötila, joka vaikutti päällystekerroksen Poisson-vakion arvoon ns. Tosticarellin määrittämän kaavan mukaan. Kimmomoduulit tuotettiin lisäksi kolmelle muulle vuodenajalle kuvaamaan tien olosuhteita eri vuoden aikoina. Rakenneanalyysissä tarkasteltiin myös TSD:n ja pudotuspainolaitteen välisiä eroja ja mittaustarkkuuksia. Lisäksi tarkasteltiin takaisinlaskennan laskentatarkkuutta vertaamalla eri kerroilla saatuja kimmomoduuleja keskenään.

Vastelaskenta tehtiin käyttäen rakenneanalyysissä saatuja kerrosten kimmomoduuleja ja kuormitusanalyysissä saatua dynaamista pyöräpainoa. Vasteet laskettiin kymmenen metrin jaksoille kahdessa eri kohdassa neljälle eri vuodenajalle kunkin rakennekerroksen alapinnassa. Suurimmat vasteet saatiin kuormittavan paripyörän toisen pyörän alapuolelta yleensä kevätkauden tilanteessa. Kriittisenä vasteena tarkasteltiin alapinnan pystysuuntaista muodonmuutosta. Muodonmuutosta käytettiin väsymistarkastelussa vertaamalla sitä väsymissuoriin ja määrittämällä sen perusteella kerrosten kuormitusreservi.

Rakenteellisen kunnon tunnuslukuna on tierakenteen kestävyys neljään luokkaan luokiteltuna. Kunkin rakennekerroksen tilaa ja kestävyyttä arvioidaan erikseen. Kerroksille laskettava kestävyys tuottaa tierakenteen lopullisen kestävyystiedon. Luokitusperusteeksi ehdotetaan asetettavan kullekin kerrokselle ominaiset väsymissuorat, jotka kalibroitaisiin kuvaamaan kunkin rakenteen toimivuutta. Väsymissuorat tulisi kehittää vastaamaan kerroksissa tapahtuvia väsymismekanismeja.

Taulukko 18. Rakenteellisen kunnan tunnusluvun laskentaan ja käyttöön liittyviä havaintoja.

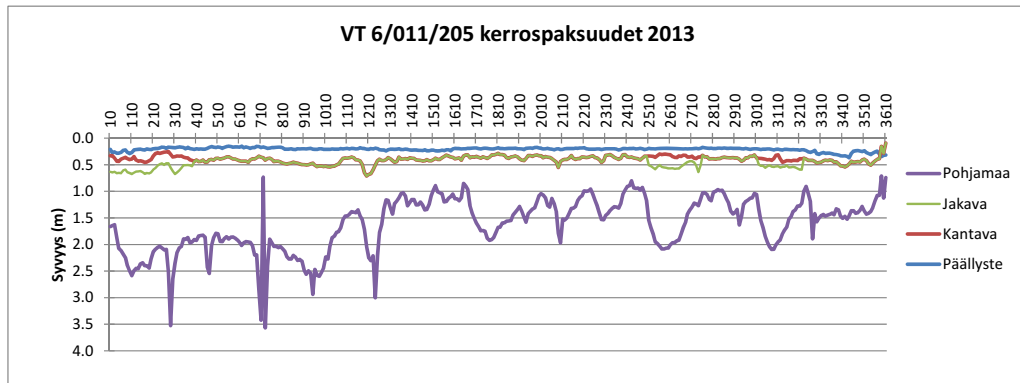
Osa	Toimivuus	Puutteet	Kustannukset
Kuormien simulointi			
Tien 3D-pintamalli	Pintamalli on olemassa kaikista Destian tekemistä PT-mittauksista.	Pintamalli on otettavissa käyttöön ilman erityisiä lisätoimenpiteitä.	Ei aiheuta lisäkustannuksia.
Ajoneuvosimulointi	Pintamalla käytävä simulointi toimii tieosatasolla ja tuottaa tunnuslukuja metrin välein.	Simuloinnissa käytettävä ajoneuvotyypä on sovittu ja sen simulointiparametrit on valittu. Simuloinnin aloitustapaa on muutettu siten, ettei vasteisiin tule epäjatkuuskohtia tieosien alussa.	Tarkasteltavien teiden simuloinnit maksavat jonkun verran, mutta eivät näytele kokonaisuudessa kovin merkittävää osaa.
Rakennekerrosten kimmomoduulien laskenta			
Kerrospaksuustieto	Kerrospaksuuksien mittaustekniikka ja mittausten toimittaja on olemassa.	Kerrospaksuuksia ei ole verkkotasolla mitattu eikä niitä ole terekisterissä. Ne kuitenkin tarvitaan.	Kerrospaksuuksien hankkiminen on merkittävä lisäkustannus.
Taipumatieto	Taipumatietoa on mitattu vain pistekohtaisesti, mutta verkkotasolla pisteväli on ollut harva eikä mittauksia ole päivitetty enää viiteen vuoteen.	Jatkuva taipumatieto puuttuu. Se tarvitaan.	Jatkuvan taipumatiedon hankkiminen on merkittäviä lisäkustannus.
Kimmoduulien laskenta	Kimmomoduuleja pystytään laskemaan takaisinlaskentaohjelmilla ja on olemassa sovelluksia, joilla laskenta toimii eräajona.	Laskentaohjelmistoa voisi olla hyvä kehittää jonkun verran. Kerrosten moduulien keskinäisiä suhteita pitäisi laskennan yhteydessä rajoittaa.	Ei aiheuta merkittäviä lisäkustannuksia.
Vuodenaikavaihtelun hallinta	Teiden vuodenaikavaihtelusta tiedetään aiempien mittausten perusteella jonkun verran. Kevään ja syksyn tilanne olisi kimmomoduulien kannalta tärkein.	Vuodenaikavaihtelun selvittämisessä on ollut suurimpana puutteena hidas pistekohtainen mittaustekniikka. Mittauksia ei ole yleensä tehty vuoden eri ajankohdina. Tieosakohtaista vuodenaikavaihtelutietoa ei ole.	Aiheuttaa jonkin verran lisäkustannuksia, mutta liittyy taipumamittauksiin ja on ratkaistavissa samalla jos jatkuva mittaustekniikka otetaan käyttöön.
Vastelaskenta			
Laskentaohjelmisto	Vasteiden laskentaan on olemassa ohjelmistoja. STRESS-ohjelmisto toimii eräajona ja tuottaa vastelaskelmia nopeasti.	Kokemusta vasteiden laskentaohjelmistoista olisi syytä lisätä. Laskentaohjelmia tulisi kehittää siten, että niissä huomioitaisiin poikkisuunnan voimat ja jäykkyyssmoduulit.	Aiheuttaa pieniä lisäkustannuksia tiedon toimittajalle.
Väsymiskriteerit	Eri kerrosmateriaaleille on olemassa mitoituskohtaiset väsymissuorat.	Väsymissuorien toimivuutta tulisi tarkastella enemmän. Toden näköisesti niitä tulisi kehittää lisää.	Aiheuttaa lisäkustannuksia.
Kestoiän laskenta	Jäljellä olevan kestoiän/kestävyyden laskenta on periaatteellisella tasolla määritetty. Siihen liittyy kuitenkin suhteellisen paljon epävarmuutta. Sen validointi on toistaiseksi puutteellinen.	Kestävyyden määrittämisestä tulisi testata ja kehittää. Kuormituskertalukutiedon luotettavuutta tulisi parantaa. Tien toimenpidehistoria pitäisi olla luotettavampaa. Validointikriteerin tulisi olla luotettavampi mielellään mitattu tunnusluku.	Aiheuttaa lisäkustannuksia.
Tunnusluvun käyttöönotto			
	Tunnusluvun pääperiaatteita selvitetty. Siihen liittyy kuitenkin puutteita ja epävarmuutta.	Tunnusluvun määrittämisestä ja käytettävyydestä tulisi hakea tuntumaa askeleittain useisiin yksityiskohtiin liittyvien tutkimusten ja selvitysten kautta.	Aiheuttaa lisäkustannuksia.

Viitteet

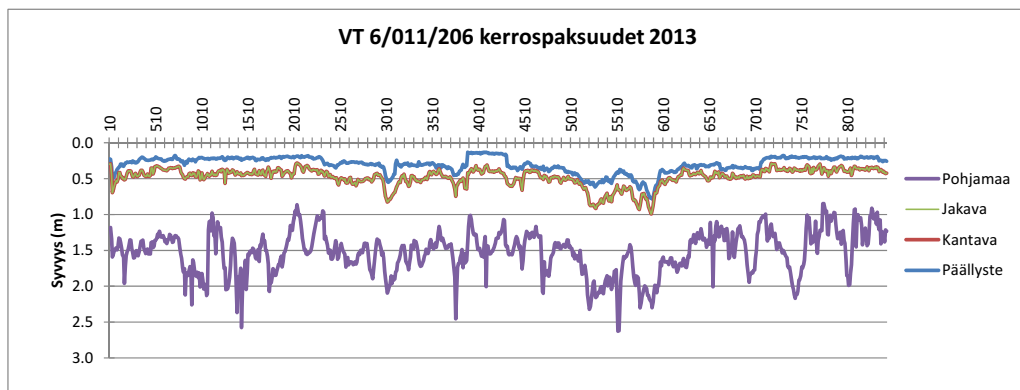
1. Maatutkakuvat. Roadconsulting Oy. Marko Niko. 2013.
2. *Tierakenteen suunnittelu*. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Tiehallinto, Helsinki 2004.
3. Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D. *Tien päällysrakenteen mitoituksessa käytettävät moduulit ja kestävyysmallit*. Tiehallinto, tie- ja geotekniikka 27.1.2005.
4. Carl L. Monismith. *Evolution of Long-Lasting Asphalt Pavement Design. Methodology: A Perspective*. International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements. June 7-9 2004. Auburn University. Alabama, USA.
5. Per Ullidtz. *Analytical Tools for Design of Flexible Pavements*. International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements. June 7-9 2004. Auburn University. Alabama, USA.
6. Huang Y.H. *Pavement Analysis and Design*. Pearson Prentice Hall, NJ 2004.
7. Daba Shabara Gedafa. *Estimation of Remaining Service Life of Flexible Pavements from Surface*.
8. http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2012-22_tien_haitallisten_web.pdf
9. Jacek Sudyka, Przemyslaw Harasim: *Traffic speed deflection measurements on Finish roads*. Contract no. 2493/065/2013 on 16.07.2013, subject symbol D-357. Road and Bridge Research Institute (RBRI). Pavement Diagnostic Division. November 2013. Warsaw, Poland.
10. Rasmussen, S., Aagaard, L., Baltzer, S., & Krarup, J. (2008). *A comparison of two years of network level measurements with the Traffic Speed Deflectometer*. Materiały z konferencji Transport Research Arena Europe. Ljubljana, Slovenija.
11. Shadi B.Ananin, Samer M. Madanat. *Highway maintenance marginal costs: What if the fourth power assumption is not valid?* Institute of Transportation Studies, 109 McLaughlin Hall, University of California, Berkeley, CA94720-1720, USA. Transport Policy 17(2010)486–495.
12. Antti Korpilahti, Olavi H. Koskinen. *Puutavaran autokuljetus tehokkaammaksi*.
13. Virtala Pertti. *Mitä kertoo maanteiden pulssimittari?* Väylät ja Liikenne 2012. Turku 29.-30.8.2012. <http://www.tieyhdistys.fi/binary/file/-/id/50/fid/399/>
14. Lehtonen, K. 2009. *Tiehallinnon mitoitusmenetelmät: Odemark ja APAS ja niihin liittyvät ongelmat*. Aalto-yliopiston insinööri-tieteiden korkeakoulu: Tien ja kadun rakenteet ja rakentaminen -kurssin aineisto.
15. Juha Kersalo, Pentti Pirinen. *Suomen maakuntien ilmasto*. Ilmatieteen laitos. 2009.
16. Rainer Laaksonen, Harri Kivikoski, Markku Pienimäki, Leena Korkiala-Tanttu ja Jouko Törnqvist. *Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa*. Deformaation laskentatyökalun kehittäminen. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004.
17. Witczak, M. (1978). *Determination of Flexible Pavement Life*, Report No. FHWA/MD/R-79/1, Federal Highway Administration, Washington, DC.
18. Harri Spoof, Sami Petäjä. *Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta*. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo 2000.
19. Verkkotason taipumamittausten tarveselvitys. VOH-tutkimusohjelma. Työraportti. Tiehallinto. 2005.
20. Jouko Belt, Veli Pekka Lämsä, Lauri Liimatta ja Esko Ehrola. *Kevytpäällysteiden vauriomallien ja mitoitusmenetelmien kehittämisen perusteet*. Tielaitoksen selvityksiä 18/2000. Tielaitos 2000.

21. Jouko Belt, Pauli Kolisoja, Ville Alatyppö, Jarkko Valtonen. *Tierakenteen rappeutuminen ja kunnon ennustaminen*. Oulun yliopisto. 2006.
22. Martti Perälä, Aarno Valkeisenmäki, Lasse Weckström & Olli Penttinen. S 14 Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito. Yhteenvedo. Tiehallinnon selvityksiä 11/2006.
23. Harri Spoof, Sami Petäjä. *Pudotuspainomittaus. TPPT-menetelmäkuvaus*. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo 2000.
24. <http://www.greenwood.dk/tsdres.php>

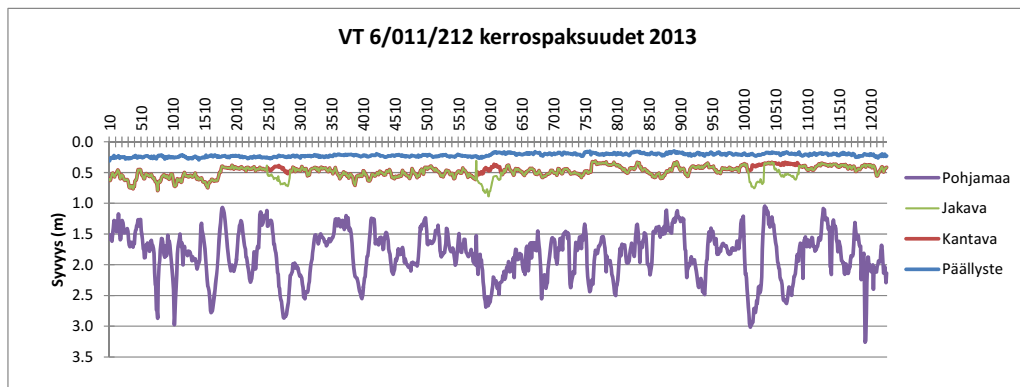
Kerrosspaksuudet/syvyudet



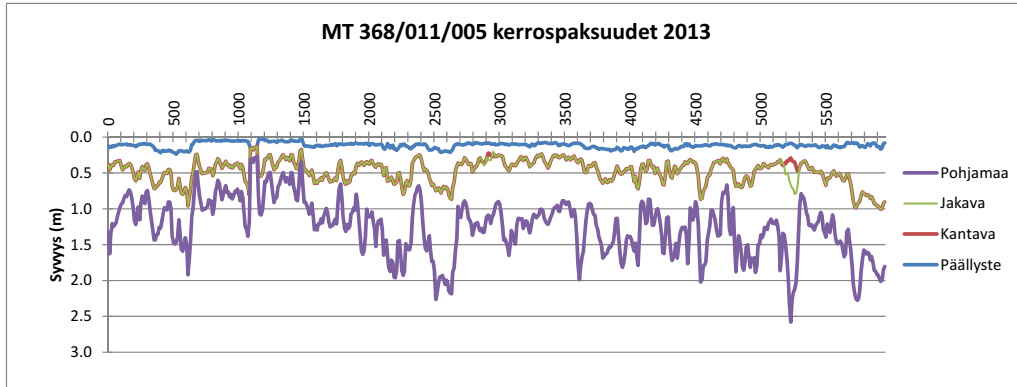
Kuva 1.1. Kerrossyvyudet valtatiellä 6 tieosalla 205 suuntaan 1.



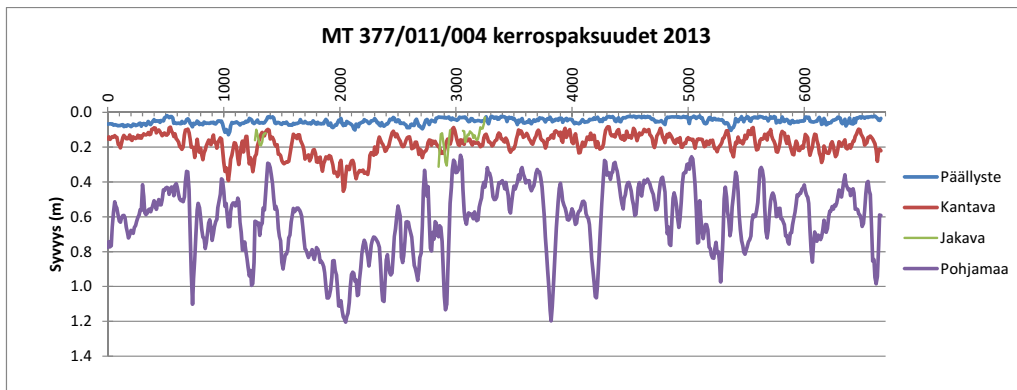
Kuva 1.2. Kerrossyvyudet valtatiellä 6 tieosalla 206 suuntaan 1.



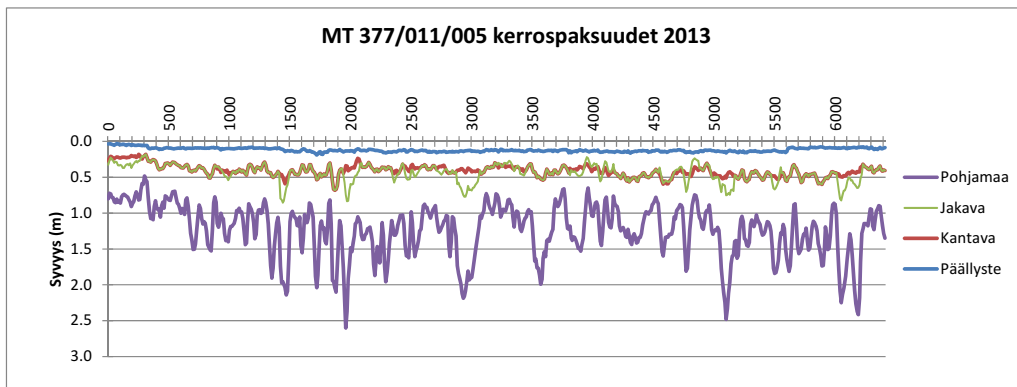
Kuva 1.3. Kerrossyvyudet valtatiellä 6 tieosalla 212 suuntaan 1.



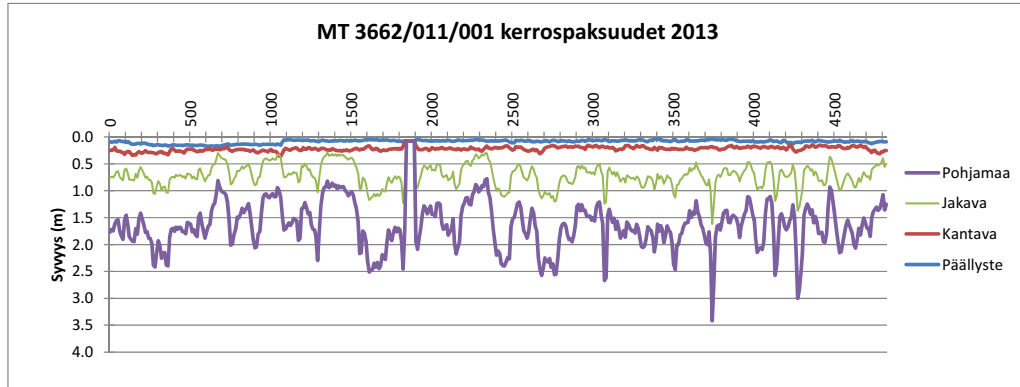
Kuva 1.4. Kerrossyvydet maantiellä 368 tieosalla 5 suuntaan 1.



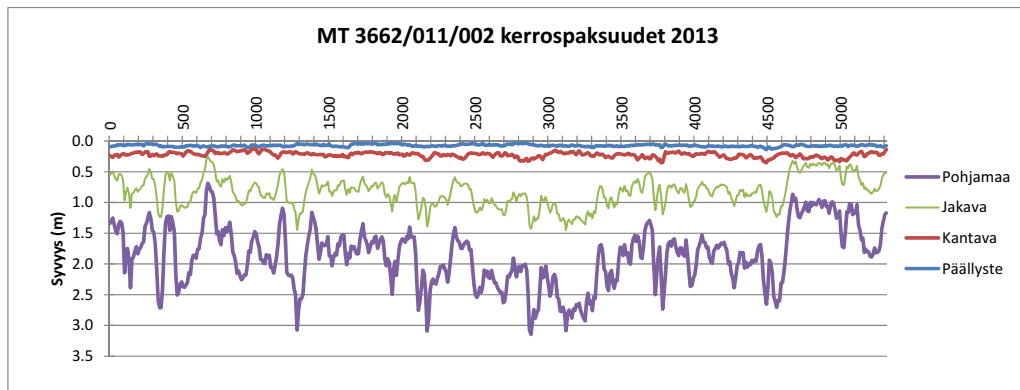
Kuva 1.5. Kerrossyvydet maantiellä 377 tieosalla 4 suuntaan 1.



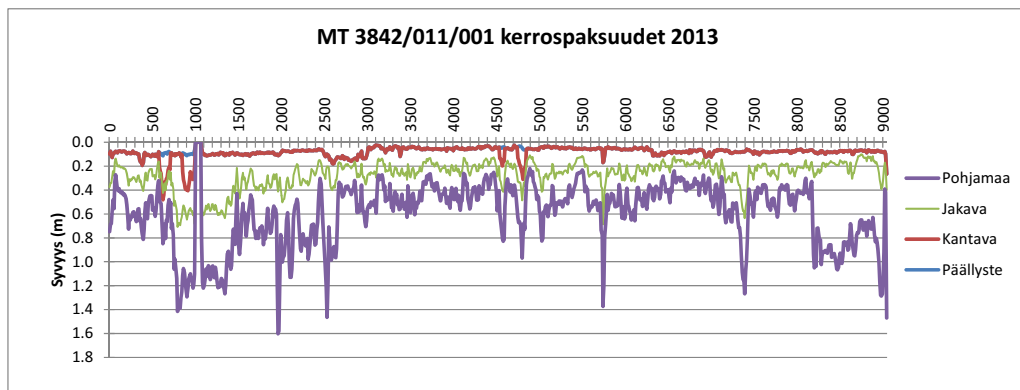
Kuva 1.6. Kerrossyvydet maantiellä 377 tieosalla 5 suuntaan 1.



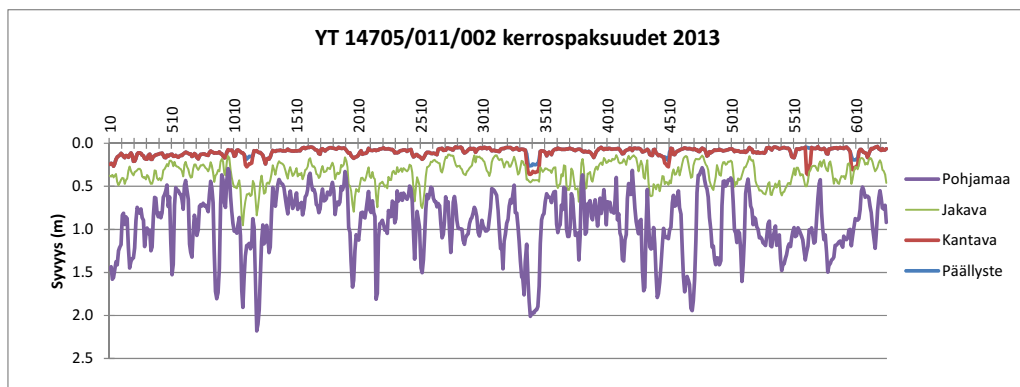
Kuva 1.7. Kerrossyvyudet maantiellä 3662 tieosalla 1 suuntaan 1.



Kuva 1.8. Kerrossyvyudet maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.

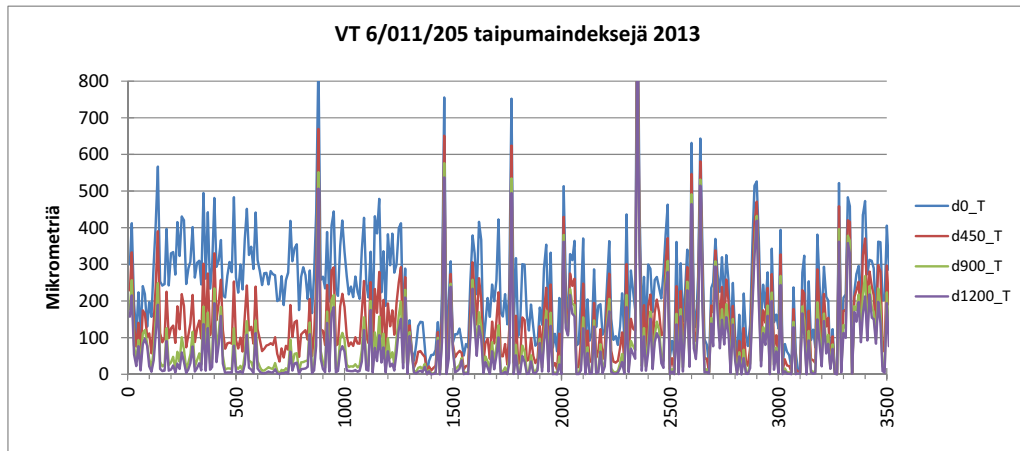


Kuva 1.9. Kerrossyvyudet maantiellä 3842 tieosalla 1 suuntaan 1.

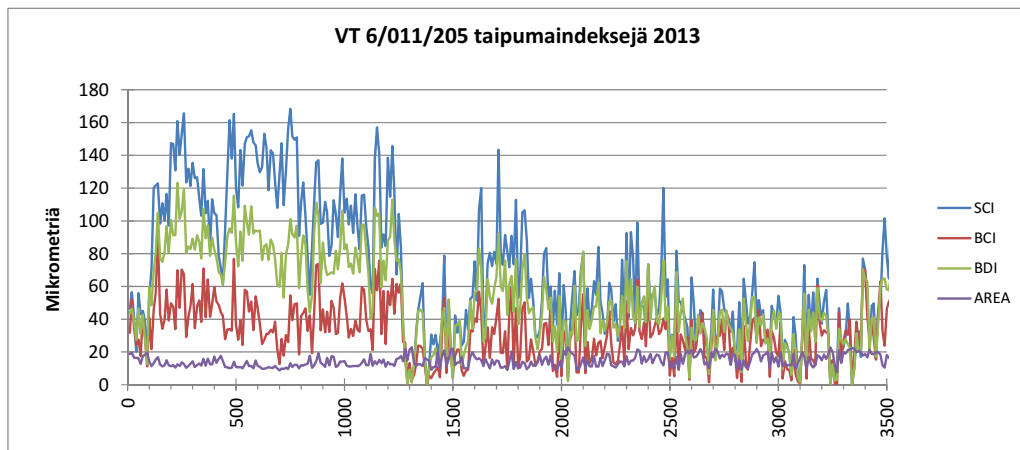


Kuva 1.10. Kerrossyvyudet yhdystiellä 14705 tieosalla 2 suuntaan 1.

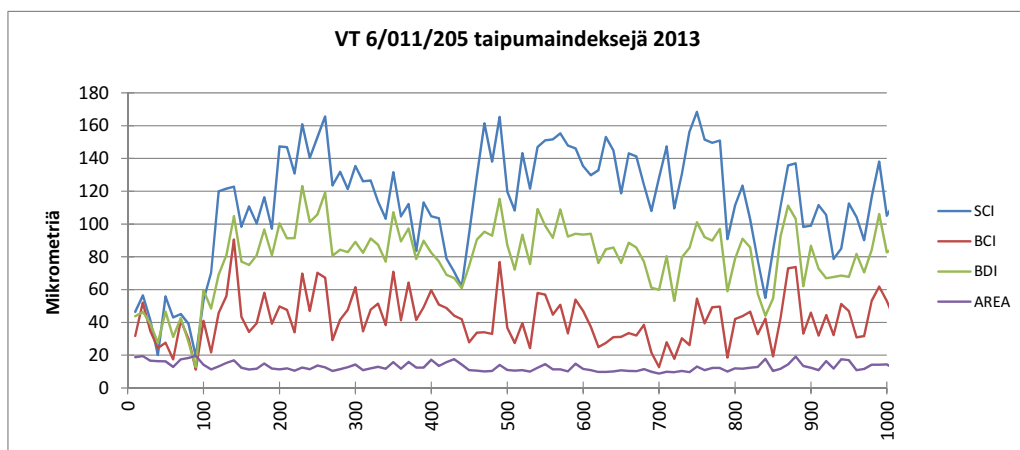
Taipumat ja taipumaindeksit



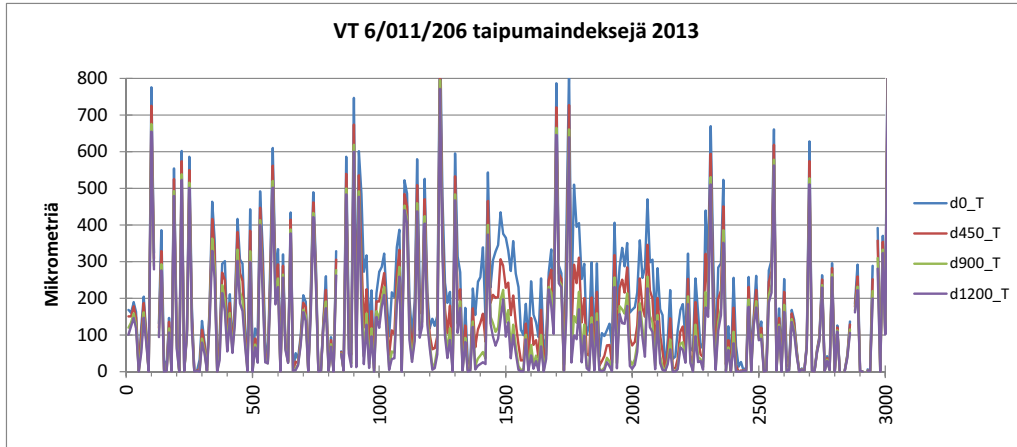
Kuva 2.1. Taipumaprofiileja valtatiellä 6 tieosalla 205 suuntaan 1 vuonna 2013.



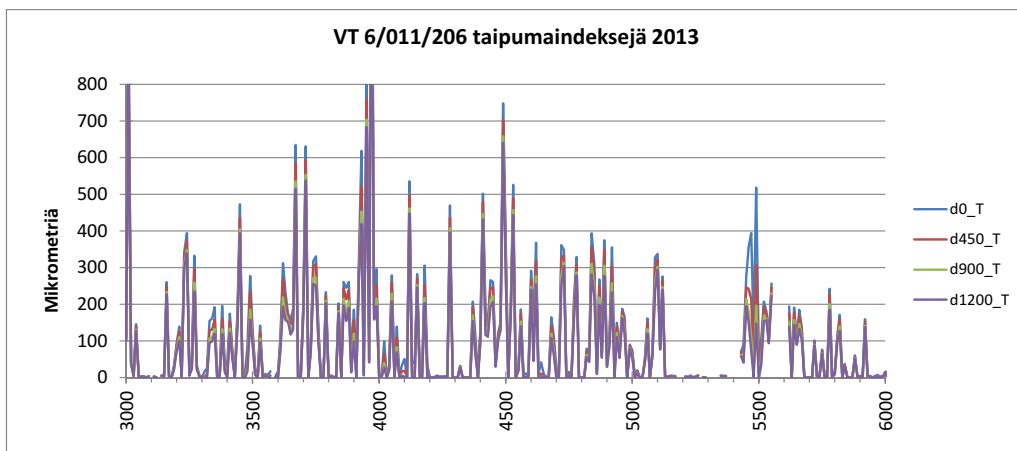
Kuva 2.2. Taipumaindeksejä valtatiellä 6 tieosalla 205 suuntaan 1 vuonna 2013.



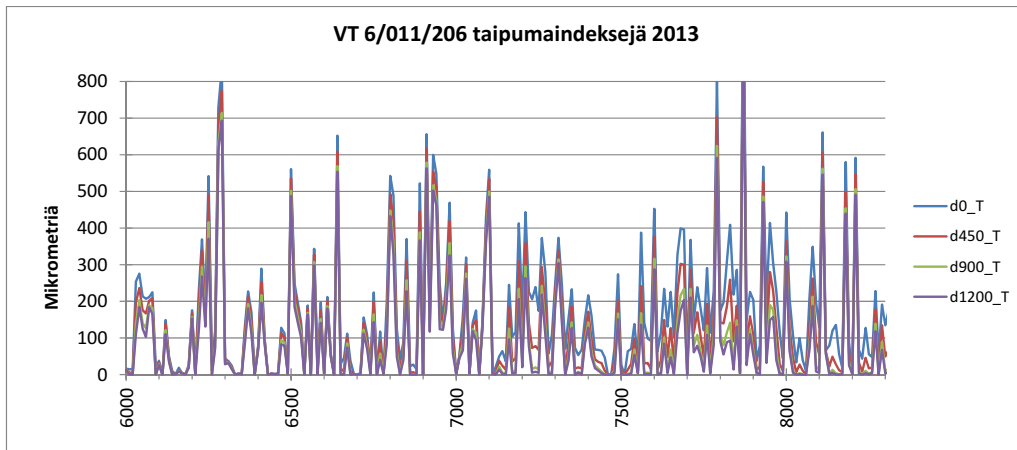
Kuva 2.3. Taipumaindeksejä valtatiellä 6 tieosalla 205 paaluvälillä 0-1000 m.



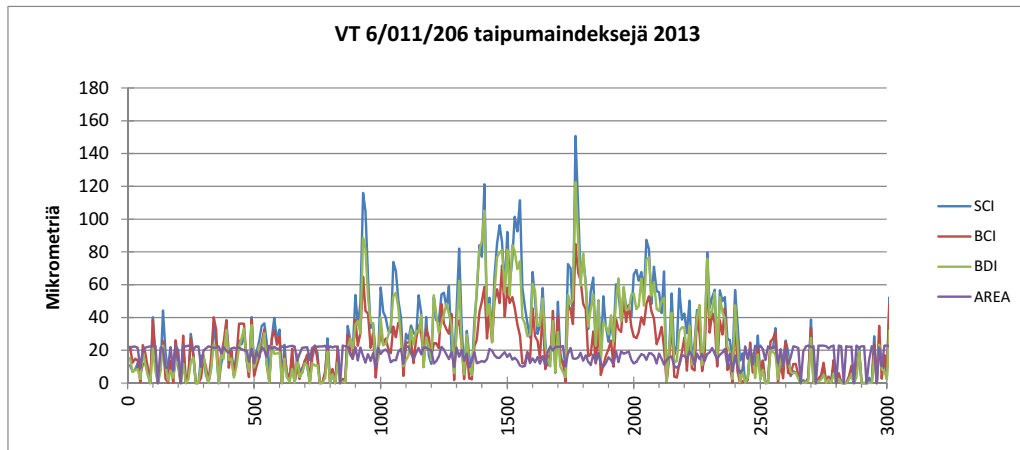
Kuva 2.4. Taipumat valtatiellä 6 tieosalla 206 paaluvälillä 0-3000 m.



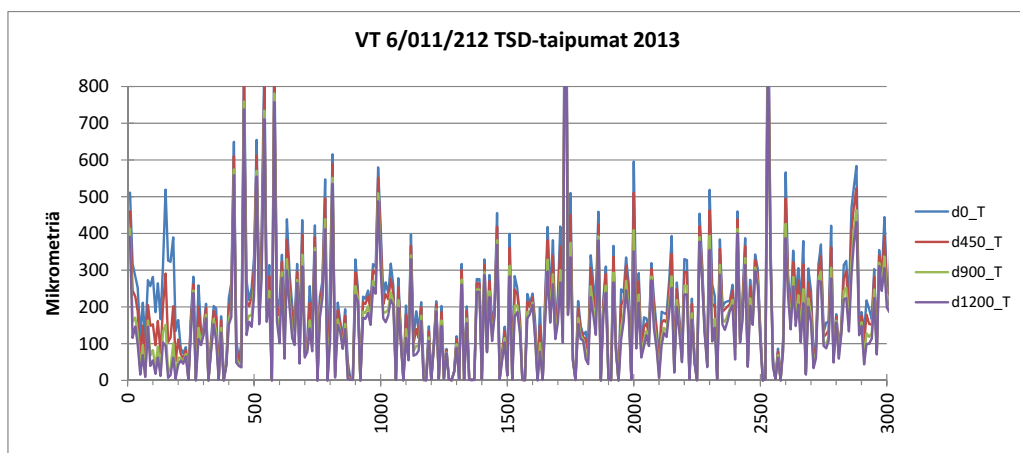
Kuva 2.5. Taipumat valtatiellä 6 tieosalla 206 paaluvälillä 3000-6000 m.



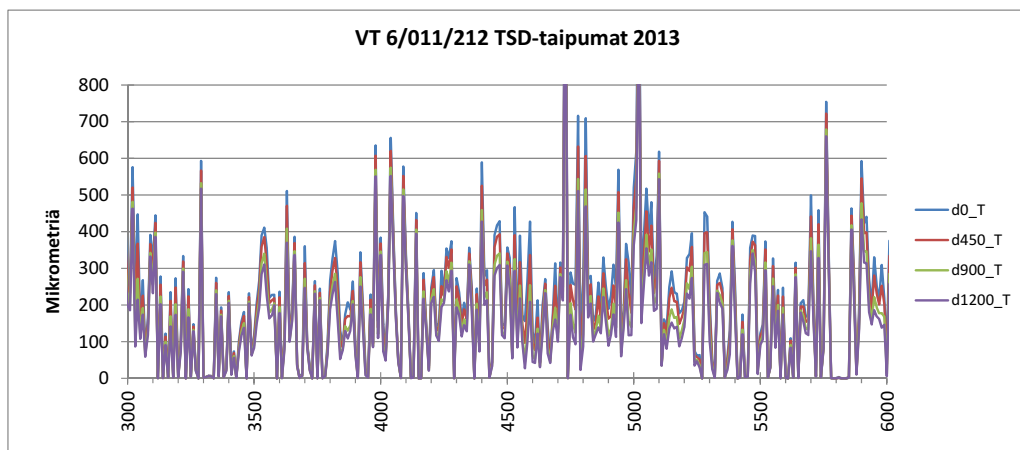
Kuva 2.6. Taipumat valtatiellä 6 tieosalla 206 paaluvälillä 6000-8300 m.



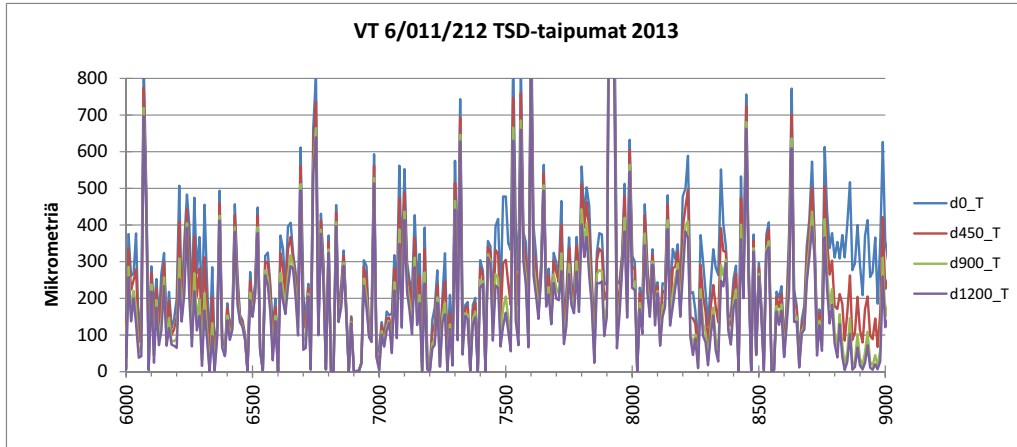
Kuva 2.7. Taipumaindeksejä valtatiellä 6 tieosalla 206 paaluvälillä 0-3000 m.



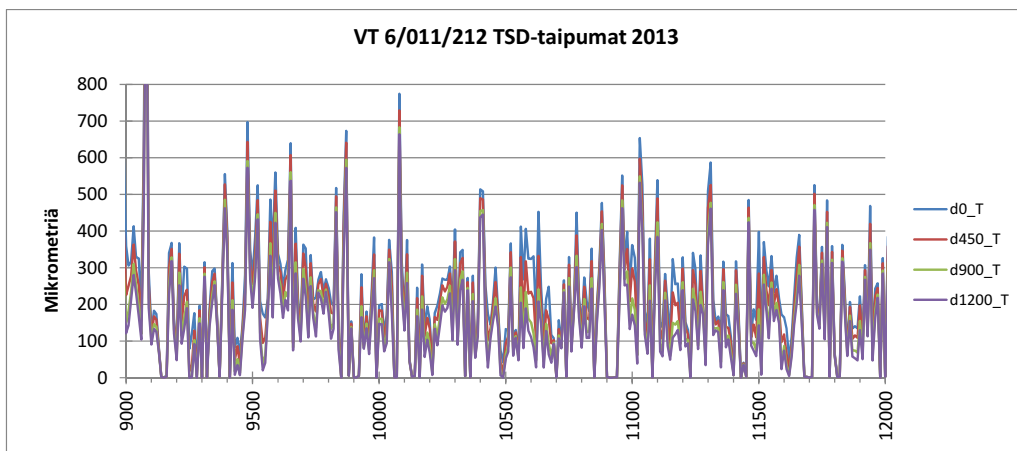
Kuva 2.8. Taipumat valtatiellä 6 tieosalla 212 paaluvälillä 0-3000 m.



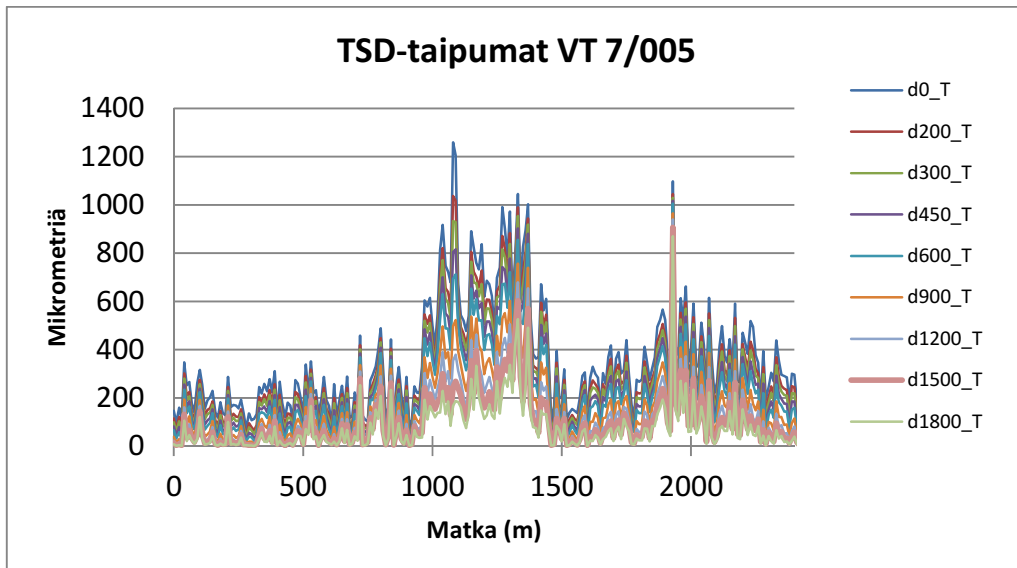
Kuva 2.9. Taipumat valtatiellä 6 tieosalla 212 paaluvälillä 3000-6000 m.



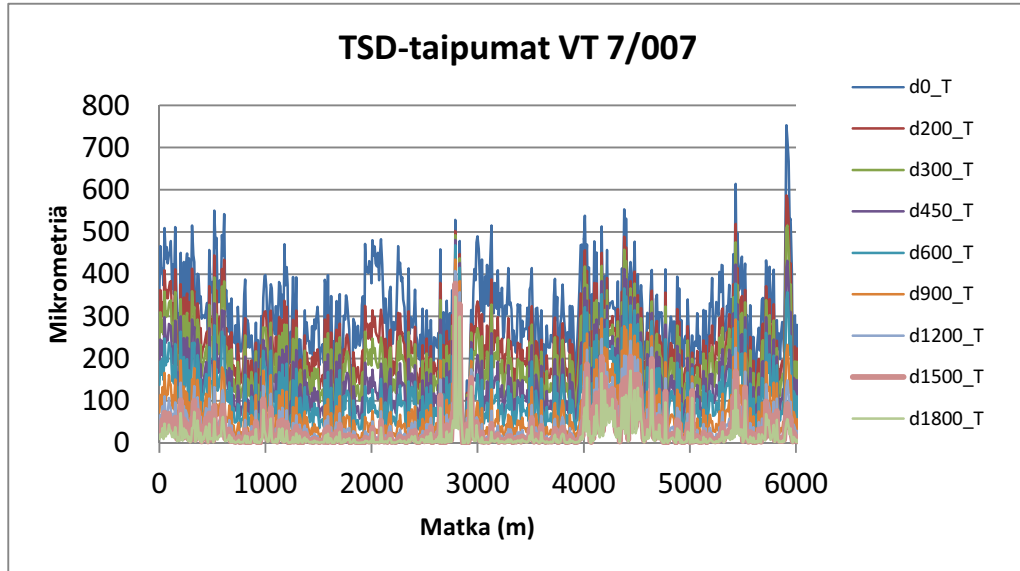
Kuva 2.10. Taipumat valtatiellä 6 tieosalla 212 paaluvälillä 6000-9000 m.



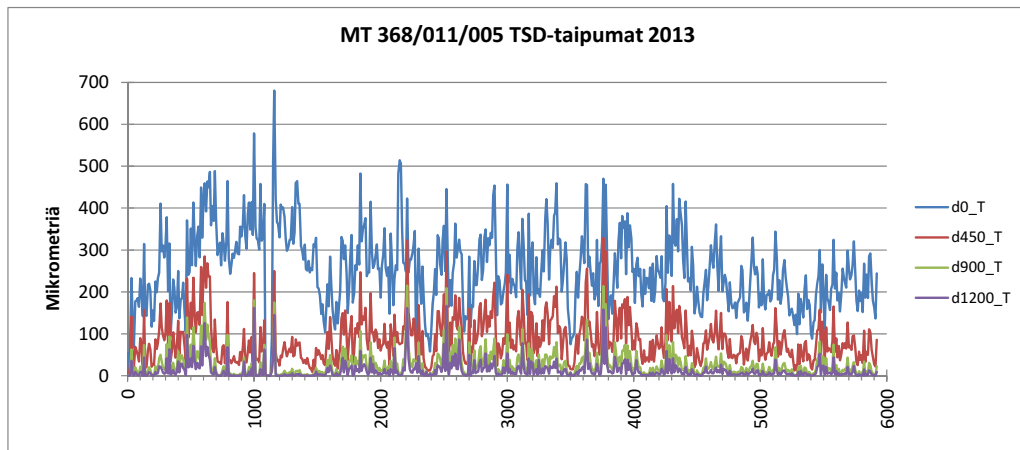
Kuva 2.11. Taipumat valtatiellä 6 tieosalla 212 paaluvälillä 9000-12000 m.



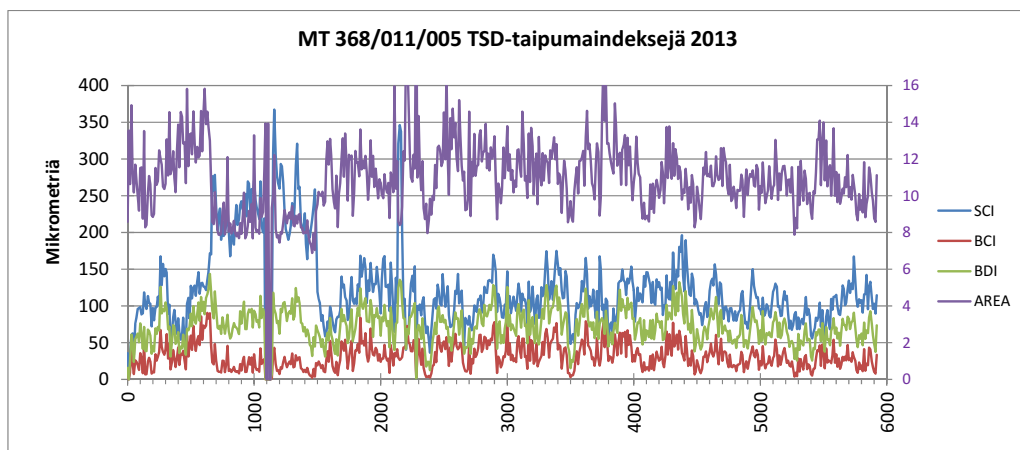
Kuva 2.12. Taipumat valtatiellä 7 tieosalla 5.



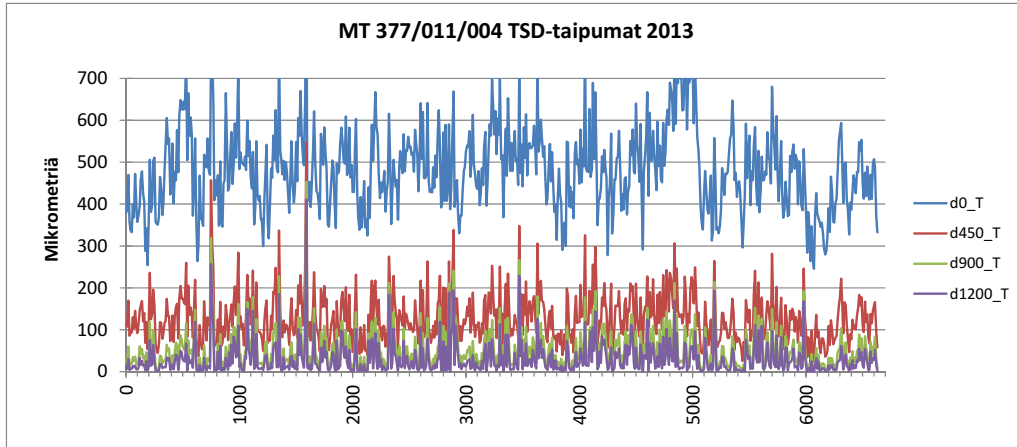
Kuva 2.13. Taipumat valtatiellä 7 tieosalla 7.



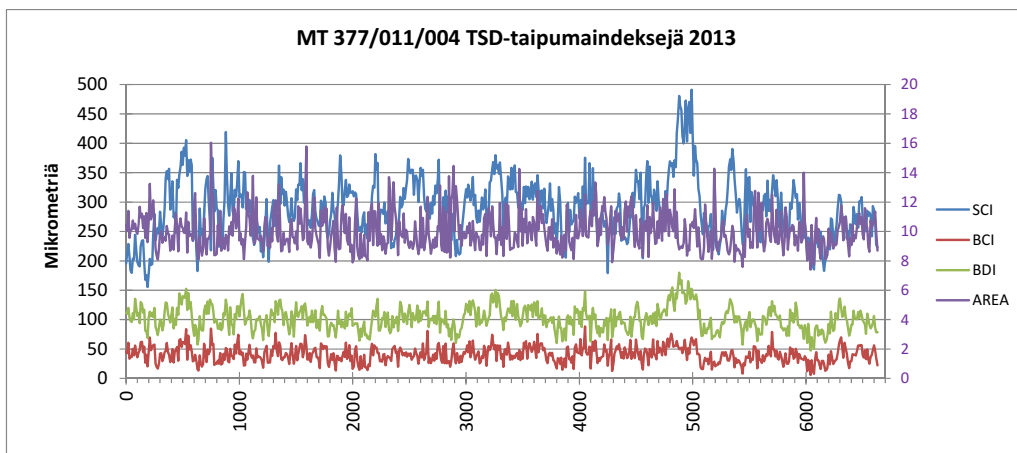
Kuva 2.12. Taipumat maantiellä 368 tieosalla 005.



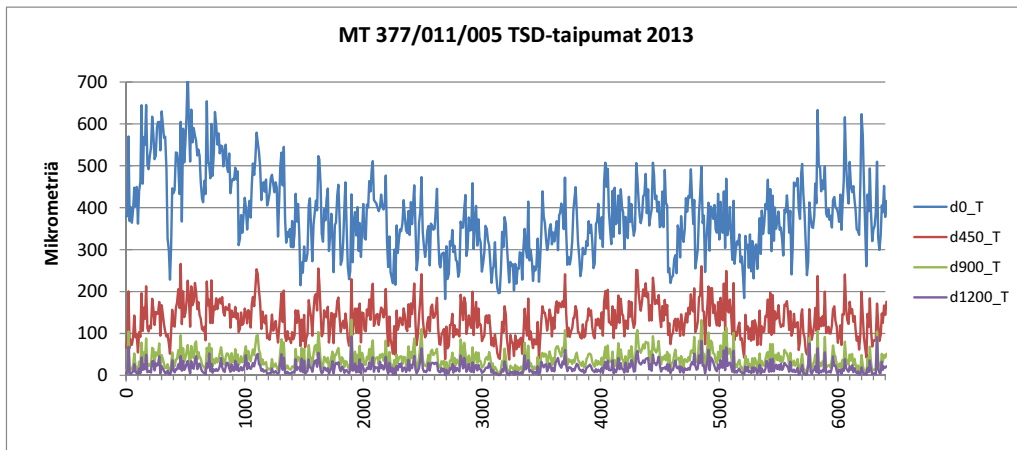
Kuva 2.13. Taipumaindeksit maantiellä 3662 tieosalla 005.



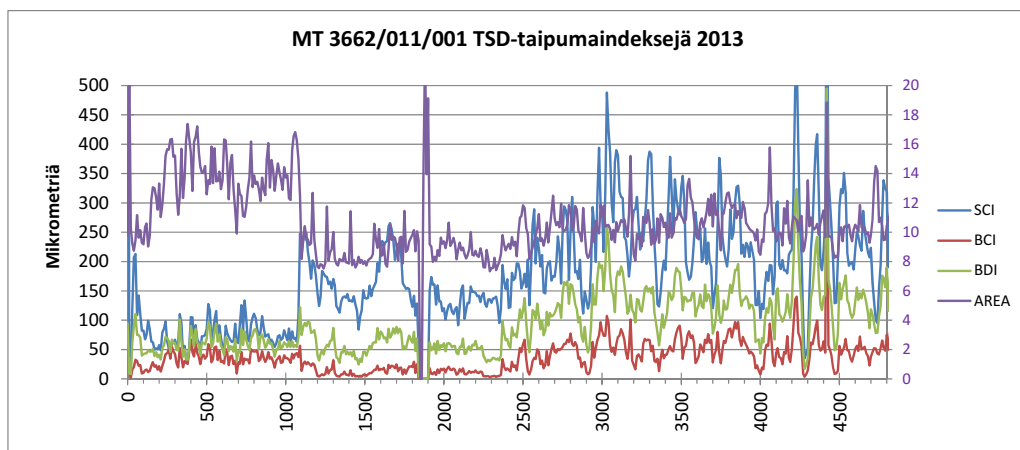
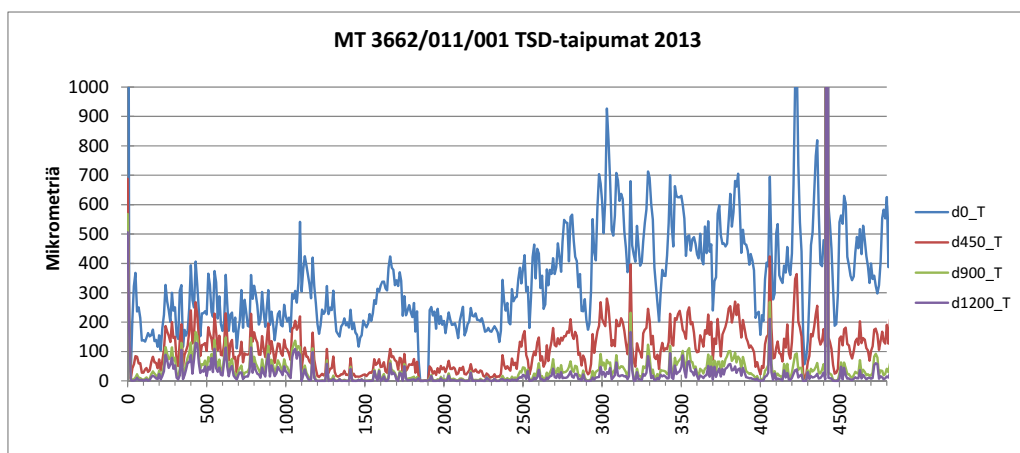
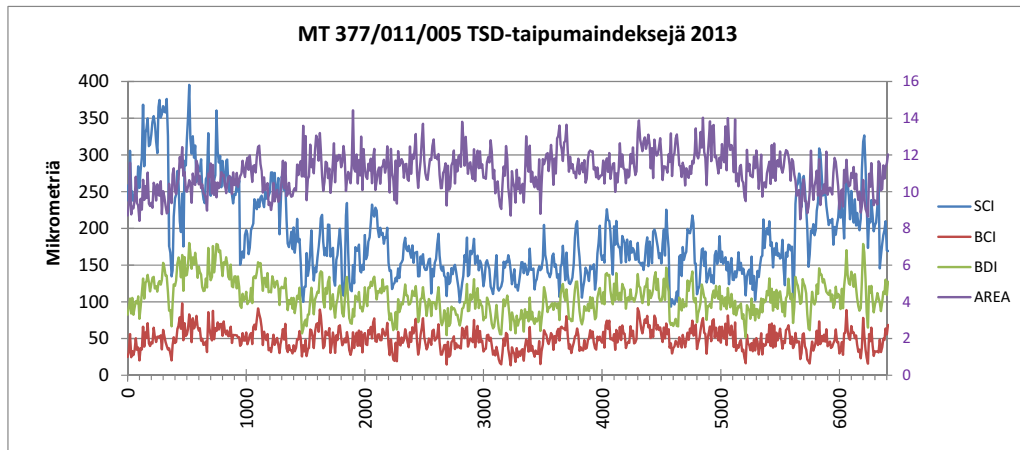
Kuva 2.13. Taipumat maantiellä 377 tieosalla 004.

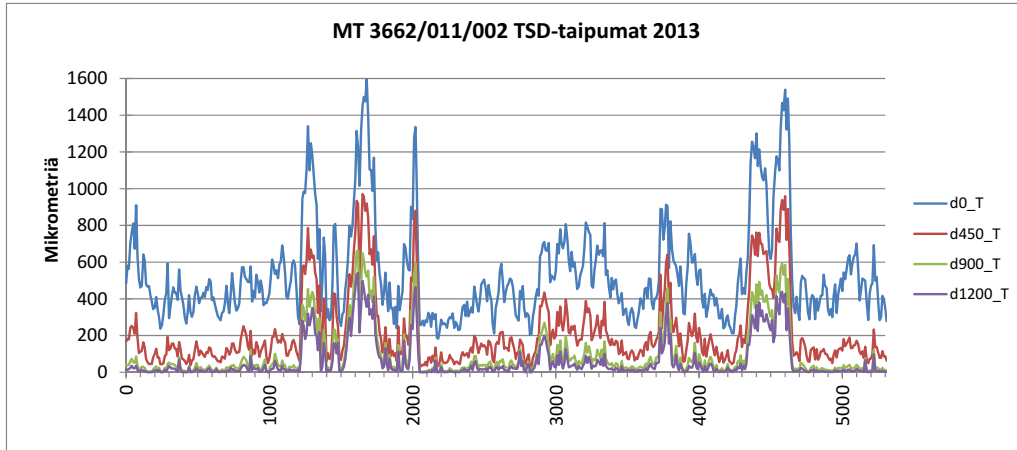


Kuva 2.14. Taipumaindeksit maantiellä 377 tieosalla 004.

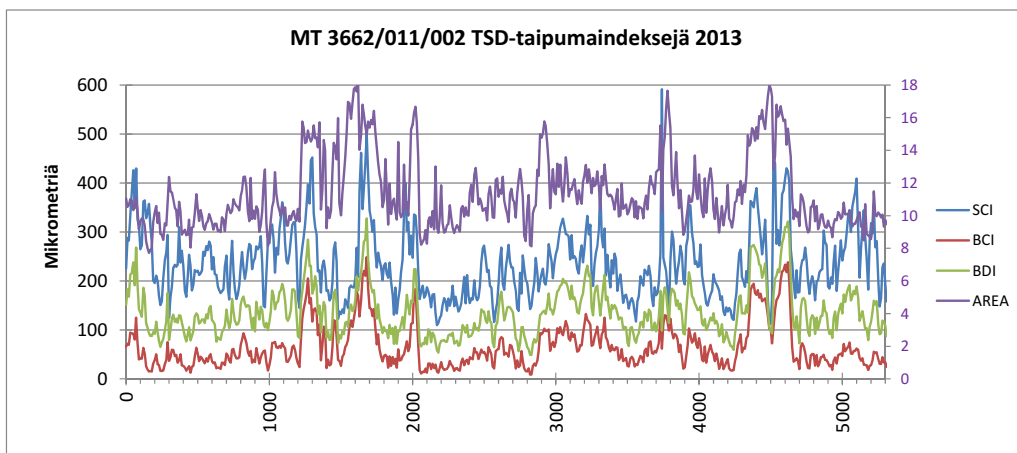


Kuva 2.15. Taipumat maantiellä 377 tieosalla 005.

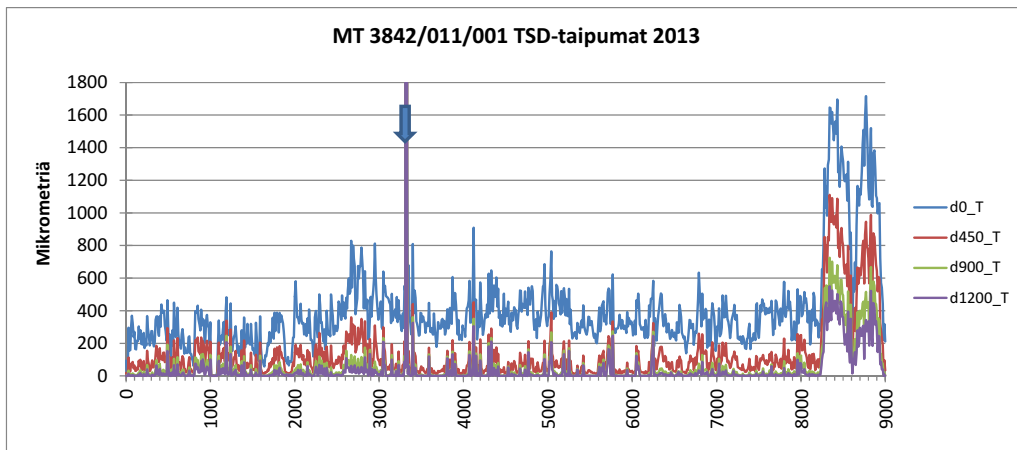




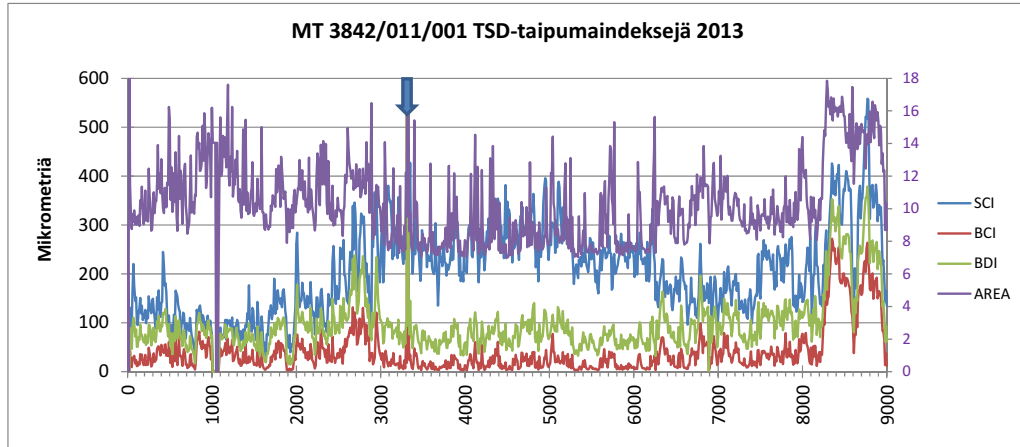
Kuva 2.19, Taipumat maantiellä 3662 tieosalla 002.



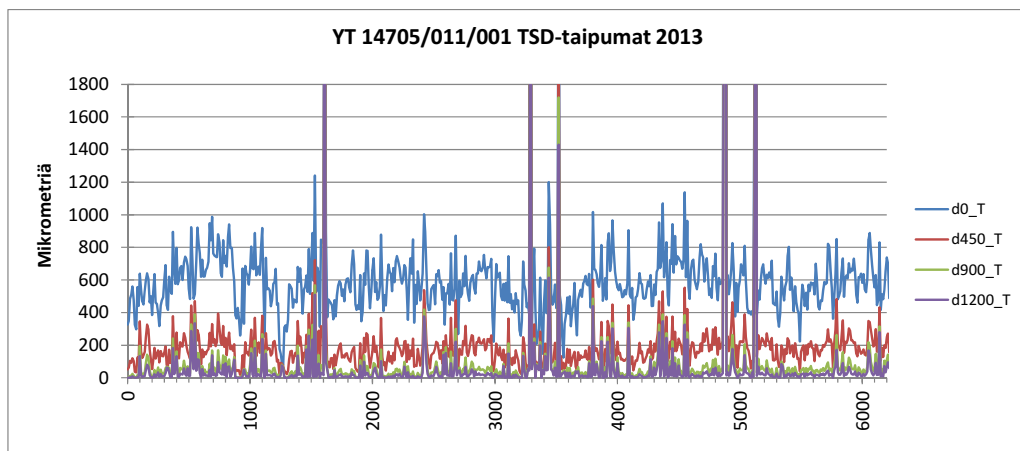
Kuva 2.20. Taipumaindeksit maantiellä 3662 tieosalla 002.



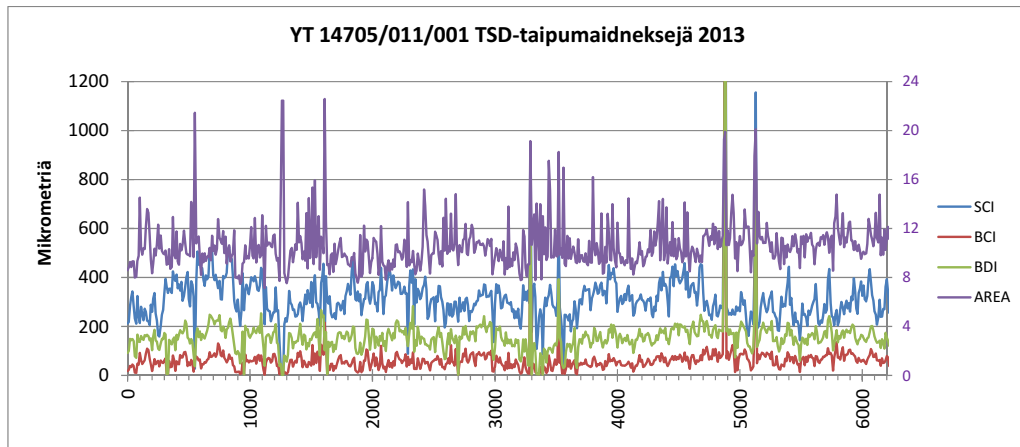
Kuva 2.21. Taipumat maantiellä 3842 tieosalla 001.



Kuva 2.22. Taipumaindeksit maantiellä 3842 tieosalla 001.

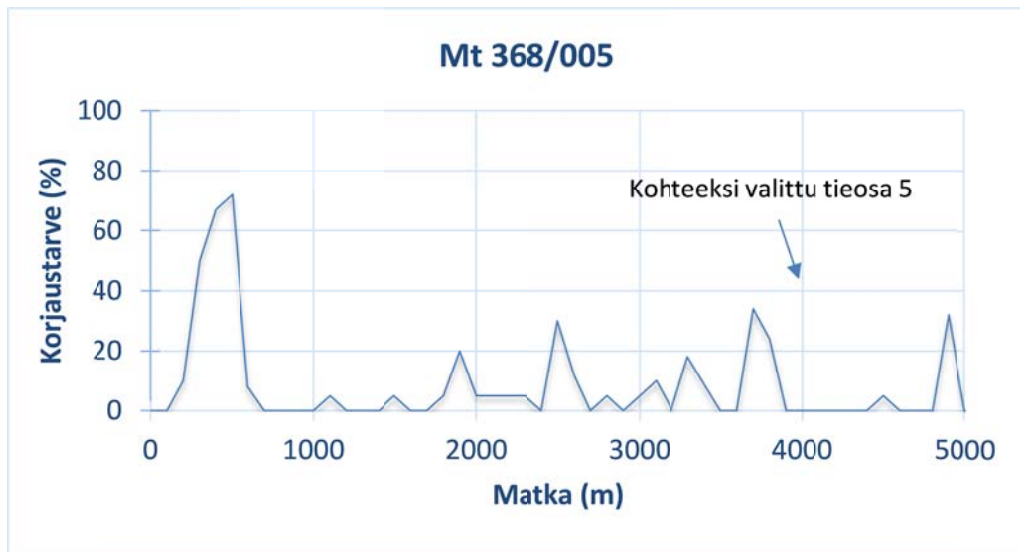


Kuva 2.23. Taipumat yhdystiellä 14705 tieosalla 001.

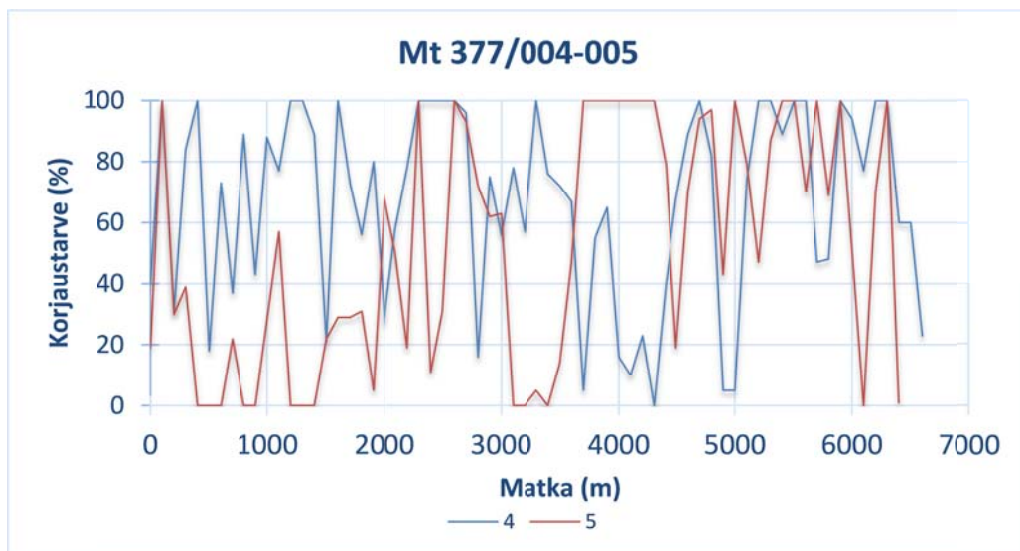


Kuva 2.24. Taipumaindeksit yhdystiellä 14705 tieosalla 001.

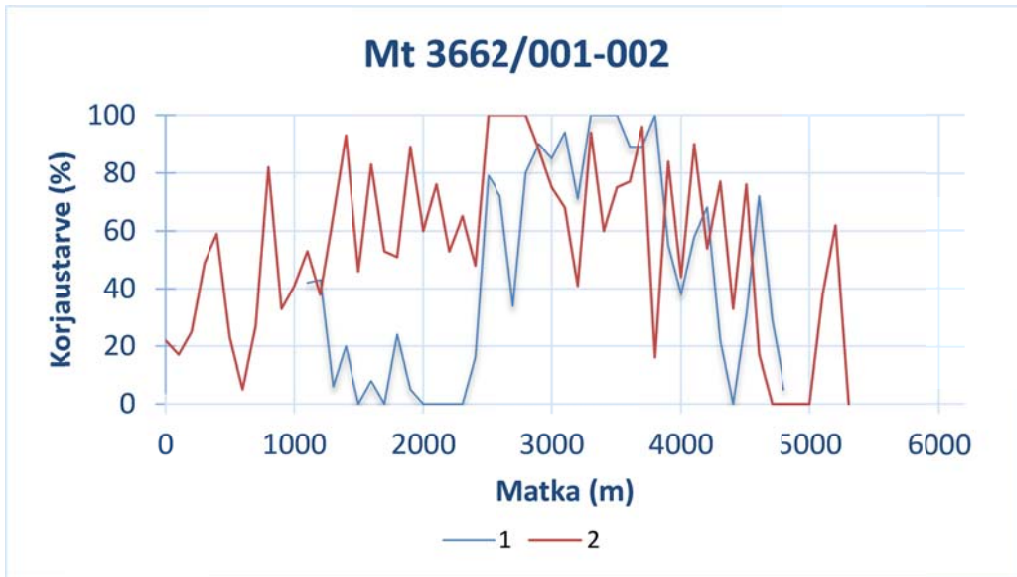
Korjaustarve



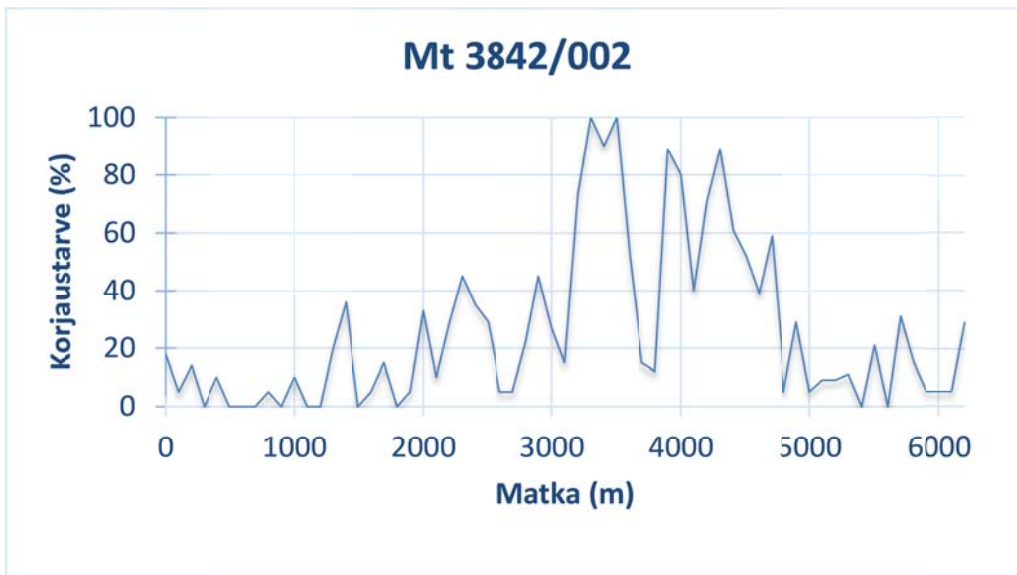
Kuva 3.1. Korjaustarve maantiellä 368/005.



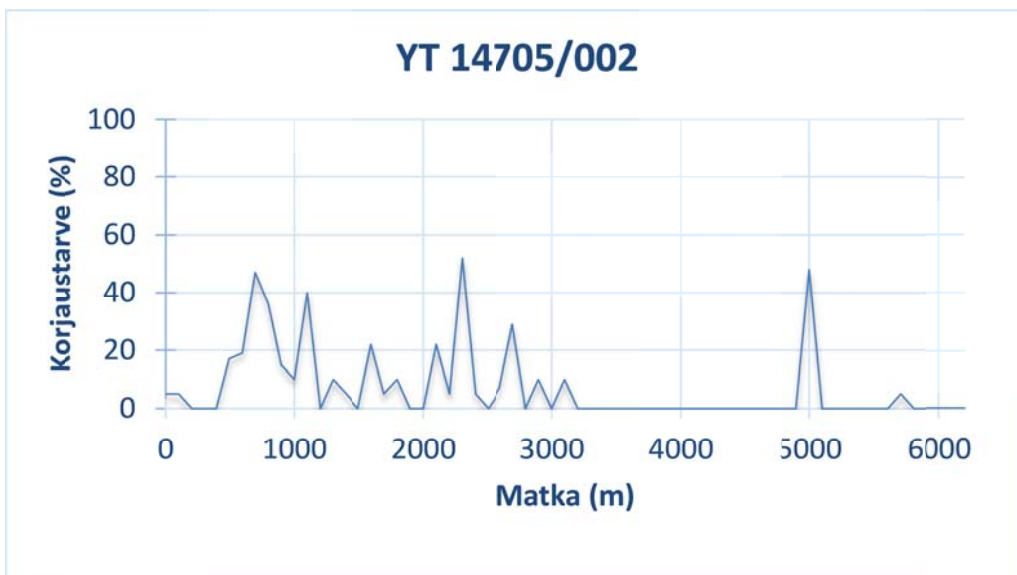
Kuva 3.2. Korjaustarve maantiellä 377.



Kuva 3.3. Korjaustarve maantiellä 3662.

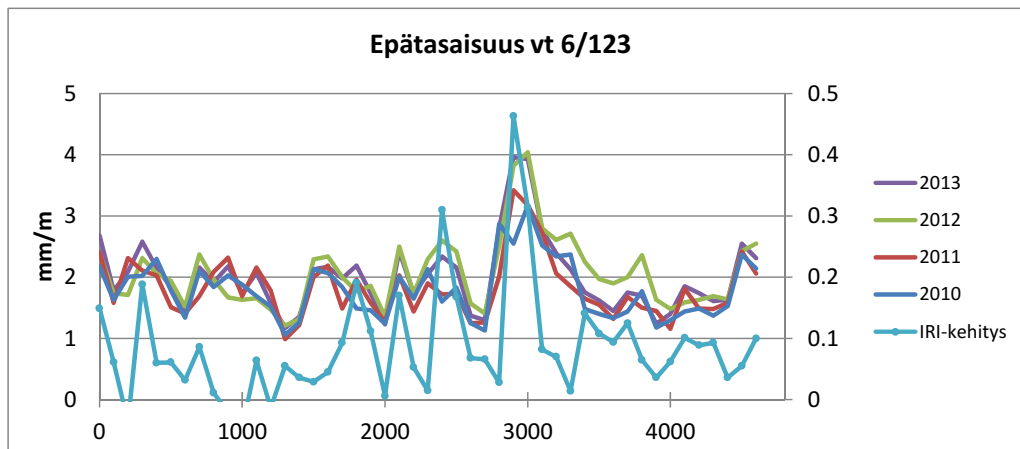


Kuva 3.4. Korjaustarve maantiellä 3842.

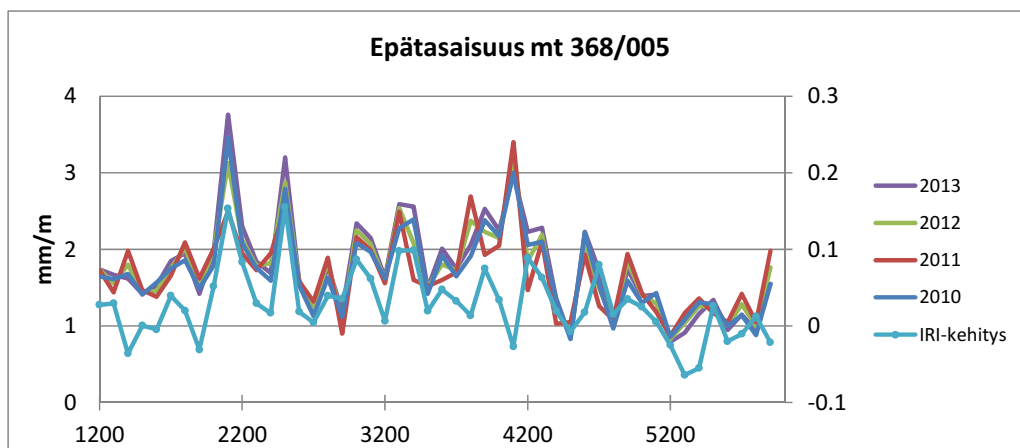


Kuva 3.5. Korjaustarve yhdystiellä 14705.

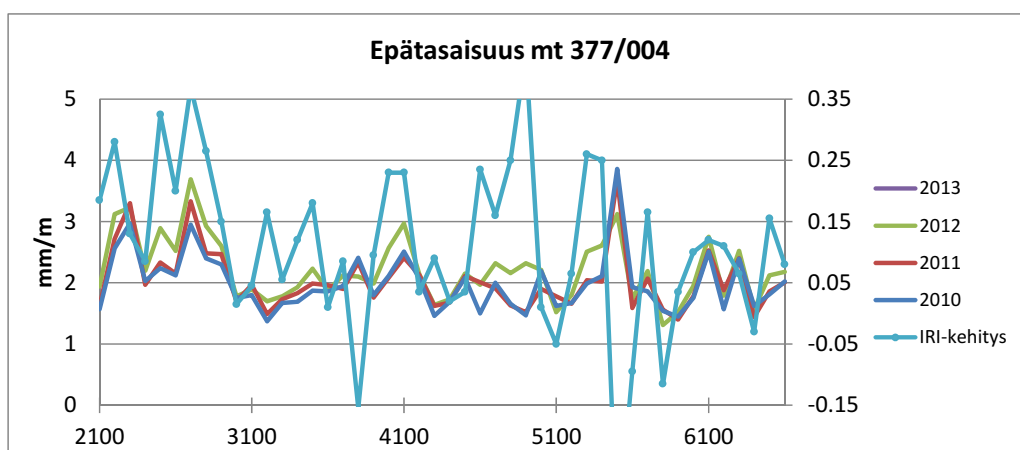
Epätasaisuus



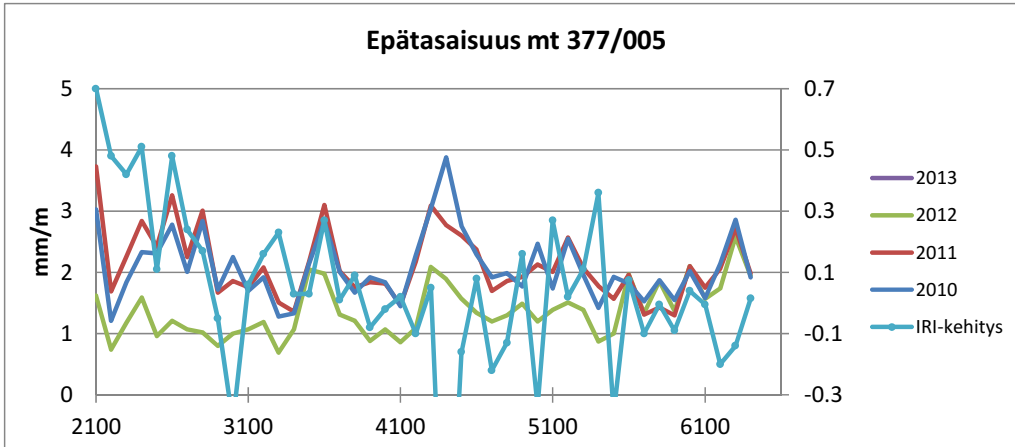
Kuva 4.1 Epätasaisuus valtatie 6 tieosalla 123 suuntaan 1.



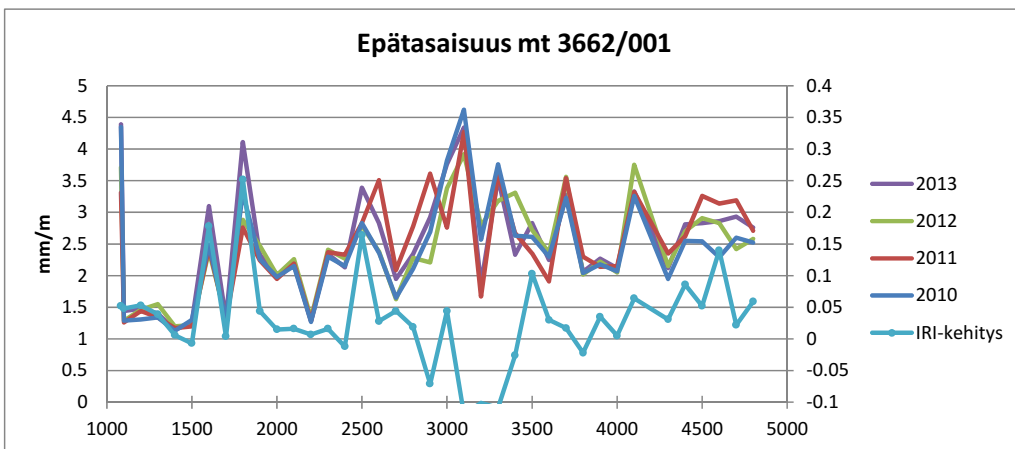
Kuva 4.2. Epätasaisuus maantien 368 tieosalla 5 suuntaan 1.



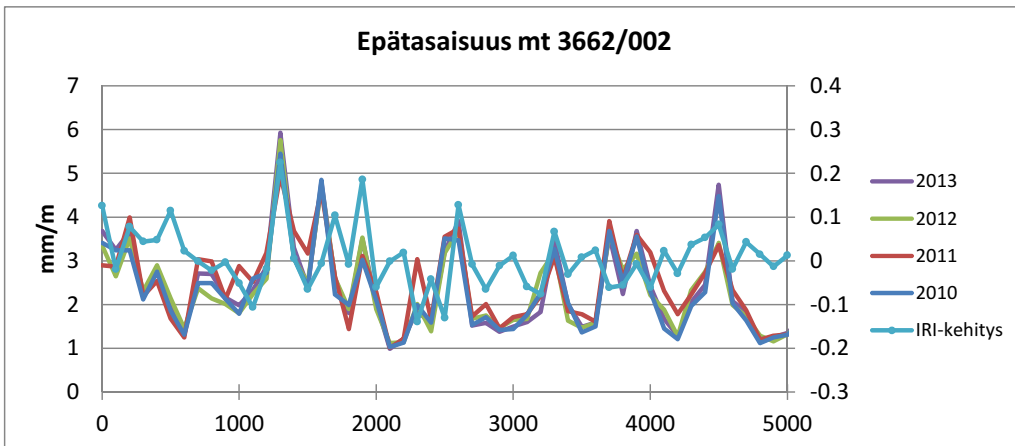
Kuva 4.3. Epätasaisuus maantien 377 tieosalla 4 suuntaan 1.



Kuva 4.4. Epätasaisuus maantien 377 tieosalla 5 suuntaan 1.

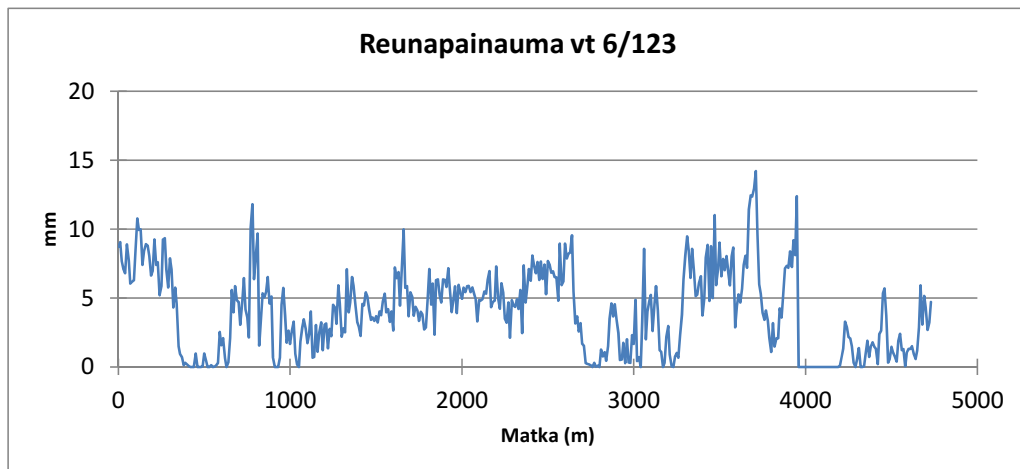


Kuva 4.5. Epätasaisuus maantiellä 3662 tieosalla 1 suuntaan 1.

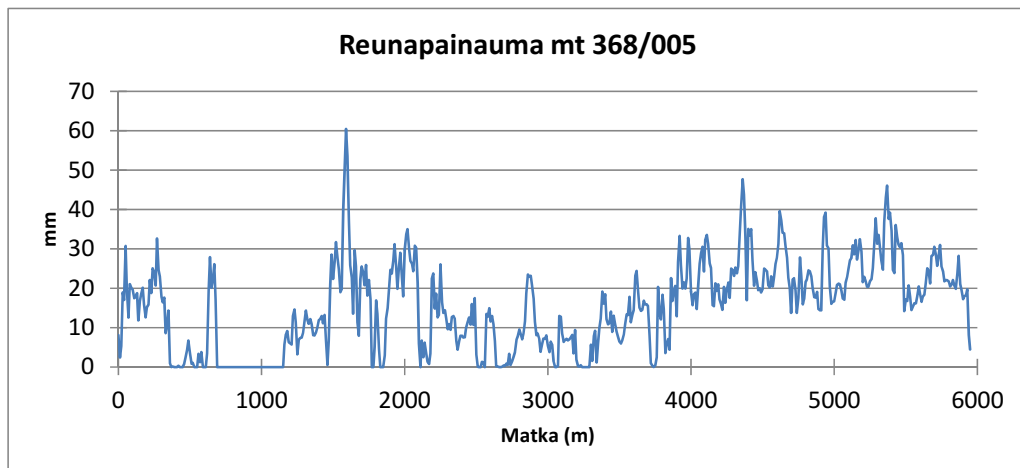


Kuva 4.6. Epätasaisuus maantien 3662 tieosalla 2 suuntaan 1.

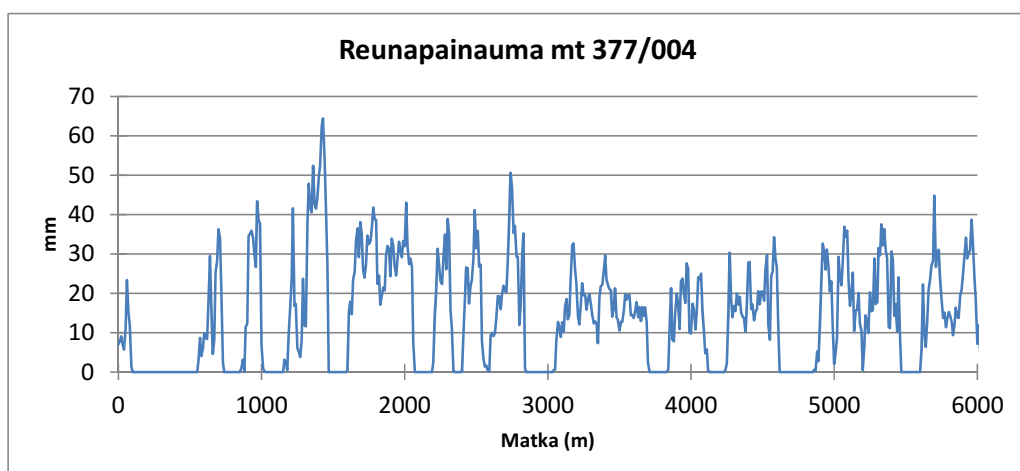
Reunapainauma



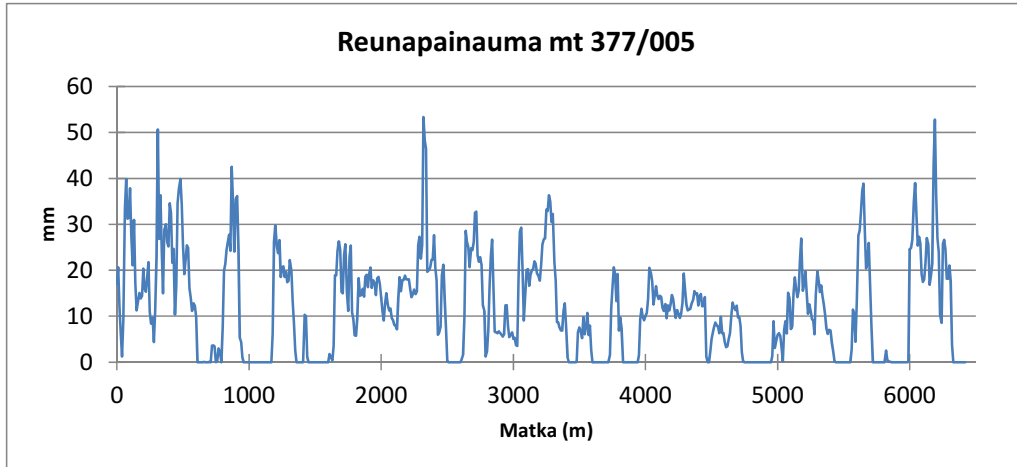
Kuva 5.1. Reunapainauma valtatiellä 6 tieosalla 123 suuntaan 1 vuonna 2013.



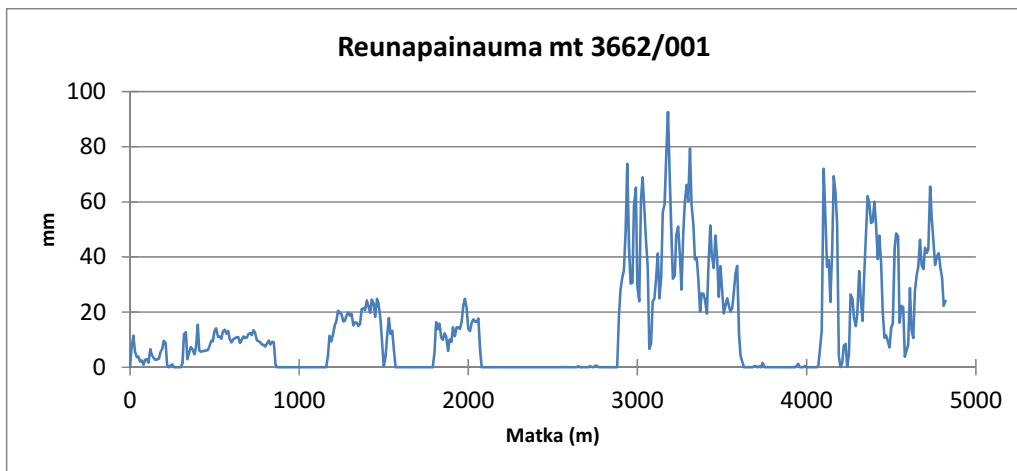
Kuva 5.2. Reunapainauma maantiellä 368 tieosalla 5 suuntaan 1 vuonna 2013.



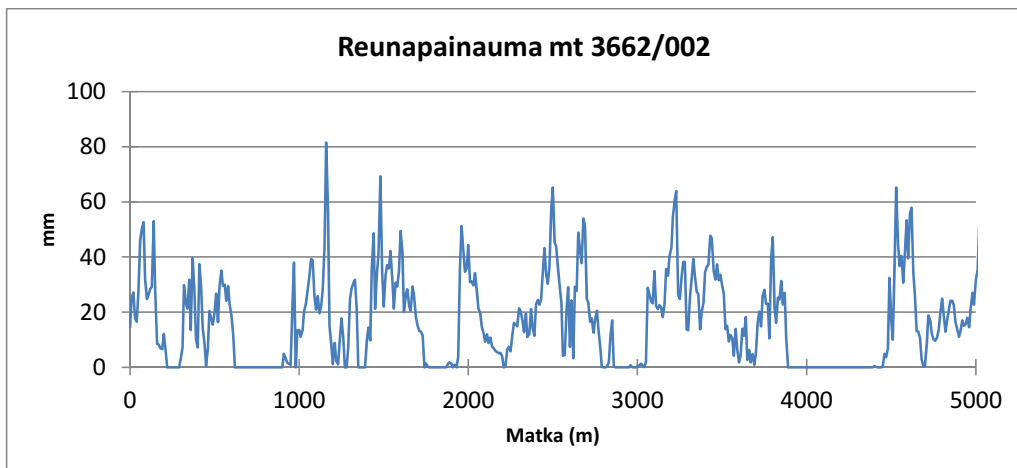
Kuva 5.3. Reunapainauma maantiellä 377 tieosalla 4 suuntaan 1 vuonna 2013.



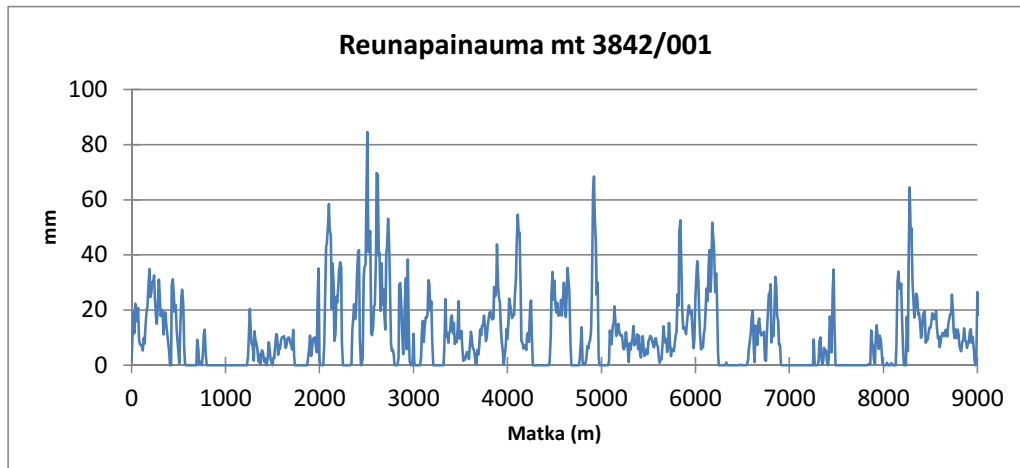
Kuva 5.4. Reunapainauma maantiellä 377 tieosalla 5 suuntaan 1 vuonna 2013.



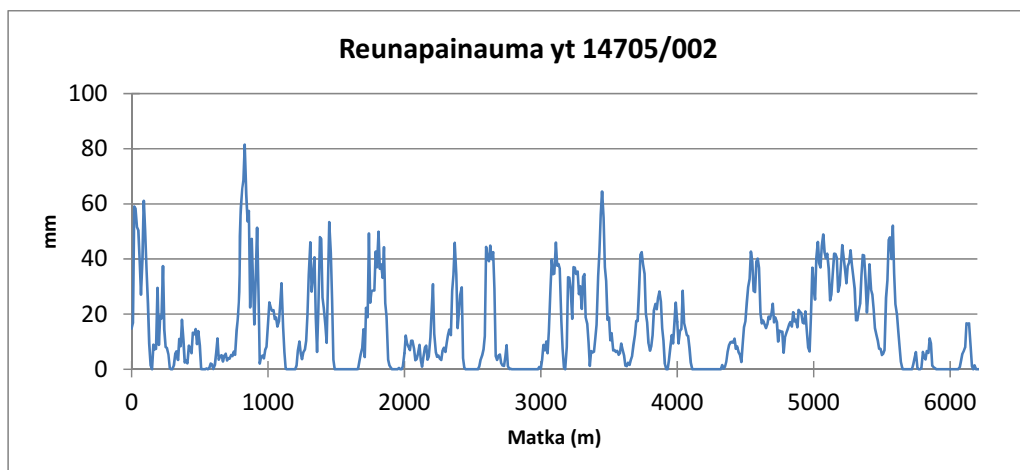
Kuva 5.5. Reunapainauma maantiellä 3662 tieosalla 1 suuntaan 1 vuonna 2013.



Kuva 5.6. Reunapainauma maantiellä 3662 tieosalla 2 suuntaan 1 vuonna 2013.



Kuva 5.7. Reunapainauma maantiellä 3842 tieosalla 1 suuntaan 1 vuonna 2013.



Kuva 5.8. Reunapainauma yhdystiellä 14705 tieosalla 2 suuntaan 1 vuonna 2013.

APAS-vastelaskentaohjelmaan liittyviä rajoituksia

Tierakenteiden analyttinen mitoitus on perustunut Suomessa 1990-luvun alussa kehitettyyn APAS -monikerroslaskentaohjelmaan (Pienimäki, 2004). Neste Oy julkaisi vuonna 1994 ohjelman ensimmäisen version, jossa lähtötietoina käytettiin Nesteen ja silloisen Tielaitoksen kokoamaa materiaalitietokantaa. Tielaitos ja Nesteen seuraaja Fortum jatkoivat ohjelman kehittämistä ja toinen versio julkaistiin vuonna 1997. Tiehallinto antoi ohjelman jatkokehityksen VTT:n tehtäväksi ja kolmas sekä samalla viimeinen versio julkaistiin vuonna 2004. APAS:in etuna Odemarkin menetelmään verrattuna on jännitysten ja muodonmuutosten laskennallinen määrittäminen erityisesti sidotun kerroksen alapinnalla ja pohjamaan pinnalla. Viimeisin APAS-versio ottaa huomioon myös sidottujen kerrosten jäykkyysmoduulien lämpötilariippuvuuden ja sitomattomien kerrosten jäykkyysmoduulien jännitystilariippuvuuden. APAS:iissa [14] on kuitenkin myös ongelmia, joista seuraavat pystytään ratkaisemaan mitoitus tehtäessä:

- Alkuperäisten materiaalien jännitystilariippuvuus on liian voimakas. Asfalttipäällysteen lisääminen lyhentää rakenteen kestoikää, koska kantavan kerroksen jännitystila laskee ja jännitystilariippuva jäykkyysmoduuli pienenee. Ratkaisuna asetetaan jännitystilariippuvuuden eksponentiksi 0 tai 0,25 alkupeiräisen 0,5 sijaan.
- Jännitystilariippuvan sitomattoman kantavan kerroksen lisääminen lyhentää kestoikää, koska jännitystilan laskentapiste siirtyy syvemmälle ja jännitystila pienenee. Ratkaisuna jaetaan paksut sitomattomat kerrokset 50 mm lamelleihin, joille jännitystila lasketaan erikseen.
- Sitomattomiin kerroksiin syntyy vetojännityksiä, joita ne eivät todellisuudessa kestä. Vetojännitykset näkyvät mitoitusraporteissa, mutta niitä ei oteta mitenkään huomioon. Ratkaisuna asetetaan ylemmän ja alemman kerroksen moduulien suhteeksi enintään, kuten Odemarkin menetelmässä. APAS rajoittaa automaattisesti ylemmän kerroksen jäykkyysmoduulia.
- Laskenta aliarvioi sidotun kantavan kerroksen rakenteen kestoikää, koska niillä on väsymiskriteeri toisin kuin sitomattomilla kantavilla kerroksilla. Sidotuille kantaville kerroksille määritetään keinotekoiset väsymisfunktiot, joilla kestoikä vastaa parhaiten todellisuutta.

APAS:iin liittyä myös ongelmia, joita ei voida ottaa mitoituksessa täysin huomioon:

- Ohuille asfalttipäällysteille lasketut jännitykset ja muodonmuutokset eivät vastaa todellista tilannetta, koska ohjelma siirtää todellisuudessa päällysteen alapintaan syntyvät vetojännitykset alempaan sitomattomaan kerrokseen. Sitomaton kerros ei ota vastaan vetoa, joten käytännössä vetojännitykset jätetään huomioimatta. Tästä syystä APAS liioittelee ohuen asfalttipäällysteen kestävyttä, joten Liikenneviraston ohjeistuksen mukaan ohjelmaa ei käytetä alle 80 mm päällysteen mitoittamiseen.
- Ohjelma liioittelee huonokuntoisemman alemman päällystekerroksen vaikutusta rakenteen kestoikään. Tämän takia APAS:ia ei käytetä parannuskohteiden mitoituksessa.
- Asfalttibetonin väsymisfunktiot joudutaan määrittämään siten, että ne suosivat tietyn bitumilaadun käyttöä. Kokemusten perusteella suositetaan yleisesti 50/70-bitumia.

- Pohjamaan materiaaleilla on yhteiset väsymisfunktiot, jotka eivät kuvaa rakenteen todellista vaurioitumista ja urautumista. Liikenneviraston ohjeistuksen mukaan pohjamaan puristusmuodonmuutosta ei käytetä mitoituskriteerinä.

Vastelaskenta perustuu seuraaviin oletuksiin:

- Rakenne koostuu tasapaksuista, homogeenisista, vaakasuunnassa äärettömistä kerroksista (luiskat otetaan huomioon vasta deformaation laskennassa)
- Rakennekerrokset käyttäytyvät kimmoisesti ja niiden jännitys-muodonmuutossuhde on lineaarinen
- Pohjamaa on ääretön vaakasuunnassa ja alaspäin
- Laskennassa rakenteet oletetaan isotrooppisiksi.

Kuorma annetaan STRESS-ohjelmalle ympyränmuotoiselle pinnalle tasaisesti jakautuneena jännityksenä. Kuormitus voi koostua yhdestä tai useammasta tällaisesta pinnasta. Laskentatyökalussa käytetty kuormitus voidaan valita muutamasta ennalta määritellystä kuormitustyypistä (standardiakseli, supersingle, henkilöautorengas), joissa kuormitus on mallinnettu valmiiksi sopivien ympyräpintojen avulla. Oletuskuormituksena käytetään akselikuormaa, joka vastaa mitoitustarkasteluissa käytettyä suomalaista standardikuormitusta.

Rakenne voi sisältää 1...30 materiaalikerrosta. Kunkin rakennekerroksen materiaali valitaan työkaluun sisältyvästä tietokannasta. Materiaalivalinta asettaa kunkin materiaalin laskentaparametreille tietokannassa olevat oletusarvot. Käyttäjä voi muuttaa omiin rakenteisiinsa sisällyttämien materiaalien keskeisimpien parametrien arvoja. Tietokantaa voi editoida tietokantaeditoreilla (esim. MS Access). Eräät laskentaparametrit – kuten materiaalin jäykkyysmoduuli – annetaan ohjelmalle funktion avulla, jossa riippuvuus esim. lämpötilan suhteen ilmaistaan matemaattisen muuttujan avulla. Työkalun periodimäärittely tehdään taulukoiden avulla. Perioditaulukossa määritellään periodien lukumäärä ja kunkin periodin pituus, lämpötila ja kosteustila. Lisäksi yksi periodi merkitään referenssiperiodiksi, jonka suhteen voidaan haluttaessa määrittää muiden periodien parametriarvoja.

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-231-9
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

