

KOKEMUKSIA UUSIOMATERIAALEISTA TIERAKENTEISSA



Ilari Harju, Taavi Dettenborn, Juha Forsman,
Harri Jyrävä, Pentti Lahtinen

Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteissa

Väyläviraston tutkimuksia 7/2019

Kannen kuva: Rudus Oy

Verkkojulkaisu pdf (www.vayla.fi)

ISSN 2490-0982
ISBN 978-952-317-678-2

Väylävirasto
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. 0295 34 3000

Ilari Harju, Taavi Dettenborn, Juha Forsman, Harri Jyrävä ja Pentti Lahtinen: Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteissa. Väylävirasto. Helsinki 2019. Väyläviraston tutkimuksia 7/2019. 141 sivua ja 6 liitettä. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-678-2.

Avainsanat: uusiomateriaalit, koerakentaminen, seurantamittaus, pitkäaikaistoimivuus, rakentamiskokemukset

Tiivistelmä

Liikennevirasto on linjannut ympäristötyön (2014) tavoitteiksi tehdä päätöksiä, joilla säästetään luonnonvaroja, vähennetään päästöjä ja turvataan ympäristön hyvää laatua sekä kehitetään tulevien sukupolvien kannalta kestäviä ratkaisuja. Tavoitteiden saavuttamista varten on tunnistettu tarpeelliseksi kehittää uusiomateriaalien hyödyntämistä koskevaa ohjeistusta. Osaksi ohjeistusta on päätetty laatia uusiomaarakentamista koskeva julkaisu, johon kootaan toimivaksi todettuja rakenneratkaisuja. Julkaisun laatimista varten on kerätty kokemuksia kohteilta, joista on saatavissa seurantatietoa. Nämä tiedot on koottu tähän taustaselvitykseen. Molempien julkaisujen laadinta rahoitetaan LIFE15 IPE/FI/004 CIRCWASTE FINLAND Liikenneviraston C.22 -osahankkeen avulla. (Liikenneviraston) C.22 osahanke kuuluu valtakunnalliseen CIRCWASTE LIFE-IP projektiin, joka koostuu yhteensä 19 eri osahankkeesta. C.22 osaprojekti on uusiomateriaalien hyödyntämistä liikenneväylähankkeissa koskeva kehitysprojekti.

Tässä selvityksessä uusiomateriaaleilla tarkoitetaan maarakentamisessa käytettäviä, teollisuudessa tai purku- ja kierrätystoiminnassa syntyneitä jätteitä tai jäteperäisiä tuotteita. Tässä esitellään myös uusiomateriaaleilla jalostettujen heikkolaatuisten maa-ainesten hyödyntämistä. Selvityksessä on käyty läpi 1980-2010 -luvulla toteutettuja koerakennuskohteita, joista on poimittu kymmenien onnistuneiden kohteiden lisäksi kokemuksia myös epäonnistuneista kohteista, tehtyjen virheiden, riskirakenteiden sekä kehitystyötä edellyttävien rakenteiden tunnistamiseksi. Tässä käsitellyjä kohteita valittaessa tutustuttiin kymmeneen muihinkin kohteisiin, jotka rajattiin pois tästä selvityksestä mm. kohteiden samankaltaisuuden, seurannan tai dokumentoinnin puutteiden, tms. syiden takia. Aikaisemminkin vuosikymmenillä erilaisia jätemateriaaleja on satunnaisesti hyödynnetty tierakenteissa, mutta tässä selvityksessä on rajauduttu materiaaleihin, joita on edelleen käytössä ja/tai käytettävissä.

Uusiomateriaalien hyödyntämistä maarakentamisessa on tutkittu Suomessa ainakin 1970 -luvulta saakka, jolloin Oulun yliopiston tie- ja maarakennustekniikan laitos tutki terästeollisuuden sivutuotteena syntyvän masuunikuonan hyödyntämismahdollisuuksia maarakentamisessa. Monipuolinen kivihiihen polton tuhkan hyötykäyttötutkimus on toteutettu mm. VTT:lla 1970-80 -lukujen vaihteessa ja laaja tuhkien hyötykäyttötutkimus ja hyödyntäminen toteutettiin Helsingin kaupungilla 1970-luvun lopulta 90-luvulle. Edellä mainittujen lisäksi on vuosikymmenien aikana tutkittu ja hyötykäytetty myös muita teollisuuden sivutuotteita ja jätteitä, kuten esimerkiksi betonimurskettä, rengasrouhetta, kipsiä, jne. Tutkimustyön ja koerakentamisen avulla osa uusiomateriaaleista on tuotteistettu maarakennuskäyttöön, kuten esimerkiksi betonimurske, masuunihiekka ja eräät teräskuonat, joiden hyötykäyttö maarakentamisessa on tuotteistamisen myötä yleistynyt.

Uusiomateriaalien hyödyntämistä sideaineena on olemassa tutkittua tietoa 1970-luvulta saakka. Sorateiden runkokelirikon parantamisessa hyödynnettiin esimerkiksi muurahaishappotuotannon sivutuotteena suurissa määrin syntyvää kipsiä sekä energiantuotannon lentotuhkia yhdessä kaupallisen sideaineen avulla hydraulisesti sidottuna rakennekerroksena. Sitoutumisominaisuuksia omaavia uusiomateriaaleja on hyödynnetty myös hydraulisten stabilointien sideaineseoksen osakomponenttina, jolloin on voitu vähentää kaupallisen sideaineen käyttötarvetta.

Useiden uusiomateriaalien tuotteistaminen on vielä kesken. Yhteinen tekijä näille materiaaleille on tyypillisesti se, että ne poikkeavat ominaisuuksiltaan, rakennettavuudeltaan ja ympäristökelpoisuudeltaan luonnon maa- ja kiviainesmateriaaleista. Luonnon maa- ja kiviaineksesta poikkeavien materiaalien käytössä sekä harvinaisempien rakennesovelluksien toteuttamisessa tulee kiinnittää erityistä huomiota rakentamisen laatuun koko tuotantoketjun aikana. Esimerkiksi suunnitelmassa esitettyä tai ennakkotutkimuksissa tutkittua heikkoa laatuista materiaalin käyttäminen rakentamisessa, rakennekerroksen puutteellinen tiivistäminen tai tiivistettävän materiaalin optimialueelta poikkeava vesipitoisuus aiheuttaa laaturiskin kaikessa maarakentamisessa, myös tavanomaisilla luonnonmateriaaleilla. Sidotut ja stabiloidut uusiomateriaalirakenteet ovat vaativia rakennettavia ja toteuttamisessa tulee noudattaa annettuja ohjeita ja laatuvaatimuksia, jotta varmistetaan rakenteen onnistuminen ja pitkäaikaistoimivuus.

Tähän dokumentoidut kokemukset, havainnot, johtopäätelmät, suositukset, yms. ovat pohjana tulevalle uusiomaarakentamista koskevalle julkaisulle ("kä-sikirja"), jota laadittaessa tätä selvitystä hyödynnetään toimivien uusiomateriaalirakennusosien ja -rakenteiden kehittämiseksi sekä esittämiseksi. Julkaisua laadittaessa tässä esitettyjä havaintoja tarkastellaan edelleen kriittisesti ja lisäksi hyödynnetään myös muualta saatavaa raportoitua, kokemusperäistä ja luotettavaa tietoa uusiomateriaalirakenteista.

Ilari Harju, Taavi Dettenborn, Juha Forsman, Harri Jyrävä och Pentti Lahtinen: Erfarenheter av alternativa material i vägkonstruktioner. Trafikledsverket. Helsingfors 2019. Trafikledsverkets undersökningar 7/2019. 141 sidor och 6 bilagor. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-678-2.

Nyckelord: alternativa material, testbyggen, uppföljningsmätning, funktion på lång sikt, byggerfarenheter

Sammanfattning

Enligt Trafikverkets riktlinjer (2014) ska man inom miljöarbetet ha som mål att fatta beslut som sparar naturtillgångarna, minskar utsläppen, säkerställer en god miljö och utvecklar hållbara lösningar med tanke på kommande generationer. För att uppnå målen har man funnit det nödvändigt att utveckla instruktioner för utnyttjande av alternativa material. Som en del av instruktionerna har man beslutat sammanställa en publikation om alternativa material inom markbyggnad, med konstruktionslösningar som konstaterats vara fungerande. För publikationen har man samlat in erfarenheter från objekt för vilka det finns uppföljningsdata. Dessa data har nu samlats i denna bakgrundsutredning. Båda publikationerna finansieras med hjälp av LIFE15 IPE/FI/004 CIRCWASTE FINLAND Trafikverkets C.22-delprojekt. Trafikverkets C.22-delprojekt ingår i det riksomfattande CIRCWASTE LIFE-IP-projektet, som består av sammanlagt 19 olika delprojekt. C.22-delprojektet är ett utvecklingsprojekt som gäller utnyttjande av alternativa material i trafikledsprojekt.

I denna utredning avses med alternativa material avfall eller avfallsbaserade produkter som uppstår i industrin eller vid rivnings- och återvinningsverksamhet och som används inom markbyggnad. Här presenteras också utnyttjande av marksubstanser av dålig kvalitet som förädlats med hjälp av alternativa material. Utredningen har gått igenom testbyggen som genomförts mellan 1980- och 2010-talet och bland dem plockat tiotals exempel på lyckade objekt men även erfarenheter av misslyckade objekt för att kunna identifiera misstag, riskkonstruktioner och konstruktioner som kräver utvecklingsarbete. Vid valet av objekt som här behandlas bekantade sig utredningen med tiotals andra objekt som lämnades utanför utredningen bl.a. på grund av att objekten var för lika eller på grund av brister i uppföljningen eller dokumenteringen eller av liknande orsaker. Även under tidigare decennium har olika avfallsmaterial sporadiskt utnyttjats i vägkonstruktioner, men denna utredning har begränsats till material som fortfarande utnyttjas och/eller kan utnyttjas.

Forskning i utnyttjande av alternativa material inom markbyggnad har bedrivits i Finland åtminstone sedan 1970-talet, då institutionen för väg- och markbyggnadsteknik vid Uleåborgs universitet undersökte möjligheterna att använda stålindustrins biprodukt masugnsslagg inom markbyggnad. Bland annat Statens forskningscentral VTT bedrev vid skiftet mellan sjuttio- och åttiotalet mångsidig forskning i hur askan från förbränning av stenkol kunde utnyttjas och Helsingfors stad genomförde en omfattande undersökning av hur aska kunde utnyttjas – och utnyttjade aska – från slutet av sjuttioalet till början av nittiotalet. Utöver de ovan nämnda har man även undersökt och utnyttjat industrins andra biprodukter och avfall, så som betongkross, däckkross, gips osv. Med hjälp av forskningsarbetet och testbyggena har en del av de alternativa materialen produktifierats för markbyggnad, såsom betongkross, masugnssand

och en del stålslagg, vilka i och med produktifieringen blivit vanligare inom markbyggnad.

Det finns forskningsdata om utnyttjandet av alternativa material som binde-medel ända sedan 1970-talet. Man utnyttjade till exempel gips, som uppkommer i stora mängder som biprodukt vid tillverkningen av myrsyra, och flygaska från energiproduktionen tillsammans med ett kommersiellt bindemedel som en hydrauliskt bunden ballast för att reparera tjälskador i vägstommen på grusvägar. Alternativa material med bindegenskaper har även utnyttjats som delkomponenter i hydrauliska stabiliseringars bindemedelsblandning, vilket har minskat behovet av kommersiella bindemedel.

Produktifieringen av flera alternativa material pågår ännu. En gemensam faktor för dessa material är ofta att de avviker vad gäller egenskaper, lämplighet för byggande och miljöduglighet från naturligt jord- och stenmaterial. Särskild uppmärksamhet bör ägnas konstruktionskvaliteten i hela produktionskedjan vid användning av andra material än naturligt jord- och stenmaterial samt vid genomförandet av mer sällsynta strukturella tillämpningar. Till exempel att vid byggande använda material som är av sämre kvalitet än vad som presenterats i planen eller i förhandsundersökningar, bristfällig packning av ballasten eller en vattenhalt som avviker från det optimala området i materialet som packas orsakar en kvalitetsriks i allt markbyggnad, även med traditionella naturmaterial. Bundna och stabiliserade konstruktioner med alternativa material är krävande att bygga med och när dessa används ska de givna instruktionerna och kvalitetskraven följas för att säkerställa konstruktionens funktion på lång sikt.

Erfarenheter, observationer, slutsatser, rekommendationer o.d. som dokumenterats här utgör grund för en kommande publikation ("handbok") gällande alternativa material inom markbyggnad, och när publikationen utarbetas kommer denna utredning att utnyttjas för att utveckla och presentera fungerande byggkomponenter och byggkonstruktioner med alternativa material. När publikationen utarbetas kommer de observationer som presenteras här fortsättningsvis att granskas kritiskt och dessutom utnyttjas också erfarenhetsbaserad och pålitlig information om konstruktioner med alternativa material, som rapporterats på annat håll.

Ilari Harju, Taavi Dettenborn, Juha Forsman, Harri Jyrävä and Pentti Lahtinen: Experiences of using recovered materials in road structures. Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2019. Research reports of the Finnish Transport Infrastructure Agency 7/2019. 141 pages and 6 appendices. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-678-2.

Keywords: recovered materials, experimental construction, follow-up measurement, long-term effectiveness, construction experiences

Abstract

The Finnish Transport Agency's Corporate Social Responsibility Report (2014) identified the Agency's goals as making decisions that conserve natural resources, reduce emissions and protect the environment and finding solutions that are sustainable from the perspective of future generations. To achieve these goals, the Agency feels that it needs to revise its guidelines on the use of recovered materials. The Agency has decided to complement the guidelines with a handbook on recovered materials featuring tried and tested structural solutions. In order to compile the handbook, the Agency has been collecting follow-up information on earlier projects. This report is based on the aforementioned follow-up information. Funding for the work involved in compiling the handbook and this report has been secured through the Finnish Transport Agency's C.22 subproject, which is called LIFE15 IPE/FI/004 CIRCWASTE FINLAND. The (Finnish Transport Agency's) C.22 subproject is part of the national CIRCWASTE LIFE-IP project, which consists of a total of 19 different subprojects. The C.22 subproject is a development project for using recovered materials in transport route construction.

For the purposes of this report, 'recovered material' means waste or waste-based products generated in industry, in demolitions or in recycling. The report also covers the use of technically poor soil refined using recovered materials. Several experimental road projects implemented between the 1980s and the 2010s have been reviewed to identify dozens of successful structures but also valuable lessons to be learnt from unsuccessful solutions in order to recognise the mistakes made in the past, high-risk structures and solutions that still require further development. Dozens of further sites were considered in selecting the ones eventually featured here; the rest were excluded because of the similarity of sites, a lack of monitoring or documentation, or other such reasons. Waste materials have occasionally been used in road structures in past decades, but the present report is confined to discussing materials that are still used and/or available today.

The use of recovered materials in earthworks has been studied in Finland at least since the 1970s, when the University of Oulu's Department of Road and Geotechnical Engineering experimented with the possibility of using steel industry slag in earthworks. A wide-ranging study of the recovery of coal fly ash was conducted at VTT at the turn of the 1980s, and another extensive study of the recovery and use of ash commissioned by the City of Helsinki was implemented over a long a period from the late 1970s to the 1990s. In addition to the above, there have been studies and recovery projects involving the use of other by-products and waste from industry, such as concrete aggregate, tyre-derived aggregate, gypsum, and so on. Research and experimental construction have led to the productisation of recovered materials for earthworks, including

concrete aggregate, blast furnace slag and certain types of steel slag. Productisation has led to the increased use of these recovered materials in earthworks.

Research data on the use of recovered materials as binders has been produced since the 1970s. Gypsum, for example, which is produced in large quantities in the formic acid production process, and pulverised fuel ash from the coal combustion process have been used with a commercial binding agent to form a hydraulically bonded structural layer to reduce structural frost heave damage in gravel roads. Recovered materials with binder properties have also been used as components in binding agents used in hydraulic stabilisation, reducing the need for a commercial binding agent.

The productisation of new recovered materials has not yet been completed. One thing that these materials often have in common is that they differ from natural soil and rock in terms of their characteristics, workability and environmental acceptability. The use of materials that differ from natural soil and rock and the use of unconventional structural solutions require special attention to be given to the standard of construction at all stages of the production chain. For example, the use in earthworks of materials of poorer quality than specified in the plans or studied in preliminary studies, inadequate compacting of structural layers and excess water in the compacted material always pose a risk in all earthworks, even when using ordinary natural materials. Bonded and stabilised recovered materials are challenging to work with, and the applicable guidelines and quality standards must be observed faithfully to ensure the successful completion and long-term stability of the structure.

The experiences, observations, conclusions, recommendations, etc. recorded here will form the foundation for the forthcoming publication on earthworks using recovered materials (the 'handbook'), in the writing of which the present report will be drawn upon for the development and presentation of functional construction components and structures made from recovered materials. In preparing the publication, the observations presented here will be examined further in a critical light, and experiential and reliable data on structures built using recovered materials will be drawn from other reports.

Esipuhe

Teollisuudessa muodostuvien sivutuotteiden ja jätteiden sekä heikkolaatuisten maa-ainesten hyödyntämistä tie- ja väylärakentamisen eri osa-alueilla on tutkittu Suomessa ainakin 1970-luvulta lähtien. Tehtyjen tutkimusten ja koerakenteiden avulla useat jätemateriaalit on voitu tuotteistaa maarakennuskäyttöön soveltuviksi materiaaleiksi tai tuotteiksi, mikä on vähentänyt tarvetta läjittää niitä kaatopaikoille. Useat materiaalit ovat kuitenkin edelleen tuotteistamatta, vaikka niiden potentiaali maarakennuskäytön kannalta on havaittu useissa eri tutkimuksissa ja rakennuskohteissa.

Tämän selvityksen tavoitteena on ollut selvittää väylärakentamisessa käytettyjen uusiomateriaalirakenteiden, jotka on toteutettu tuotteistamattomilla sekä osin tuotteistetuilla uusiomateriaaleilla, pitkäaikaistoimivuutta. Selvitykseen valitut kymmenet kohteet on dokumentoitu, seurattu ja raportoitu niin kattavasti, että niistä on saatavilla riittävästi tietoa rakenteiden pitkäaikaistoimivuuden arviointia varten.

Selvitys on tehty EU LIFE IP CIRCWASTE FINLAND C.22 -osahankkeen rahoituksella. Liikennevirastosta (Väylävirasto 1.1.2019 alkaen) ohjausryhmään ovat kuuluneet Laura Valokoski, Kari Lehtonen ja Sami Petäjä. Ohjausryhmään ovat kuuluneet lisäksi Leena Korkiala-Tanttu (Aalto yliopisto), Pauli Kolisoja (Tampereen teknillinen yliopisto) ja Elina Ahlqvist (Ramboll Finland Oy). Selvityksen on tehnyt Ramboll Finland Oy ja kirjoittajina ovat toimineet Ilari Harju, Taavi Dettenborn ja Juha Forsman sekä asiantuntijoina Harri Jyrävä ja Pentti Lahtinen.

Helsingissä huhtikuussa 2019

Väylävirasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	12
1.1	Selitteet ja merkinnät.....	15
2	UUSIOMATERIAALIRAKENTEET	17
2.1	Kantavat kerrokset	17
2.1.1	Sitomattomat kantavat kerrokset	17
2.1.1.1	Lentotuhkarakenteet.....	17
2.1.1.2	Betonimurskerakenteet	17
2.1.2	Sidotut kantavat kerrokset (stabiloitu uusiomateriaali)	19
2.1.2.1	Yt 14795 Vihtola–Jäkkö (Lappeenranta, 2006)	19
2.1.2.2	Yt 19552 Yli-Liakka–Kourilehto (Tornio, 1999)	22
2.1.2.1	Yt 11146 Degerby–Tyris (Inkoo, 2000).....	25
2.1.2.2	Mt 272 Ämttöö–Poikeljärvi (Pori, 1997).....	30
2.1.3	Stabiloidut kantavat kerrokset (stabiloitu murske)	31
2.1.3.1	Yt 11146 Degerby–Tyris (Inkoo, 2000).....	31
2.1.3.2	Kt 87 Rautavaara (2004).....	35
2.1.3.3	Yt 14547 Teuroinen (Elimäki, 2006).....	37
2.1.3.4	Yt 14800 Hanhikemppi (Lappeenranta, 2007)	41
2.1.3.5	Yt 16563 Seppola–Kaipola (Jämsä, 2010).....	43
2.1.3.6	Yt 16573 Hiidenmäki–Vaheri (Jämsä, 2010).....	46
2.1.3.7	Satamakenttä, Vuosaaren satama (2006).....	49
2.2	Jakavat kerrokset	50
2.2.1	Vt4 Tervola, massanvaihto (Keminmaa, 2005).....	50
2.2.2	14795 Vihtola–Jäkkö (Lappeenranta, 2006)	54
2.2.3	Mt 272 Ämttöö–Poikeljärvi (Pori, 1997).....	55
2.2.4	Haikala, kadut (Nurmijärvi, 1999)	58
2.2.5	Vt19 Seinäjoen itäinen ohikulkutie (Seinäjoki, 2015)	60
2.2.6	Tilanhoidajankaari, Viikin savikatu (Helsinki, 1997)	61
2.3	Suodatinkerrokset.....	64
2.3.1	Vt4 Tervola, massanvaihto (Keminmaa, 2005)	64
2.3.2	Mt 272 Ämttöö–Poikeljärvi (Pori 1997).....	64
2.4	Soratiet	65
2.4.1	Yt 14567 Metsäkulmantie (Koria, 1998 ja 2001).....	65
2.4.2	Mt 5341 Mustinsalo Sarkalahti (Leppävirta, 2002).....	67
2.4.3	Yt 13791 välillä Vt 11 - Ala-Pinsjö (Nokia, 2012).....	70
2.4.4	Kukkia Circler (Pälkäne, 2002-2005)	73
2.4.5	Tuhkatie-hanke (Karstula, 2011).....	80
2.4.6	Yt 11636 Knuters–Östersundom (Sipoo, 1997)	81
2.5	Kevennetyt penkereet.....	84
2.5.1	Parivaljakontie (Helsinki, 2001)	84
2.5.2	Kehä I, Meluvalli (Helsinki, 2016-2017).....	87
2.5.3	Vt 7 Porvoo–Koskenkylä (Porvoo, 2000)	89
2.6	Maapenkereet	91
2.6.1	Liikennekuormitetut maapenkereet.....	91
2.6.1.1	Vt 21 moreenipenger (Peera, 1986).....	91
2.6.1.2	Mt 941 Männikkövaara, moreenipenger (Posio, 1996).....	93
2.6.1.3	Vt19 ja Vt 3/Vt 8, sillan tulopenkereet (Seinäjoki 2014 ja Laihia 2017).....	94
2.6.1.1	Mt 741 Lövö–Sandsund, KLV (Pietarsaari, 2015)	95

2.6.2	Ei liikennekuormitetut maapenkereet	97
2.6.2.1	Kehä I, Sepänmäki, meluvalli (Helsinki, 2016-2018).....	97
2.6.2.2	Koirapuisto, Perkkää (Espoo 2012-2013)	99
2.7	Pohjamaan pinnan stabilointi	100
2.7.1	Mt 595, routivan moreenipohjamaan stabilointi (Kiuruvesi, 1996)	100
2.7.2	Mt 5950, routivan alusrakenteen stabilointi (Salahmi 1997).....	102
3	YHTEENVETO.....	105
3.1	Sitomattomat kantavat kerrokset	108
3.2	Sidotut kantavat kerrokset	109
3.2.1	Sidottu uusiomateriaali	110
3.2.2	Stabiloitu kantava kerros.....	113
3.3	Jakavat kerrokset	117
3.3.1	Sitomaton jakava kerros	117
3.3.2	Sidottu jakava kerros	118
3.4	Suodatinkerrokset.....	121
3.5	Soratiet	122
3.6	Kevennysrakenteet.....	127
3.7	Pengerrakenteet, liikennekuormitetut	128
3.8	Pengerrakenteet, liikennekuormittamattomat	129
3.9	Pohjamaan ja heikkolaatuisten rakennekerrosten stabilointi	131
4	JOHTOPÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	133
	LÄHTEET	135
	LIITTEET	
Liite 1	Rakennuskohteiden asfalttipäällysteen kunto	
Liite 2	Rakennuskohteiden PTM -mittaustulokset	
Liite 3	Rakennuskohteiden seurantatutkimustulokset	
Liite 4	Viikin savikadun pituusleikkaus	
Liite 5	Rakennuskohteiden rakentamisvaiheen valokuvia	
Liite 6	Haaransillan betonimurske- ja masuunihiekkarakenteet (Liminka, 2001)	

1 Johdanto

CIRCWASTE FINLAND LIFE15 IPE/FI/004 Liikenneviraston C.22 -osahanke (2016-2023) on uusiomateriaalien hyödyntämistä liikenneväylähankkeissa koskeva tutkimus- ja kehityshanke. Hankkeessa tehtävän tutkimus- ja kehitystyön tavoitteena on saada teollisuuden sivutuotteet ja jätteet, heikkolaatuiset leikkausmassat sekä purettavien, olemassa olevien maarakenteiden materiaalit ja niiden avulla toteutettavat sovellukset nykyistä tasavertaisiksi perinteisten luonnon maa- ja kiviaineksesta koostuvien rakenteiden kanssa. Tavoitteen saavuttamiseksi on tunnistettu tarpeelliseksi kehittää uusiomateriaaleja koskevaa ohjeistusta. Yksi laadittava julkaisu on ”*Uusiomateriaalit tierakenteissa*”, missä kuvataan uusiomateriaalien hyödyntämisen periaatteita eri rakennusosissa. Tuleva julkaisu tarkastelee materiaalien hyödyntämistä teknisten ominaisuuksien kannalta. Uusiomateriaalien ympäristökelpoisuutta koskevaa ohjeistusta on kehitetty muun muassa MARA -asetuksen ja sen soveltamisohjeen laadinnan yhteydessä. *Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteissa* on osa tulevan julkaisun tausta-aineistoa ja siinä kootaan yhteen uusiomateriaalirakenteiden rakentamisesta ja pitkäaikaiskestävyydestä saatuja kokemuksia.

Uusiomateriaalien hyödyntämistä maarakentamisessa on tutkittu Suomessa jo ainakin 1970-luvulta saakka, jolloin Oulun yliopiston tie- ja maarakennustekniikan laitos tutki masuunikuonan käyttöä tierakenteissa (Ehrola 1977). Ennen 2000-luvun vaihdetta maantieverkostolla uusiomaarakentamisen tutkimushankkeet sijoituivat suurelta osin sorateille. Soratieverkon rakennuskohteissa oli usein tavoitteena kehittää mahdollisimman kustannustehokkaita rakenneratkaisuja. Monasti tavoitteena oli rakenteen kantavuuden parantaminen siten, että olemassa olevan tierakenteen tasausviivaa ei tarvitsisi nostaa, jotta jyrkkäluiskaisilla teillä vältettäisiin ajoradan kapeneminen tai tarve leventää tierakennetta.

Tähän selvitykseen on koottu uusiomaarakentamista koskevan tutkimuksen kannalta keskeisimmiksi arvioituja kohteita. Kohteista on ollut tietoa käytetyistä materiaaliratkaisuista, mitoituksesta, suunnittelusta sekä rakentamisesta ja rakenteiden seurannasta. Osassa kohteista on käytetty uusiomateriaaleja, jotka on myöhemmin tuotteistettu maarakennuskäyttöä varten. Selvitykseen valittujen rakennuskohteiden käyttöhistoria on vähintään kolme vuotta. Selvityksessä on tarkasteltu pääasiassa uusiomateriaalien hyödyntämistä sellaisissa rakennuskohteissa, joissa materiaalien käyttö poikkeaa niiden suunnitteluohjeissa tai InfraRYL-julkaisussa esitetyistä periaatteista. Tällaisia ovat mm. päällysrakeneratkaisut, joissa hyödynnetään tuotteistetun uusiomateriaalin lisäksi myös muita uusiomateriaaleja. Tässä käsitellyjä kohteita valittaessa tutustuttiin kymmeniin muihinkin kohteisiin, jotka rajattiin pois tästä selvityksestä mm. kohteiden samankaltaisuuden, seurannan tai dokumentoinnin puutteiden, tms. syiden takia.

Yhteenvedo tarkasteltavista uusiomateriaaleista eri rakennuskohteissa ja materiaalin käyttö InfraRYL-julkaisun mukaisessa rakennusosassa on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Uusiomateriaalien sijoittuminen InfraRYL-julkaisun mukaisiin rakennusosiin tässä selvityksessä käsitellyissä kohteissa.

Materiaali	Kohde ja rakenne
Betonimurske (BeM)	Yt 11594, Rusutjärvi–Paijala, Jakava ja kantava kerros Vt 3, Sasi–Metsäkylä, Kantava kerros Vt 4, Järvenpää–Mäntsälä, Kantava kerros Vuorenhaltijantie, Haikala, Jakava kerros Rataniitynkujja, Lasikaari, Jakava kerros Lahdenperänkatu, Jakava kerros Vt 4, Haaransilta, Kantava kerros
Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuona (JpKu)	Vt 19 Seinäjoen itäinen ohikulkutie, Jakava kerros (Jalan- kulku- ja pyöräilyväylä) E18 Hamina–Vaalimaa, Meluvalli
Lentotuhka (LT)	Yt 19552, Kantava kerros Mt 272, Jakava kerros Vt 19 Seinäjoen itäinen ohikulkutie, pengertäyte Mt 741 KLV, pengertäyte Useita kohteita, Stabiloinnin sideaineseos Soratien, Karstula, Kulutuskerroksen murskeseos E18 Hamina–Vaalimaa, Meluvalli
Pohjatuhka (PT)	Mt 272, Suodatinkerros E18 Hamina–Vaalimaa, Meluvalli
Masuunihiekka (MaHk)	Vuorenhaltijantie, Haikala, Suodatinkerros/Tukikerros Parivaljakontie, Suodatinkerros/Tukikerros
Masuunikuonajauhe	Useita kohteita, stabiloinnin sideaineseos
Rikastushiekka (RiHk)	Suodatinkerros sekä stabiloituna jakavassa kerroksessa
Rikinpoisto lopputuote (RPT)	Useita kohteita, stabiloinnin sideaineseos
Teräskuona (TeKu)	Yt 19552, Stabiloitu kantava kerros Vt 4 Keminmaa, Jakava- ja suodatinkerros
Kuitu-/Siistausliete (KSa)	Yt 13791 ja Kukkia-Circler, Jakava kerros (lentotuhkan kanssa seostettuna ja sementillä stabiloituna)
Suotojäte (SJ)	Useita kohteita, Soratien kulutuskerroksen murskeseos
Fosfokipsi	Pt 16207, Stabiloituna soratien murskekerroksen alla Useita kohteita, Stabiloinnin sideaineseos
Moreeni	Vt 21 Kilpisjärvi, Liikennekuormitettu penger Mt 941, Lii- kennekuormitettu penger
Heikkolaatuinen leikkaus- massa	Sepänmäen meluvalli, Stabiloitu pohjasedimentti (täyttö) Viikin savikatu, Stabiloitu savi (tukikerros)

Selvityksen tavoitteena on tarkastella, mihin rakennusosiin eri uusiomateriaalit soveltuvat ja millaisilla reunaehdoilla niitä on mahdollista käyttää. Selvityksessä on esitetty myös rakennuskohteita, joissa käytetyt uusiomateriaalirakenteet eivät ole toimineet suunnitellulla tavalla. Näiden kohteiden osalta selvityksessä on pyritty arvioidaan, että olisiko kyseinen rakenneratkaisu kehitettävissä siten, että sen avulla voidaan toteuttaa onnistuneita rakenteita.

Selvitykseen valittujen uusiomaarakennuskohteiden pitkäaikaiskestävyyttä on arvioitu tarkastelemalla rakenteiden toimivuutta InfraRYL -julkaisun luokitteluissa rakennusosissa. Tarkastelun yhteydessä tuotettu aineisto on esitetty

tässä selvityksessä ja sen liiteaineistossa. Tierekisterin osoitejärjestelmään si-
dottu mittausaineisto on muunnettu vuonna 2017 julkaistun tieosoitteiston mu-
kaiseksi.

Taulukossa 2 on esitetty selvityksessä käytetyt tarkastelutavat uusiomateriaa-
lirakenteiden toimivuuden arvioinnissa.

*Taulukko 2. Rakenteen toimivuuden arvioinnin yhteydessä tarkastellut tekijät
/ ominaisuudet ja niiden tarkastelutapa.*

Toimivuuden arvioinnissa tarkas- teltava tekijä/ominaisuus	Tarkastelutapa
Pituushalkeamat	Silmämääräinen arviointi
Poikkihalkeamat	Silmämääräinen arviointi
Pakkaskatkot	Silmämääräinen arviointi
Urautuminen	PTM -mittaustulokset
Kantavuus	PPL-mittaustulokset (Lämpötilakorjatut)
Päällystevauriot	Silmämääräinen arviointi
Tasaisuus	PTM -mittaustulokset
Painumat	Silmämääräinen arviointi
Päällysteen tartunta	Silmämääräinen arviointi / Rakennetutki- mus
Kuivatus	Silmämääräinen arviointi
Lujuuskehitys	Rakennetutkimus
Tasaisuus	PTM-mittaustulokset / Silmämääräinen arvio
Tien suolaushistoria	Talvihoitoluokka
Liikenteen tyyppi (hidas / nopea)	Nopeusrajoitus
Päällysteen vesitiiviys	Päällystetyyppi / Päällystevauriot

Taulukossa 2 esitettyjen asioiden lisäksi uusiomateriaalirakenteista selvitetään
käytetyn rakenteen käyttötarkoitus tai suunnitteluperuste (esim. kantavuus, ke-
vennys). Rakenteissa havaittaville vaurioille pyritään selvityksen yhteydessä
tunnistamaan vaurioitumiseen johtaneet syyt. Sorateille rakennettujen usio-
materiaalirakenteiden kunnon arvioinnissa tarkastellaan runkokelirikon esiinty-
mistä ja syitä sen muodostumiselle. Sorateiden kunnon arvioinnissa käytetty
haittaindeksiin perustuva kuntoluokitus ei sovellu lyhyiden uusiomateriaalira-
kenteiden kunnon arvioimiseen, koska luokitus lasketaan tieosan kokonaispituu-
den, runkokelirikopituuden ja keskivuorokausiliikennemäärän perusteella.

Yhteenveto uusiomateriaalirakenteiden toimivuudesta eri rakennusosissa on
esitetty yhteenveto -kappaleen taulukoissa. Taulukoihin on koottu rakenteiden
teknisen toimivuuden ja pitkäaikaiskestävyyden kannalta oleelliset tekijät,
jotka on luokiteltu taulukossa 3 esitettyjen perusteiden mukaisesti. Luokituspe-
rusteiden "-" merkki ilmentää tekijän negatiivista vaikutusta, kun sillä arvioidaan
rakenteiden toimintaa. Vastaavasti "+" merkki arvioinnissa kuvastaa toimivuu-
teen vaikuttavan tekijän positiivista vaikutusta rakenteen toimintaan. Uusioma-
teriaalirakenteiden toimintaan vaikuttaa lisäksi sellaisia tekijöitä, joita ei voida
arvioida tässä selvityksessä tehdyn tarkastelun perusteella. Näitä tekijöitä on
koottu taustaselvityksen jatkotutkimustarpeet -kappaleeseen.

Taulukko 3. Rakenteiden toimivuuden arvioinnissa käytetyt luokitusperusteet.

Luokitus	Selite
+++	Erinomainen
++	Hyvä
+	Tyydyttävä
-	Huono
--	Erittäin huono
ei mit.	Ei mitattu / Arvioitu

1.1 Selitteet ja merkinnät

Vaihtoehtoisia rakennusmateriaaleja, kutsutaan tässä selvityksessä yhteisnimityksellä "uusiomateriaalit". Näiden materiaalien nimitykset ovat muuttuneet vuosikymmenten kuluessa ja esim. Tiehallinnon 2007 julkaistu uusiomateriaaleja käsittelevä ohje oli nimeltään "Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa", vaikka se käsittelee myös muita materiaaleja kuin tämän hetken lainsäädännön määrittelemiä sivutuotteita. Tässä selvityksessä esiteltävät kohteet ovat eri vuosikymmeniltä ja niiden kohdekohtaisissa raporteissa käytettäviä termejä ei ole päivitetty kaikilta osin. Näin ollen on mahdollista, että tässä selvityksessä käytetään paikoin nimityksiä, jotka eivät vastaa nykyistä käytäntöä.

Uusiomateriaalirakentamista koskevissa suunnitelmissa ja raporteissa on esitetty erilaisia termejä sekä nimityksiä käytetyille rakenteille, materiaaleille ja tutkimuksille. Tässä julkaisussa käytetyt lyhenteet ja selitteet on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Tässä julkaisussa käytettyjen uusiomateriaalirakentamista koskevien eräiden termien selitteet (materiaalit ja muut termit).

Materiaalit	
Fosfokipsi	Fosforihapon tuotannossa sivutuotteena syntyvä dihydraattikipsi.
Jätteenpolton pohjakuona (JpKu)	Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuona.
Kuitusavi (KSa)	Massa- ja paperiteollisuudessa syntyvä kuitu- ja täyteainepitoinen liete.
Kuitutuhka (KT)	Kuitu-/siistauslietteen (kuitusavi) ja lentotuhkan seos, joka on stabiloitu sementillä tai muulla kaupallisella sideaineella.
Lentotuhka (LT)	Savukaasuista erotettava tuhka- ja polttoaineina käytetään kivihiiltä, turvetta sekä puuperäisiä ja muita kiinteitä biopolttoaineita tai lajiteltuja jättepohjaisia polttoaineita. Luokitus polttoainekoostumuksen mukaan kivihiilen polton-, seospolton- sekä rinnakkaispolton tuhkiin.
Masuunihiekka (MaHk)	Granuloitu masuunikuona.
Masuunikuona (MaKu)	Raudan valmistuksen alkuvaiheessa masuunissa muodostuvasta emäksisestä silikaattisulatteesta nopealla jäähtytyksellä valmistettava tuote.
Palavan kiven tuhka (PKT)	Palavan kiven (öljyliuske) polton lentotuhka (Eesti energia).
Pohjatuhka (PT)	Kiinteän fossiilisen- tai biomassapohjaisen polttoaineen arina- ja pölypolttokattilan polttotason alapuolelle muodostuva tuhkamateriaali.
Rapidsementti	Nopeasti kovettava portlandseossementti. CEM II/A-LL 52,5 N.
Rengasrouhe (RR)	Kierrätetyistä renkaista palasiksi leikattu materiaali.
Rikastushiekka (RiHk)	Kalsiitin erottamisessa muodostuva rikastushiekka.
Rikinpoiston lopputuote (Rikinpoistotuote, RPT)	Kivihiilenpolton savukaasujen sisältämän rikkidioksidin erotusprosessissa (usein puolikuivamenetelmä) muodostuva kalkkipitoinen materiaali.
Suotokakku, (Suotojäte)	Kalsiumkloridin valmistuksessa muodostuva sivutuote, joka sisältää kalsiumkloridia ja muita kalsiumyhdisteitä.
Teräskuona (TeKu)	Terässulattokuona.
Ylissementti	Ylissementti. CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N.
Muut termit	
Jäädytys-sulatuskoe (JS)	Materiaalin pakkasrapautumiskestävyyttä simuloiva laboriotesti
Laakerikerros	Päällysteen ja sidotun kantavan kerroksen väliin rakennettu murskekerros.
Paantaminen	Pohja- tai pintaveden virtauksen estymisestä aiheutuva veden virtaaminen jään, lumen tai tien pinnalle, jossa se jäätyy. Paannejäähä muodostuu usein tien sivuosiin sivukaltevassa maastossa kylmissä olosuhteissa, kun tierakenteen alueella routa on tunkeutunut syvemmälle maaperään kuin lumen peittämällä alueella.
Sidottu / stabiloitu uusiomateriaali	Sideaineella (esim. sementti) tai sideaineen ja uusiomateriaalin seoksella stabiloitu uusiomateriaali.
Stabiloitu kantava kerros	Uusiomateriaalin ja kaupallisen sideaineen seoksella stabiloitu kiviaines.

2 Uusiomateriaalirakenteet

2.1 Kantavat kerrokset

2.1.1 Sitomattomat kantavat kerrokset

2.1.1.1 Lentotuhkarakenteet

Yt 19552 Yli-Liakka–Kourilehto (Tornio, 1999)

Kappaleessa 2.2.2.2 esitetyssä yt 19552 rakennuskohteessa tutkittiin stabiloitujen kantavien kerrosten lisäksi lentotuhkan hyödyntämistä kantavassa kerroksessa stabiloimattomana. Vaikka rakentamisessa käytetty tuhka oli stabiloimattomana, niin tuhka oli kuitenkin huomattavan reaktiivista ja sisälsi lujittumisominaisuuksia siten, että työmaalle saapuneesta massasta valmistettujen koekappaleiden 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen yksiakσιαalinen puristuslujuus oli yli 3 MPa. Lujuus oli jopa lähes samaa suuruusluokkaa kuin sementillä stabiloitun tuhkan koekappaleilla (Jokinen et al. 1999).

Rakentamisessa käytetty tuhka oli Kemin Stora Enson lentotuhkaa, mikä oli varastoitu sekoituspaikalle keskimäärin 1-3 vuorokautta (maksimissaan viikko) ennen sekoitusta. Siilosta purkamisen yhteydessä lentotuhka oli kostutettu tavoiteltuun 15 % pitoisuuteen. Varastoidun lentotuhkan vesipitoisuutta seurattiin sekoitustyön yhteydessä tehdyssä laadunvalvonnassa.

2.1.1.2 Betonimurskerakenteet

Betonimurske on nykyään tuotteistettu uusiomateriaali, jonka käytöstä tien päällysrakennekerroksissa Tiehallinto on julkaissut ohjeen vuonna 2000. Betonimurskerakenteiden käytön avulla voidaan saavuttaa pitkän ajan (yli 10 vuotta) kuluessa 15–25 % suurempia päällysteen päältä mitattuja kantavuuksia verrattuna tavallisella kiviaineksella tehtyyn rakenteeseen. Kantavuuden kehittymiseen vaikuttaa betonimurskeen lujittuminen, mikä perustuu betonimurskeen sisältämän sitoutumattoman sementin lujittumisreaktioon. Lujittuminen on voimakkainta rakentamista seuraavina vuosina ja hidastuu noin 2–5 vuotta rakentamisen jälkeen (Dettenborn 2013, Dettenborn 2015).

Dettenborn tutki diplomityössään betonimursketta sisältävien päällysrakenteiden pitkäaikaistoimivuutta kantavuusmittausten avulla. Taulukossa 5 on esitetty Dettenbornin työssä esitetyt betonimurskekohteet sekä Nurmijärven (Haikala) ja Limingan (Haarasilta) kohteet. Kohteiden betonimurskerakenteet sekä kantavuusmittausten tulokset on esitetty taulukossa 6 ja kuvassa 1.

Taulukko 1. Seurantatutkimusten betonimurskerakenteet (Dettenborn 2013, muokattu sekä täydennetty Haikalan ja Haaransillan rakennuskohteilla).

Kohde	Rak. vuosi	Sijainti	Rakenne
Rusutjärvi-Paijala	1995	Yt 11591 1/365 - 1420	BeM 0-50/0-70 (Kantava ja Jakava) ¹⁾
Sasi-Metsäkylä	1996	Vt 3 203/4900 - 204/400	BeM 0-50, 440/300 mm (Kantava ja Jakava) ²⁾
Järvenpää-Mäntsälä	1998	Vt 4 109/1250 - 3925 (ajor. 1)	BeM 0-50, 150 mm (Kantava)
Haikala (Nurmijärvi)	1999-2000	Vuorenhaltijantie (Kirkkotie-Velhotie)	BeM 0-50, 150 mm (kantava) ³⁾
Lasikaari (Pirkkala)	2000-2001	Lasikaari välillä Lentoasemantie-Sorkkalantie	BeM 0-50, 800 mm (Jakava)
Lahdenperänkatu (Tampere)	1996	Lahdenperänkatu (Viinikan- katu-Jokipohjantie)	BeM 0-50/~80, 220 mm (Jakava) ⁴⁾
Haaransilta (Liminka)	2001	Kiertotie sekä Vt4 / Vt8 kierto- liittymä	BeM 0-50 (kantava) ⁵⁾

¹⁾ Plv. 365-730 ja 1040-1420, kantava BeM 0-50 170 mm ja jakava BeM 0-70 200 mm. Plv. 730 - 1040, kantava BeM 0-50 200 mm ja jakava BeM 0-70 200 mm (koerakenteet tiellä Nummenväylä / Paijalantie).

²⁾ BeM 0-50 440 mm, Ontelolaattamurske. BeM 0-50 300 mm, Ratapölkkykurske.

³⁾ Seurantatutkimukset raportoitu Ekoinfra -projektin raportissa vuonna 2002.

⁴⁾ Plv. 50 - 220, BeM ~0-80 (Seulomaton). Plv. 220 - 470, BeM 0-50 (Seulottu).

⁵⁾ Haaransillan rakennuskohteet on esitetty liitteessä 6.

Taulukko 2. Kohteiden VT4, Rusutjärvi-Paijala, VT3, Lahdenperänkatu ja Lasikaari betonimurskerakenteet. (Dettenborn 2014)

		Päällysteen paksuus (mm)	Kantavan kerroksen paksuus (mm)	Jakavan kerroksen paksuus (mm)	Suodatinkerroksen paksuus (mm)	
A	1	210	160	I/a	-	910 (4)
	2	210	160	I/a	-	1210 *
	3	220	190	I/a	-	910 **
B	1	120	220	I/a	230	I/b 610 (4)
	2	90	230	I/a	190	I/b 620 (4)
	3	130	200	I/a	200	I/b 450 (4)
C	1	130	320	II/a	590	(4) -
	2	120	410	I/a	680	(4) -
D	1	160	110	(1)	260	II/c 600 (4)
	2	170	120	(1)	280	II/a 460 (4)
E	1	50	50	(1)	-	800 II/a
R	A	210	170	(1)	-	1340 (4)
	C	130	210	(2)	300	(3) 440 (4)
	D	170	220	(1)	-	660 (4)
	E	50	50	(1)	-	800 II/a

* Louherakenne

(a) #0/50 mm

(b) #0/70 mm

(c) #0/80 mm

I & II BeM-luokka

** Betonimurskerakenne

(1) Kalliomurske #0/35 mm

(2) Murskesora #0/65 mm

(3) Murskesora #0/100 mm

(4) Sora, hiekka

(A) Vt 4 Järvenpää-Mäntsälä (1998)

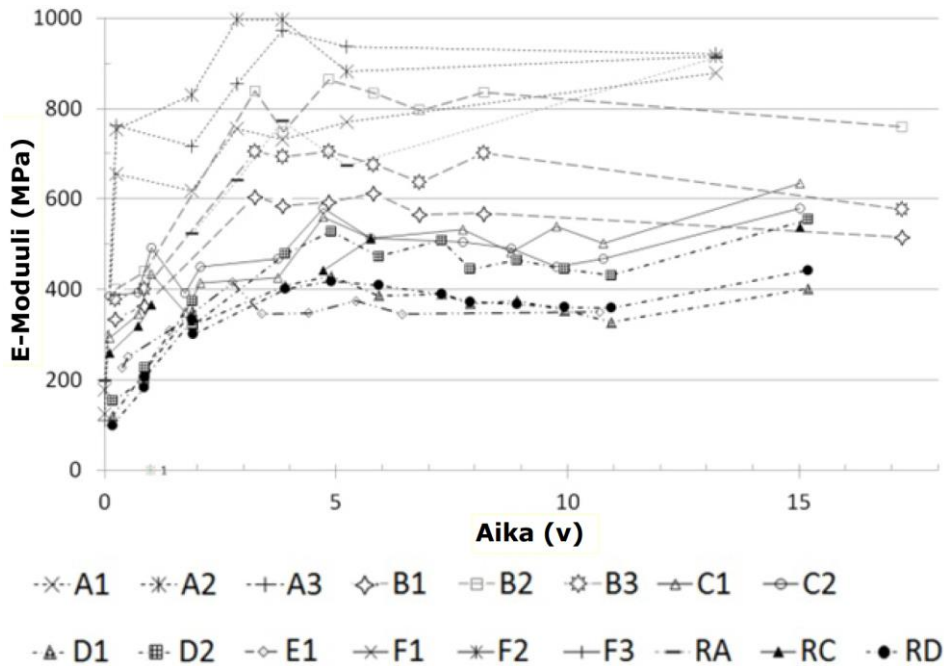
(B) Rusutjärvi-Paijala

(C) Vt 3 Sasi-Metsäkylä (1996)

(D) Lahdenperänkatu (1996)

(E) Lasikaari (2000-2001)

(R) Referenssirakenteet



Kuva 1. Pudotuspainolaitteella päällysteen päältä mitatut lämpötilakorjatut kantavuudet rakentamisen jälkeisen ajan suhteen esitettynä. Rakenteet ja selitteet on esitetty taulukossa 6. (Dettenborn 2014)

2.1.2 Sidotut kantavat kerrokset (sidottu uusiomateriaali)

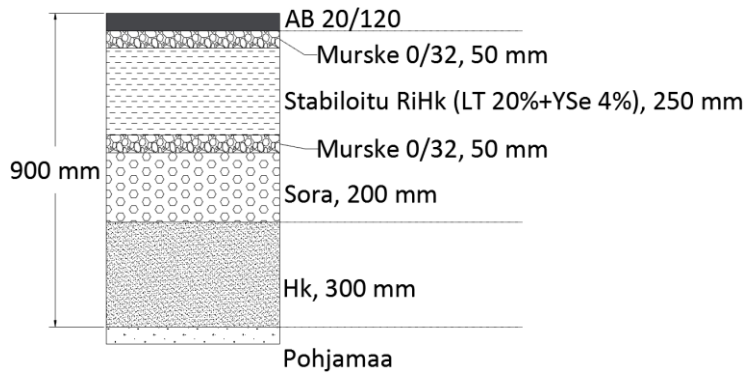
2.1.2.1 Yt 14795 Vihtola-Jäkkö (Lappeenranta, 2006)

Lappeenrannan kaupungin alueella sijaitsevan Vihtolan yksityistien rakenteen parantamisen yhteydessä tie liitettiin osaksi erikoiskuljetusten reittiverkkoa ja muutettiin yhdystieksi. Tie oli ennen rakenteen parantamista leveydeltään 5...7 metriä. Taulukossa 7 on esitetty kohteen tiestö- ja rakennetietoja. Kohteen uusiomateriaalirakenteet olivat osa Ecoroad-hanketta.

Kohteessa rakennettiin kaksi erilaista uusiomateriaalipäällysrakennetta, joista ensimmäinen sijaitsee tierekisterin osoitevälillä 14795 1/2550-2950 (kuva 2). Kuvassa esitetyllä rikastushiekkarakenteella pyrittiin saavuttamaan vastaava kuormituskestävyyssisäys kuin perinteisellä noin 1000 mm paksuisella murskerakenteella. Vertailurakenteena toimivat murskerakenneosuudet sijaitsevat kohteen tieosoteväleillä 14795 1/0-1513, 14795 1/1763 - 2550 ja 14795 1/2950-3488.

Taulukko 3. Yt 14795. Tiestö- ja rakennetietoja.

Poikkileikkaus (pääll. lev/ajor.lev metriä)	7/6
Kuormitusluokka	5 AB
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	436/33
Päällystetyyppi	AB 20/120
Nopeusrajoitus (km/h)	60
Tasausmurske	Kyllä (50 mm)
Talvihoitoluokka (nykyinen)	III



Kuva 2. Yt 14795 Vihtola–Jäkkö. Suunniteltu rikastushiekka-tuhkarakenne (5AB) (rakenne 1), tieosoteväli 14795/1/2550-2950. RiHk = rikastushiekka, LT = lentotuhka ja YSe = yleissementti (Jokinen et al. 2008, muokattu).

Rakentaminen

Rikastushiekkarakenteessa käytetyt materiaaliseokset valmistettiin aumasekoittimella ennen niiden kuljettamista rakennuskohteelle. Sekoitustyötä varten oli ohjeistettu, että materiaalit tulisi kuljettaa työmaalle levitystä ja tiivistämistä varten kolmen tunnin kuluessa valmistamisesta, koska sementin reaktiot käynnistyvät välittömästi veden lisäyksen jälkeen. Rikastushiekka-tuhka-sementti-materiaaliseokset saatiin toimitettua työmaalle 3,5–5 tunnin kuluessa sekoitustyön aloittamisesta, jolloin alkuperäisen ohjeistuksen mukaista toimitusaikavaatimusta ei saavutettu.

Rikastushiekkarakenteen levitys toteutettiin kuorma-auton, kaivinkoneen ja pyöräkuormaajan avulla, mikä poikkesi työtapaohjeistuksessa esitetystä tiehöylän tai asfaltinlevittimen käyttämisestä materiaaliseoksen levittämisessä. Poikkeavan levitystavan arvioitiin aiheuttavan stabiloidun rakennekerroksen epätasaista tiivistymistä tien poikkisuunnassa. Rakenteen tiivistäminen toteutettiin yksivalssiyrällä. Ohjeistuksen mukaan rakenteen lopullinen tiivistys tuli tehdä murskekerroksen päältä kuuden tunnin kuluessa levittämisestä. Tieosotevälillä 14795 1/500-670 lopullista tiivistämistä oli jatkettu vielä 10–12 tuntia levitystyön aloittamisesta, minkä on arvioitu olevan vahingollinen rakenteen laadun kannalta. Stabiloidun rikastushiekkarakenteen ylä- ja alapuolelle suunniteltujen 50 mm paksuisten tasausmurskekerrosten rakentaminen koettiin työmaalla haastavaksi ja tasauskerrosten paksuus kasvatettiin 100 mm:in rakentamisen yhteydessä. Stabiloidun rikastushiekkarakenteen sisältäneen päällysrakenteen toteutunut kokonaispaksuus oli noin 1000 mm. (Jyrävä et al. 2007)

Seurantatutkimukset

Elokuussa 2007 tehdyissä rakennetutkimuksissa porattujen rakennenäytteiden yksiaksiaaliset puristuslujuudet vaihtelivat 1,7-4,9 MPa:n välillä. Laboratorion suhteituskokeissa materiaaliseoksen lujuustaso jäädytys-sulatuskokeen jälkeen oli 1,5 MPa:n suuruusluokkaa. Rakentamisessa esiintyi poikkeamia työohjeesta, mutta niiden vaikutus ei ollut suoraan nähtävissä yksittäisten rakennenäytteiden lujuuksissa. Poikkeamien arvioitiin vaikuttavan kuitenkin rakenteen kokonaisvaltaiseen lujuuteen sekä kestävyYTEEN. Keväällä 2007 tehdyissä kantavuusmittauksissa uusiomateriaalirakenteen oikean ja vasemman keskilinjan (1 metriä tien reunasta) kantavuuksien keskiarvo oli yli 400 MPa. Reunaosilla kantavuuksien keskiarvo oli noin 270 MPa, eli huomattavasti alhaisempi kuin rakenteen keskilinjalla. Havainto on hyvin tavanomainen kapeilla rakentamattomilla teillä, joissa tierakenteen reunaosien kantavuus on usein heikompi ohuemmista rakennekerroksista johtuen.

Rakennuskohteen kunto tarkastettiin heti rakentamista seuraavana keväänä 15.5.2007, jolloin uusiomateriaalirakenteen päällysteessä havaittiin poikki- ja saumahalkeamia. Liitteen 1 kuvassa 71 on esitetty rakennuskohteen päällysteen kunto vuosina 2009 ja 2016, jolloin rakenteet ovat kolmen ja kymmenen vuoden ikäisiä. Kuvasta on havaittavissa stabiloidun rikastushiekkarakenteen päällysteen voimakas vaurioituminen vuosien 2009–2016 välillä. Routivalle pohjamaalle rakennettujen olemassa olevien, ohuiden tierakennekerrosten päälle tehty rakenne ei ollut kestänyt epätasaisesta routanoususta eikä liikenteestä aiheutuvaa kuormitusta. Uusiomateriaalirakenteen päällysteeseen on muodostunut epätasaisista routanousuista johtuvia pituus- ja poikkihalkeamia, jotka ovat vuosien saatossa muuttuneet verkkohalkeamiksi. Rakenteen poikkisuunnassa esiintyvä kantavuusvaihtelu lisää lujaan laattamaiseen stabiloituun rakenteeseen kohdistuvia taivutusvetojännityksiä, jotka voivat liian suuriksi kasvaessaan aiheuttaa kerrokseen halkeamia.

Liitteen 2 kuvassa 84 on esitetty vuoden 2015 PTM-mittausten urasyvyys, IRI-tasaisuus- ja harjanteen korkeus. Uusiomateriaalirakenteen mittaustulokset eivät poikkea merkittävästi tieosuuden murskerakenteiden mittaustuloksista. Ainoastaan kaistakohtaista urasyvyyttä tarkasteltaessa voidaan havaita rikastushiekkasuuden oikean kaistan voimakkaampi urautuminen vasempaan kaistaan verrattuna. Sama havainto tehtiin vuonna 2007 tehdyissä mittauksissa, jotka on raportoitu vuoden 2008 raportissa. Oikean kaistan voimakkaampi urautuminen arvioitiin selittyvän työnaikaisista tiivistysongelmista ja työmenetelmistä (Ramboll 2008 b).

Kohteessa oli havaittu 15.1.2008 eroavaisuuksia tien pinnan jää- ja lumipeitteissä. Stabiloidun rikastushiekkarakenteen osuudella tien pinta oli havaittu olevan polanteella. Kappaleessa 2.2.2 käsiteltyyn yt 14795 rakennuskohteen toisen uusiomateriaalirakenteen (stabiloitu kuitutuhka, jakava kerros) osuudella tien pinta oli vastaavasti jäinen. Vertailurakenteiden kohdalla tien pinta oli sula (Valjakka 2008). Yt 14795 kohdetta varten tehtyjen laboratoriotutkimusten raporteissa (Jyrävä, 2006 a ja 2006 b) stabiloidun kuitutuhkan lämmönjohtavuus on kuvattu olevan alhaisempi kuin murskeella tai soralla, joten sen on arvioitu toimivan myös eristävänä kerroksena. Stabiloidun rikastushiekan lämmönjohtavuutta ei ole esitetty laboratoriotutkimuksissa.

Valjakan (2008) tekemät havainnot tien pinnan jää- ja lumipeitteiden eroavaisuuksista rakennuskohteen eri osuuksilla voivat selittyä niin sanotulla kuuraliukkaus -ilmiöllä. Kuuraliukkautta on mahdollista muodostua, kun tien pinnan lämpötila on alhaisempi kuin ilman kastepistelämpötila, jolloin ilman kosteus tiivistyy tien pintaan. Siellä missä rakennekerrosmateriaalin lämmönjohtavuus eroaa muista, voi tien pinnan lämpötila olla erisuuruinen kuin muilla osuuksilla. Watn et al. (2004) ja Liikenneviraston (2011) mukaan tierakenteeseen asennetun tehokkaan eristeen (esim. EPS, XPS, kevytsora, ...) päälle tulee rakentaa vähintään 700 mm paksu murskekerros kuuraliukkauden estämiseksi. Yt 14795 kohteen selvästi edellä mainittujen eristeitä paremmin lämpöä johtavien uusiomateriaalikerrosten yläpuolisten kerrosten paksuudet olivat 100 ja 300 mm.

2.1.2.2 Yt 19552 Yli-Liakka–Kourilehto (Tornio, 1999)

Tornion kaupungin pohjoispuolelle välille Yli-Liakka–Kourilehto vuonna 1999 rakennettu uusiomateriaalirakenne sijoittuu tierekisterin paaluvälille 19552 1/1450-2050. Lähtötilanteessa ennen rakenteen parantamista tierakenteen kantavuus oli heikko, päällysteessä esiintyi verkkohalkeamia ja vauriokartoituksessa koeosuudella havaittiin reunapainumia, reikiä sekä poikkihalkeamia. Taulukossa 8 on esitetty kohteen tiestö- ja rakennetietoja.

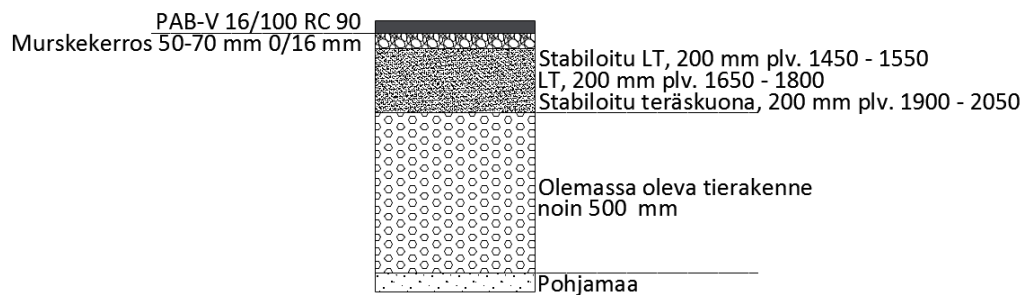
Kohde Yt 19552 toteutettiin yhtenä alueellisena hankkeena osana *"Teollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttö tienrakentamisessa"* -kehitysprojektia, jota koordinoivat Tielaitos ja Viatek Oy. Kohteessa tutkittiin Kemin ja Tornion alueella syntyvien teollisuuden jätteiden ja sivutuotteiden soveltuvuutta kantavan kerroksen materiaaliksi sekä stabiloituina että sidottuina rakenteina kolmella eri osuudella (kuva 3), joiden väliset osuudet rakennettiin perinteisinä luonnonkiviainesrakenteina.

Kantavan kerroksen yläosaan rakennettiin murskekerros, jonka tarkoituksena oli suojata kantavan kerroksen uusiomateriaalikerrosta ennen päällystämistä, tasata rakennusalueen päällystystöitä varten ja suojata päällystettä alapuolisista rakenteista peräisin olevilta vaurioilta.

Kohteessa suoritettiin maatutkaus, pintavaaitus, kantavuusmittaukset ja vauriokartoitus ennen rakentamista. Näistä saatuja tuloksia hyödynnettiin rakenteen parantamisen suunnittelu- ja mitoitustyössä. Kuvassa 4 on esitetty ennen rakentamista tehtyjen mittausten tulokset, rakenteiden sijoittuminen ja rakentamisen jälkeen tehdyt kantavuusmittaukset.

Taulukko 4. Yt 19552. Tiestö- ja rakennetietoja.

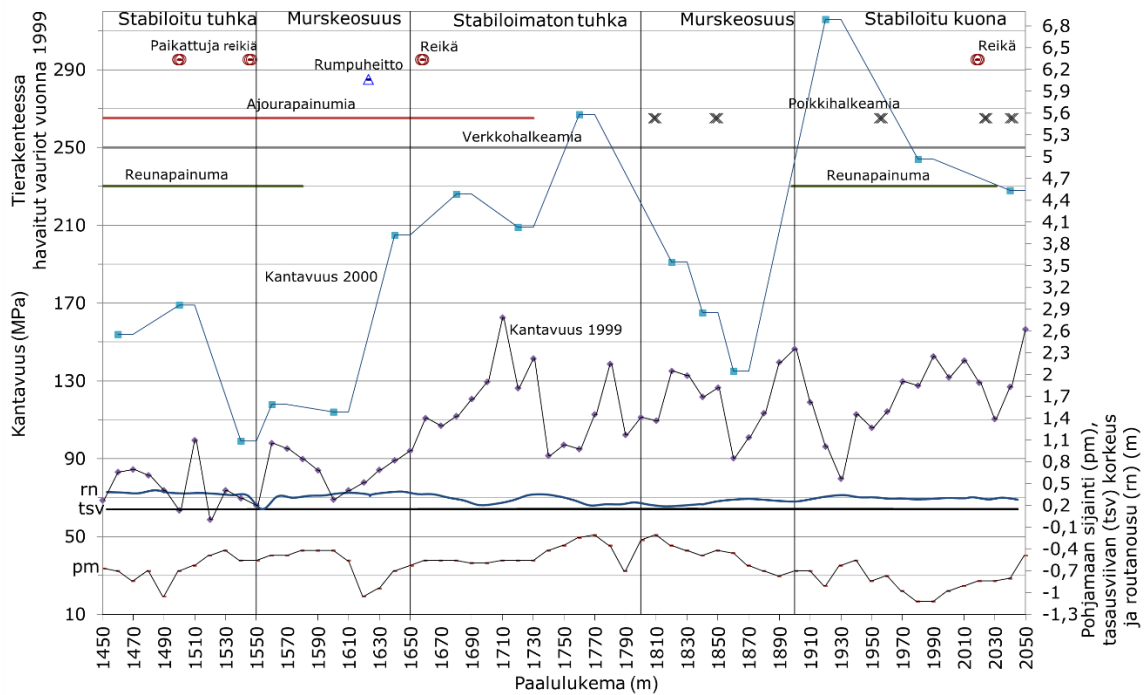
Päällysteleveys (m)	5,5
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	293/23
Päällystetyyppi	PAB-V 16/100 RC90
Nopeusrajoitus (km/h)	60
Tasausmurske	Kyllä (50 mm)
Talvihoitoluokka	II



Kuva 3. Yt 19552. Uusiomateriaalirakenteiden periaatekuva (Jokinen et al. 1999, muokattu).

Kuvasta 4 on havaittavissa, että paaluvälillä 1450-1650 sijaitsevat stabiloitu tuhkarakenne ja murskerakenne sijoittuvat kantavuudeltaan osuuden heikoimpiin alusrakennelosuhteisiin. Tällä osuudella mitattu routanousu on rakennuskohteen muihin osuuksiin nähden suurinta.

Paaluvälillä 1650-2050 alusrakenteen kantavuus on alkupään osuutta suurempi. Vanhasta rakenteesta ennen rakenteen parantamista mitatun routanousun suuruus on stabiloidun teräskuonarakenteen osuudella suurempaa kuin viereiselle paaluvälille 1800-1900 sijoittuneella murskerakenteella. Stabiloimattoman tuhkarakenteen osuudella paaluvälillä 1650-1800 mitattu routanousu on verrattain epätasaista. Tällä osuudella päällysrakenteen kantavuus on ollut koko osuuden korkein ennen rakenteen parantamista.



Kuva 4. Pt 19552. Kantavuus, päällystevauriot, routanousu ja olemassa olevan päällysrakenteen paksuus ennen rakenteen parantamista sekä rakenteen kantavuus rakenteen parantamisen jälkeen (Jokinen et al. 1999 ja Ramboll 2008 a, muokattu).

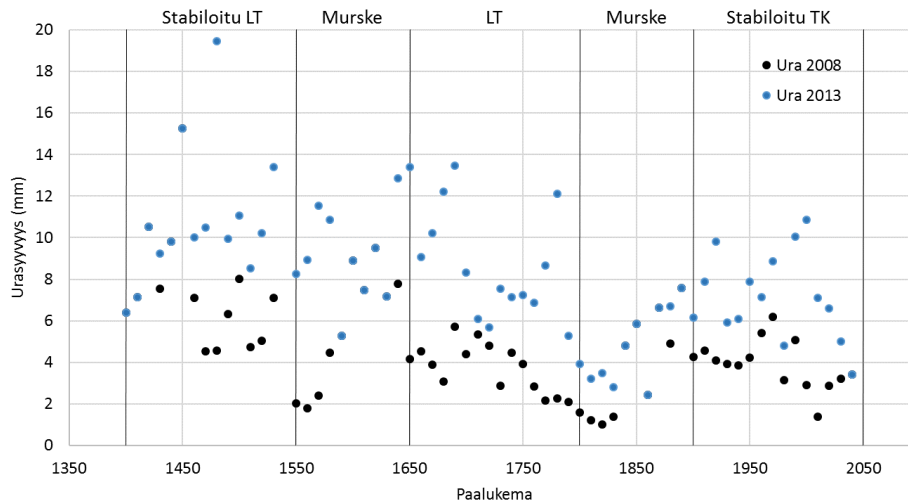
Seurantatutkimukset

Liitteen 1 kuvassa 70 on esitetty valokuvasarja kohteen päällysteen kunnosta vuosina 2007 ja 2015. Vuoden 2007 valokuvat on otettu seurantatutkimuksen yhteydessä (Jokinen 08/2007). Vuoden 2015 kuvat on poimittu Tiekuva.com -palvelusta mahdollisimman tarkasti samoista sijainneista kuin vuonna 2007 otetut valokuvat.

Valokuvista on havaittavissa, että stabiloitujen rakenteiden (pl 1480 ja 1950) päällysteessä esiintyy leveitä pituussuuntaisia halkeamia. Halkeamien määrä päällysteessä on lisääntynyt näillä osuuksilla vuosien 2007 ja 2015 välisenä aikana. Stabiloimattoman lentotuhkarakenteen paalulukemalla 1700 ei ole havaittavissa merkittäviä päällystevaurioita vuonna 2007 otetussa valokuvassa, jolloin rakenne on ollut kahdeksan vuotta vanha. Vuoden 2015 valokuvassa ko. osuuden päällysteessä on havaittavissa verkkohalkeamia, mikä viittaa päällysteen deformaantumiseen. Vuosien 2007 ja 2015 valokuviin perustuvan kuntoarvioinnin perusteella paalulukemilla 1600 ja 1850 sijaitsevien murskerakenteiden päällysteessä ei ole havaittavissa selkeitä vaurioita.

Kohteen Yt 19552 päällysteen urasyvyyttä on mitattu vuosina 2008 ja 2013 toteutetuissa PTM-mittauksissa (kuva 5). Urasyvyyden mittaustulosten perusteella kohteen kuntoluokka on hyvä/erittäin hyvä. Urautumisessa ei esiinny merkittäviä poikkeamia eri rakenteiden välillä. Kohteen loppuosan murskerakenteen ja stabiloidun teräskuonarakenteen alueella urasyvydet ovat alhaisempia kuin kohteen alkuosan stabiloidun lentotuhkan ja murskerakenteen osuudella.

Näiden tulosten perusteella rakentamisessa käytetyn lentotuhkan stabiloinnilla ei ole saavutettu merkittävää teknistä etua stabiloimattoman lentotuhkan käyttöön nähden.



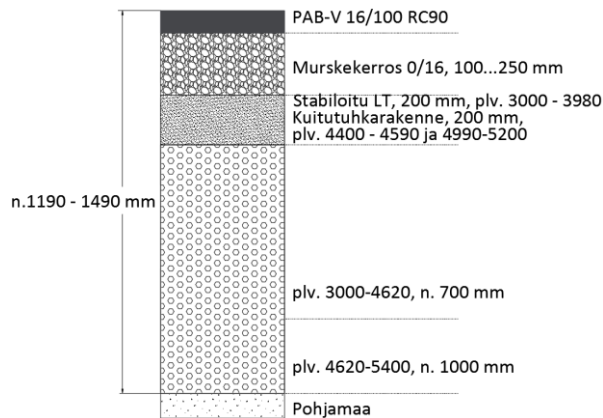
Kuva 5. Yt 19552. PTM-mittausten urasyvyyshavainnot 2008 ja 2013 (Liikennevirasto 2017, muokattu). LT = lentotuhka ja TK = teräskuona.

2.1.2.3 Yt 11146 Degerby–Tyrise (Inkoo, 2000)

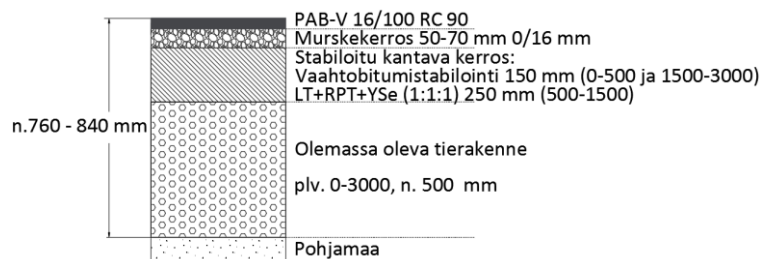
Kohteessa Yt 11146 oli tavoitteena tutkia uusiomateriaalien käyttöä stabiloituna rakenteena. Rakennuskohde liittyi kehityshankkeeseen "Teollisuuden sivutuotteet tierakentamisessa", jonka tavoitteena oli (Tielaitos 2000):

- Löytää uusia menetelmiä tieverkon parantamiseen.
- Testata teollisuuden sivutuotteiden/jättemateriaalien käyttöä tierakenteissa todellisella hankkeella.
- Testata ja kehittää uusiomaarakentamisen tuotantoprosessia.
- Tuottaa lähtötietoja Valtioneuvoston asetukseen
- Testata laadunvarmistus koko ketjulle.

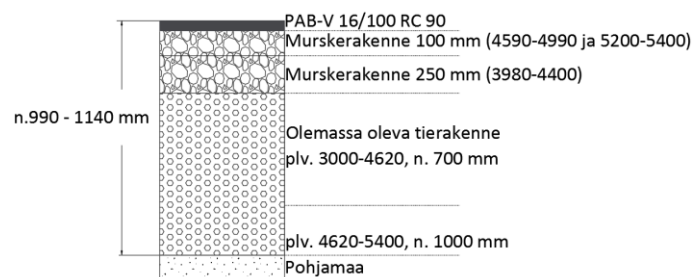
Kohde Yt 11146 sijoittuu tierekisterin paaluvälille 1/0–5400. Osuudelle rakennettiin yhteensä viisi erilaista sidottua tai stabiloitua kantavan kerroksen rakennetta (kuva 6). Vaahtobitumistabilointi sijoittuu yhdessä lujittuvia uusiomateriaaleja hyödyntävän kantavan kerroksen stabiloinnin kanssa osuuden alkupäähän, jossa olemassa olevat päällysrakenteet ovat ohuita (kuva 7). Ohuet päällysrakenteet kasvattavat sidottuihin rakenteisiin kohdistuvaa routanousukuorimitusta. Luonnonkiviaineksella toteutetuissa vertailurakenteissa olemassa olevat päällysrakenteet ovat alkupään osuutta paksumpia (kuva 8). Yt 11146 oli ennen rakenteen parantamista SOP-pintainen tie, jossa esiintyi kantavuus- ja kuivatuspuutteita, jyrkkiä ojaluiskia sekä päällystevaurioita. Rakenteen parantamisen jälkeen muuttuneet Yt 11146 tiestötiedot on esitetty taulukossa 9.



Kuva 6. Pt 11146. Sidottujen uusiomateriaalirakenteiden periaatekuva (Ahlqvist et al. 2000, muokattu). Kuvassa on esitetty päällysrakenteen kokonaispaksuus eri paaluväleillä.



Kuva 7. Pt 11146. Stabiloitujen kantavien kerroksien periaatekuva (Ahlqvist et al. 2000, muokattu). Kuvassa on esitetty päällysrakenteen kokonaispaksuus eri paaluväleillä.



Kuva 8. Yt 11146. Vertailurakenteiden periaatekuvat (Ahlqvist et al. 2000, muokattu). Kuvassa on esitetty päällysrakenteen kokonaispaksuus eri paaluväleillä.

Taulukko 5. Yt 11146. Tiestö- ja rakennetietoja.

Päällysteleveys (m)	6,5
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	509/32
Päällystetyyppi	PAB-V 16/100
Nopeusrajoitus (km/h)	60
Tasausmurske	Stabiloidut kantavat kerrokset: 50-100 mm Stabiloidut uusiomateriaalit: 100-250 mm
Talvihoitoluokka	II ¹⁾

1) Luokan II teiden liukkaudentorjunta tehdään hiekoituksen ja pintakarhennuksen avulla

Rakentaminen

Uusiomateriaalirakenteet toteutettiin lokakuussa 2000 ja vertailurakenteet marraskuussa 2000. Kohde jäi rakentamisajankohtaa seuranneen talven ajaksi murskepiteiseksi (kulutuskerros 100 mm) rakenteeksi ja se päällystettiin rakentamista seuraavana kesänä 2001. Rakentaminen toteutui projektisuunnitelmassa esitetyn aikataulun mukaisesti (Tielaitos 2000).

Uusiomateriaalien varastointi ja sekoitus toteutettiin viiden kilometrin etäisyydellä kohteelta sijaitsevalla vanhalla louhimoalueella. Sekoitustyö toteutettiin pyöräkuormaajan ja kaivinkoneeseen liitetyn sekoituskärjen avulla (kuva 9). Sekoitustyössä esiintyi ongelmia materiaalin vesipitoisuuden säädössä sekä homogeenisen sekoitustyön ja riittävän tuotantokapasiteetin saavuttamisessa. Sekoitusalueen pohja myös pehmeni sateiden ja työmaaliikenteen vaikutuksesta, mikä vaikeutti työn toteutusta.



Kuva 9. Yt 11146. Uusiomateriaalien sekoitustyön eri vaiheita. a) sideaineiden punnitseminen ja annostelu sekoituskaukaloon, b) sideaineseoksen esisekoitus kauhakuormaajalla, c) sideaineseoksen sekoitus Maamyrä -sekoitinlaitteella ja d) valmiin sideaineseoksen kuormaaminen kuljetettavaksi rakennuskohteelle (Ahlqvist et al. 2000).

Stabiloidun kantavan kerroksen tiivistämisessä esiintyi ongelmia, jotka johtuivat heikosti kantavasta, hienoainespitoisesta ja liian kosteasta vanhasta tierakenteesta. Tien reunaosilla ei ollut myöskään riittävää tukea tiivistystyötä varten, vaan reunat antoivat periksi ja myötäsivät ojaa kohden.

Rakentamisessa tutkittiin materiaalseosten erilaisia levitys- ja tiivistysmenetelmiä. Valmiin massan levitystyössä kokeiltiin asfaltinlevittimen käyttöä, mistä luovuttiin, sillä käytössä olleen koneen avulla ei saatu levitettyä riittävän paksua kerrosta yhdellä levityskerralla. Muilta osin materiaalin levitys suoritettiin tiehöylän avulla. Tiehöylällä esitiivistettiin materiaalia ajamalla edestakaisin levitetyn materiaalikerroksen päällä. Nykyisen tietämyksen perusteella tätä työtapa ei suositella käytettävän, sillä se voi aiheuttaa rakenteen tiiveyden vaihtelua tien poikkisuunnassa.

Rakenteiden tiivistystyössä käytettiin 10 tn yksivalssijyrää. Tiivistystyön yhteydessä eräät materiaalseokset tarttuivat jyrän valssiin kiinni, mikä voidaan välttää käyttämällä jyrän valssinpuhdistusjärjestelmää. Stabiloitujen rakenteiden lopullinen tiivistäminen toteutettiin tiivistettävän kerroksen päälle levitetyn murskekerroksen päältä. Kyseisen työtavan havaittiin parantavan tiivistystyön laatua.

Stabiloiduilla lento- ja kuitutuhka -osuuksilla esiintyi rakenteiden pehmenemistä (kuva 10) välittömästi rakentamista seuraavina päivinä, joten rakenteita jouduttiin korjaamaan. Pahimmin pehmenneillä osuuksilla tuhkakerroksen päälle levitettiin suodatinkangas, jonka päälle rakennettiin murskekerros. Pehmenemisen syytä on arvioitu rakentamisraportissa seuraavasti (Ahlqvist et al. 2000):

- Rakentamisajankohta
- Materiaalseosten epähomogeenisuus
- Rakenteiden liian korkea vesipitoisuus
- Alusrakenteen hienoainespitoisuus
- Työmaaliikennekuormitus



Kuva 10. Yt 11146. Stabiloitujen lento- ja kuitutuhkaosuuksien pehmenemistä vauriot tiivistämisestä seuraavina päivinä ja vaurioiden korjaustyö. (Ahlqvist et al. 2000).

Seurantatutkimukset

Kohteessa on tehty seurantatutkimuksia rakentamista seuraavina vuosina. Tie-osoiteväli 11146 1/1993–4009 on päällystetty uudelleen PAB-B 16/90 -päällysteellä vuonna 2006 (Liikennevirasto 2017), mikä tulee huomioida seurantatutkimustuloksia arvioitaessa.

Tarkkio (2014) tutki diplomityössään kohteen rakenteiden kuntoa ja vaurioitumista. Liitteessä 3 on esitetty Tarkkion tutkimuksen yhteydessä tehtyjen kantavuusmittausten, rakennenäytteenottotutkimusten ja vauriokartoituksen tulokset (kuvat 85-90). Kuvassa 90 esitetystä vauriokartoitustuloksissa on rajattu punaisella vuonna 2006 uudelleenpäällystetty osuus. Uudelleenpäällystämisen vaikutus rakenteen kantavuuteen voidaan havaita stabiloidulla lentotuhkarakenteella, jossa vuoden 2013 kantavuusmittaustulokset ovat keskimäärin 61 MPa suuremmat kuin vuonna 2004 (kuva 88). Kantavuuden kehittymistä ei voida selittää tässä tapauksessa pelkästään lentotuhkan pitkäaikaisella lujuuskehityksellä, koska kantavuus on kasvanut varsin paljon ja lentotuhkakerroksesta porattujen rakennenäytteiden yksiaksiaaliset puristuslujuustulokset ovat olleet vuonna 2013 heikompia kuin vuonna 2004.

Seurantatutkimusten (Jyrävä 2004) mukaan stabiloidun lentotuhkarakenteen kohdalla tien pinta oli useammin jäinen kuin muiden rakenteiden osuuksilla. Tämän arvioitiin johtuvan stabiloidun tuhkarakenteen lämmöneristävyysominaisuudesta.

Liitteen 1 kuvassa 72 on esitetty päällysteen kunto vuosina 2003, 2010 ja 2017. Stabiloitu lentotuhkarakenne ja osa vaahtobitumistabiloinnista on uudelleenpäällystetty vuonna 2006, jolloin eroavaisuuksia päällysteen vaurioitumisesta eri rakenteilla ei voida suoraan vertailla valokuvien perusteella. Tämän johdosta valokuvia päällysteen kunnosta ei ole poimittu uudelleenpäällystetyltä osuudelta. Toisaalta vuodelle 2006 ajoittunut uudelleenpäällystämisen tarve kuvaa näiden rakenteiden toimivuutta rakennuskohteen olosuhteissa. Stabiloidun tuhkarakenteen uudelleenpäällystämistarpeen on aiheuttanut routiminen sekä reunapainumisen aiheuttamat päällystevauriot.

Routiminen ja reunapainumat ovat aiheuttaneet päällystevaurioita kaikilla rakenteilla. Liitteen 1 kuvassa 72 esitetystä vaahtobitumistabilointiosuudella tien reunojen huono kantavuus, painuminen ja myötääminen ojiin ovat aiheuttaneet voimakkaita vaurioita päällysteeseen. Hydraulisella sideaineella stabiloiduilla rakenteilla tien reunaosien heikko kantavuus on aiheuttanut päällysteen pituus-suuntaista halkeilua ja painumia. Vauriot eivät ole kuitenkaan yhtä voimakkaita kuin vaahtobitumistabilointiosuudella. Hydraulisesti stabiloitu jäykkä laattainen rakenne on kestänyt reunaosiltaan vaahtobitumistabilointia paremmin. Toisaalta vaahtobitumistabilointi on toimintaperiaatteeltaan erilainen kuin hydraulisella sideaineella stabiloitu rakenne. Sen tehtävänä on toimia joustavana päällysrakennekerroksena, jolloin se sietää epätasaisesta routanoususta aiheutuvia muodonmuutoksia. Näin ollen sen on myös mahdollista deformatua, mikä on havaittavissa kuvan reunapainumista.

Hydraulisella sideaineella stabiloiduilla rakenteilla (lento- ja kuitutuhka sekä stabiloitu kantava kerros) esiintyy runsaasti pituussuuntaisia halkeamia. Murskerakenneseudella halkeamien ja painumien määrä on muita rakenneseuksia vähäisempi. Tuhkarakenteen kohdalla halkeilun määrän havaittiin olevan jo vuoden 2004 seuranta-tutkimuksissa niin runsasta, ettei rakenteen laadun voitu katsoa vastanneen suunniteltua, vaikka rakennäytteistä mitatut lujuustasot pääosin ylittävätkin tavoitetaso. Sekä tuhka- että kuitutuhkarakenteiden toteutunut laatu ei ole vastannut täysin suunniteltua (Jyrävä 2004).

2.1.2.4 Mt 272 Ämttöö–Poikeljärvi (Pori, 1997)

Kohde Mt 272 Ämttöö–Poikeljärvi on esitelty kappaleessa 2.2.3. Yhtenä rakennuskohteen tutkimusaiheena oli stabiloidun kivihiilenpolton lento- ja pohjatuhkaseoksen soveltuminen tien päällysrakenteen kantavaan kerrokseen (kuva 28 rakenne b). Laboratoriokokeiden suhteituskokeiden perusteella kohteella valittiin käytettäväksi lento- ja pohjatuhkan seossuhdetta 40/60, joka stabiloitiin yleisementillä (CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N, normaalisti kovettuva portland-seos-sementti). Sementtiä lisättiin 5 paino-% tuhkamateriaaliseoksen kuivamassasta laskettuna.

Käytetyllä materiaaliseoksella saavutettiin laboratoriotutkimuksissa 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen 7,2 MPa puristuslujuus, mikä aleni jäädytys-sulatuskokeen jälkeen 20 % ja 27 % kahdella vertailukoekappaleella. Materiaaliseokselle tehtiin laboratorioissa lisäksi routanousukoe, jossa ei havaittu routimisen aiheuttamaa turpoamaa. Routanousukokeessa käytettyjen kappaleiden tiiveysasteet olivat 92,4–93,8 %. Vesipitoisuudet ennen kyllästämistä olivat 12,0–12,3 %, kyllästämisen jälkeen 18,0–19,7 % ja routanousukokeen jälkeen 20,2–21,7 %. Tiiviyssastevaatimus rakenteessa oli 95 %.

Rakentaminen

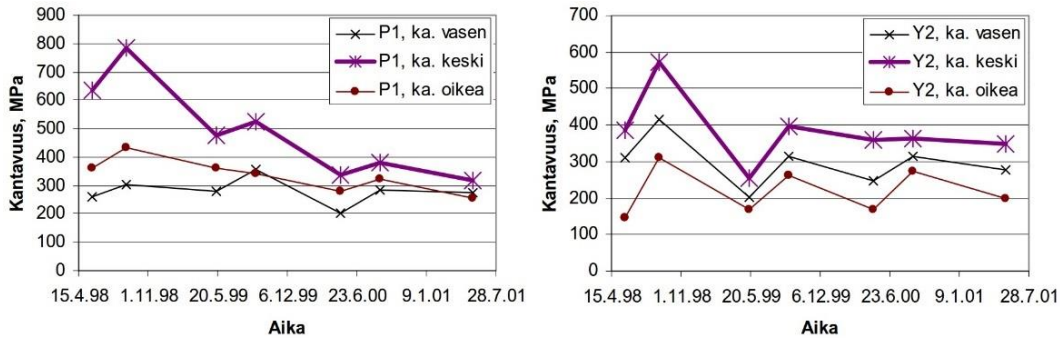
Kantavan kerroksen stabiloidun lento-/pohjatuhkakerroksen rakentamisessa toteutunut keskimääräinen tiiveysaste oli 82 % (vaatimus 95 %). Rakentamisen aikana työmaalla valmistettujen koekappaleiden yksiaksiaalinen puristuslujuus jäi myös alle tavoitelujuustason (6 MPa), ollen noin 4 MPa suuruusluokkaa.

Seurantamittaukset

Liittymäalueille Y2 ja P1 rakennetun stabiloidun kantavan kerroksen seuranta-mittaustulokset on esitetty liitteen 3 taulukossa 65. Seurantamittaustuloksista on havaittavissa, että sidotun kantavan kerroksen tuhkarakenteen alueella routan syvyys on ollut samaa luokkaa kuin rakennuskohteen bitumistabilointirakenteen alueella.

Kuvassa 11 on esitetty kantavuusmittausten tulokset aikavälillä 1998–2001. Kantavuuksissa on havaittavissa selkeää alenemaa, mikä on tosin tasoittumassa vuosien 2000–2001 seurantamittausten aikana. Myös keski- ja reunaosien väliset kantavuserot ovat lähentyneet tosiaan 2000–2001 mittauksissa. Juvankoski & Kivikoski ovat arvioineet reuna- ja keskiosien kantavuserojen syyksi liittymäalueiden jyrkkien luiskien asettumisen vuosien saatossa, mikä on vaikuttanut reunaosien kantavuuksiin. Vuoden 1998 pudotuspainolaitemittaustulosten takaisinlaskennan perusteella kantavan kerroksen sementtistabiloidun lento- ja pohjatuhkan moduuliksi on määritetty noin 800–1000 MPa (Juvankoski & Kivikoski 2001).

Kantavuuksien alenemaan on voinut vaikuttaa myös rakenteissa alhaiseksi jääneiden tiiveysasteiden vaikutus materiaalien rapautumis- ja routimisherkkyyteen. Tämä havaittiin pudotuspainolaitemittausten ohella myös vuosi rakentamisen jälkeen tehdyissä koeporauksissa, joissa otettiin näytteitä stabiloiduista rakennekerroksista.



Kuva 11. Mt 272. Liittymien P1 (vasen) ja Y1 (oikea) alueille rakennettujen rakenteiden kantavuusmittaustulokset (Juvankoski & Kivikoski 2001, muokattu).

2.1.3 Stabiloidut kantavat kerrokset (stabiloitu murske)

Tässä kappaleessa on esitetty päällystetylle tieverkolle toteutettuja rakenteen parantamiskohteita, joissa parantamismenetelmänä on ollut kantavan kerroksen stabilointi. Rakennuskohteille toteutetut stabiloinnit ovat *Tierakenteen suunnitteluohjeen* (Tiehallinto 2004) mukaisia hydraulisia stabilointeja. Stabilointien pääasiallisena sideaineena on käytetty erilaisia sementtejä, joiden sekaan on lisätty sitoutuvia uusiomateriaaleja kuten esimerkiksi lentotuhkaa, rikinpoistotuotetta ja kipsiä. Kohteilla käytettyjen stabilointimassojen koostumuksen suunnittelu on perustunut kokeelliseen suhteitukseen (vrt. *Päällysrakenteen stabilointi*, Tiehallinto 2007 b).

Sideaineseoksessa käytettyjen uusiomateriaalien avulla on pyritty korvaamaan osa kaupallisen hydraulisen sideaineen (esim. sementti) tarpeesta siten, että stabiloinnissa saavutettavan lopputuloksen laatu ei heikkenisi. Sideaineseoksessa käytettävät uusiomateriaalit ovat olleet pääsääntöisesti rakennuskohteen lähellä muodostuvia, itselujittuvia teollisuuden sivutuotteita, joiden ympäristökelpoisuus rakennuskäyttöä varten on varmistettu suunnittelun yhteydessä. Osalla rakennuskohteista on edellytetty uusiomateriaalien käytöstä johdettavaa ympäristöseurantaa, joiden tuloksia ei tämän selvityksen yhteydessä ole tarkasteltu.

2.1.3.1 Yt 11146 Degerby-Tyris (Inkoo, 2000)

Perustiedot Inkoon kohteesta on kuvattu tämän selvityksen kappaleessa 2.1.2.1. Kohteessa toteutettiin lisäksi kuvan 7 mukaiset rakenteet, joissa stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineena oli olemassa olevan tierakenteen kantavan kerroksen murske, mihin jyrseinsekoitettiin myös vanhat päällystekerrokset. (Ahlqvist et al. 2000)

Laboratorion suhteituskokeita varten olemassa olevasta tierakenteesta otettiin murskenäyte 0-0,2 metrin syvyydeltä suunnitelman paalulukemalta 1635. Suhteituskokeita varten murskenäytteestä poistettiin > 16 mm rakeet. Tutkittavissa sideaineseoksissa käytettiin Espoon Sähkön ja Vantaan Energian kuivaa lentotuhkaa, Helsingin Energian sillovarastoitua rikinpoistotuotetta sekä kaupallisia sideaineita (1:1:1, 7 %). (SCC Viatek Oy 2001)

Rakentaminen

Suhteituskokeiden perusteella stabiloinnin sideaineseokseksi valittiin Helsingin Energian kuivan lentotuhkan, rikinpoistotuotteen ja yleissementin seos (1:1:1). Lentotuhka ja rikinpoistotuote toimitettiin valmiiksi sekoitettuna suoraan rakennuskohteelle. Rakentamisessa käytetty sideaineseoksen kokonaismäärä oli 7 % stabiloitavan murskeen kuivapainosta, mikä vastasi 40 kg/m² levitettävää määrää. Sideainemäärä oli liian suuri levitettäväksi yhdellä kerralla käytössä olleella levityskalustolla, joten lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seos ja yleissementti levitettiin sekä jyrsinsekoitettiin erillisinä työvaiheina. Stabiloinnissa tarvittava vesi lisättiin jälkimmäisessä jyrsinsekoitusvaiheessa. Liitteen 5 kuvassa 104 on esitetty kuvia edellä mainituista rakentamisvaiheista. (Ahlqvist et al. 2000)

Suhteituskokeiden perusteella stabilointityölle asetettiin taulukossa 10 esitetyt laatuvaatimukset.

Taulukko 6. Yt 11146. Stabiloidun kantavan kerroksen rakentamiselle asetetut laatuvaatimukset. (Ahlqvist et al. 2000)

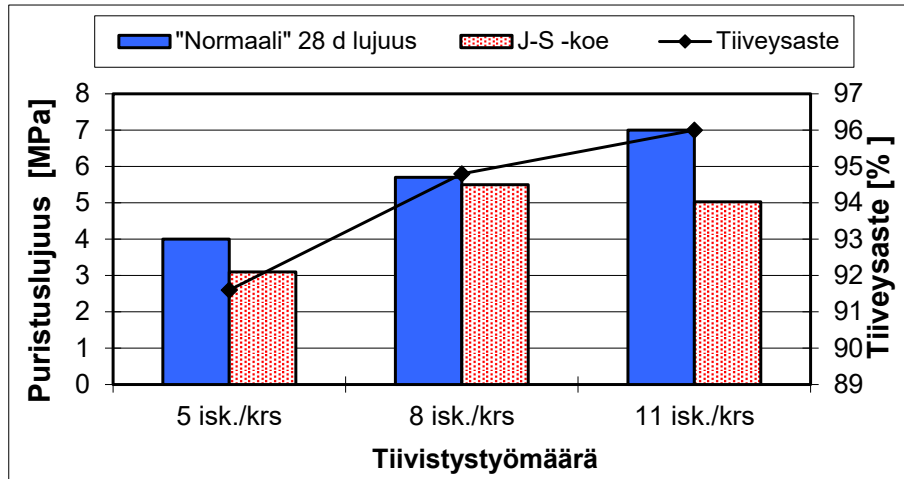
Sideaine + murskeseoksen vesipitoisuus (%)	5,5
Tiiveysaste (%)	95
Kuivairtotiheys ρ_d (kg/m ³)	2140
Rakennekerrospaksuus (mm)	250

Rakentamisen aikana saavutettavaa tiiveyttä ja toteutunutta vesipitoisuutta valvottiin Troxler-säteilymittauslaitteella. Tavoitteena ollutta 95 % tiiveysastetta ei rakentamisessa saavutettu, vaan tiiveysaste jäi tasolle 90-92 %. Rakentamisen laadunvalvonnassa stabiloitavan kerroksen vesipitoisuutta mitattiin tien keskilinjalta ja reunaosilta. Vesipitoisuuden vaihteluväli kaikkien mittaustulosten osalta oli 3,6-7,8 % ja keskiarvo 5,6 %. Kaikkein epähomogeenisimmissa poikkileikkauksissa vesipitoisuus vaihteli tien keski- ja reunaosien välillä ± 3 %.

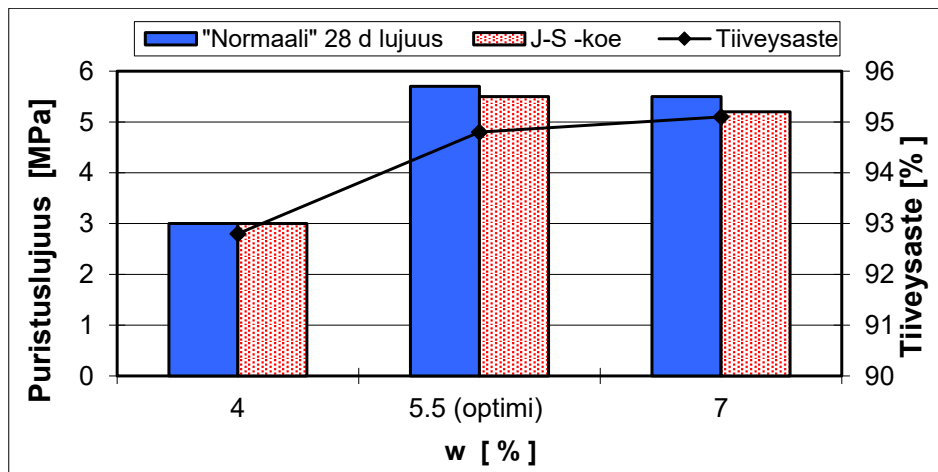
Tiivistystyötä ohjaavissa koetiivistyksissä havaittiin, että rakenteen lopullinen tiiveys saavutettiin 5-6 jyräyskerran jälkeen. Suurempi tiivistystyömäärä ei parantanut saavutettavaa tiiveysastetta, vaikka sen arvioitiin parantavan stabiloitavan rakenteen alapuolisten kerrosten tiiveyttä. Suurempaa tiiveysastetta tavoiteltaessa olemassa oleva tierakenne antoi periksi ja märästä alusrakenteesta "pumppautui" vettä yläpuolisiin rakennekerroksiin. (Ahlqvist et al. 2000)

Kuvassa 12 on esitetty tiiveysasteen vaikutus saavutettavaan 28 vuorokauden lujuteen ja jäädytys-sulatuskokeen (J-S -koe) jälkeen mitattuun lujuteen yt 11146 materiaaliseoksilla. Kuvasta havaitaan, että rakentamisessa saavutetulla 90-92 % tiiveysasteella materiaalin lujuustaso on noin 30 % alhaisempi kuin 95 % tiiveysasteella laboratoriossa saavutettu lujuustaso.

Rakentamisessa mahdollisesti esiintyvän vesipitoisuuden vaihtelun vaikutusta materiaaliseoksen lujuuteen simuloitiin laboratorion suhteituskokeissa (kuva 13). Kuvasta 13 on havaittavissa, että 1,5 % suunniteltua 5,5 % optimivesipitoisuutta alhaisemmaksi jäävä vesipitoisuus heikentää yt 11146 materiaaliseosten tapauksessa stabiloitavan materiaaliseoksen lujuutta noin 35 %. Rakentamisen laadunvalvonnan pistemäisistä vesipitoisuusmittaustuloksista 75 % sijoittui vesipitoisuuden vaihteluvälille 4,5-6,5 %. Vesipitoisuus rakenteessa täytti asetetut vaatimukset kohtalaisen hyvin, kun huomioidaan olemassa olevan tien rakennekerron epähomogeenisuus ja alusrakenteen ominaisuuksien vaihtelu.



Kuva 12. Yt 11146. Stabiloitavan materiaaliseoksen tiiveysasteen vaikutus saavutettavaan lujuuteen. Sideaineseos Helenin LT + RPT + sementti 1:1:1, 7 % stabiloitavan murskeen kuivapainosta. (SCC Viatek Oy 2001)



Kuva 13. Yt 11146. Stabiloitavan materiaaliseoksen vesipitoisuusvaihtelun vaikutus saavutettavaan tiiveysasteeseen ja lujuuteen. (SCC Viatek Oy 2001)

Seurantatutkimukset

Rakentamisen aikana jyrsinsekoitetusta materiaaliseoksesta tiivistettiin työmaalla seurantaan varten koekappaleita, käyttäen laboratorion suhteituskokeiden mukaista Proctor-työmäärää (5 kerrosta, 8 isku/kerros). Taulukossa 11 on esitetty työmaakoekappaleista laboratoriossa määritetyt tutkimustulokset. Työmaan seurantakoekappaleiden lujuus on jäänyt huomattavasti alhaisemmaksi kuin suhteituskokeiden perusteella oli odotettavissa. Seurantakoekappaleiden kuivairtotiheys ja tiiveysaste ovat lähes tavoitetasolla. Seurantakoekappaleiden vesipitoisuudet ovat sen sijaan tavoitetasoa alhaisempia. Paalulukemien 1450 ja 950 B -kappaleiden vesipitoisuudet ovat hyvin lähellä tavoitetasoa. Kyseisten kappaleiden lujuustaso ei kuitenkaan poikkea muiden seurantakoekappaleiden lujuuksista. Seurantakoekappaleista määritettyjen tutkimustulosten perusteella voidaan arvioida, että sideaineseos on joko sekoittunut epähomogeenisesti rakenteeseen tai sen lujittumisominaisuudet eivät ole olleet odotetun kaltaisia.

Litteen 3 kuvassa 85 on esitetty stabiloidun kantavan kerroksen kantavuuden seurantamittaustulokset. Kantavuuden kehittymisen perusteella stabiloitu rakenne on lujittunut rakenteessa. Tarkkion (2014) diplomityön yhteydessä tehtiin koekuoppia ja poranäytteenottoa. Rakennetutkimusten yhteydessä toistui aiemmissa seurantatutkimuksissa tehty havainto siitä, että rakenteesta ei saatu porattua ehjiä lieriön muotoisia rakennenäytteitä, vaan kappaleet murenivat porauksen yhteydessä.

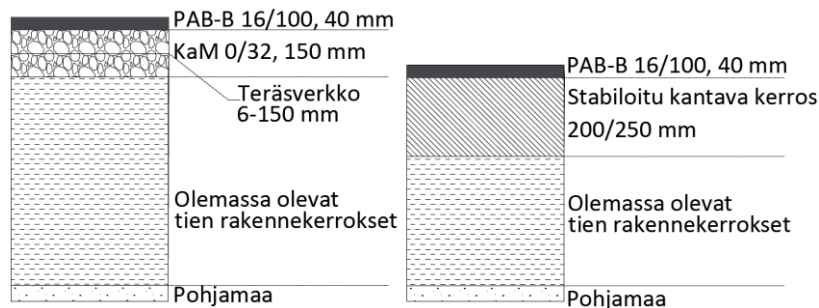
Taulukko 7. Yt 11146. Työmaalla tiivistetyistä seurantakoekappaleista laboratoriossa määritetyt tutkimustulokset (Ahlqvist et al. 2000, muokattu).

Paalulukema	Kappaleen tunnus	Lujuus, 28 vrk (MPa)	Kuivairtutih. (kg/m ³)	Tiiveysaste (%)	Vesipitoisuus (%)
1450	A	1,4	2118	~94	-
	B	1,4	2097	~93	5,7
1350	A	1,5	2118	~94	-
	B	1,3	2109	~94	4,0
1250	A	1,7	2161	~98	-
	B	0,8	2100	~95	4,0
1150	A	1,3	2137	~95	-
	B	-	-	-	4,7
1050	A	2,0	2142	~95	-
	B	1,7	2166	~96	4,8
950	A	1,7	2148	~95	-
	B	1,7	2135	~94	5,2
800	A	1,9	2148	~95	-
	B	1,8	2132	~95	4,8
650	A	1,1	2128	~95	-
	B	1,4	2157	~97	4,6
Tavoitetaso		4-4,5	2140	~95	5,5

2.1.3.2 Kt 87 (Rautavaara, 2004)

Kt 87 rakennuskohde sijaitsee Rautavaaran kunnan alueella tierekisterin osoitevälillä 87 14/9500–10500. Tieliikelaitos oli vuonna 2001 raportoinut, että pelkkä tien uudelleenpäällystäminen ei olisi riittävä rakenteen parantamismenetelmä, koska tierakenteessa on esiintynyt urautumista, reunapainumia, päällystehalkeamia, painumia rumpujen kohdalla sekä ylösnousevia kiviä. Rakenteen parantamismenetelmäksi suunniteltiin teräsverkon asentaminen osuuksille, joissa oli esiintynyt pituushalkeamia (kuva 14).

Teräsverkkorakenteen sijasta rakennuskohteelle toteutettiin neljä erilaista rakennetta (kuva 14), joissa tutkittiin 200 ja 250 mm paksuisten stabilointien toimivuutta sekä 50 mm tasausmurskekerroksen poisjättämisen vaikutusta rakennuskustannuksiin ja käytettäviin työtekniikoihin. Teollisuuden sivutuotteita hyödyntämällä pyrittiin saavuttamaan kustannussäästöjä verrattuna pelkkien kaupallisten sideaineiden käyttöön. Kantavan kerroksen stabiloinnilla voitiin ehkäistä/vähentää tarvetta nostaa tien tasausviivaa, mikä tulisi kysymykseen teräsverkkorakennetta käytettäessä. Stabiloidun kantavan kerroksen rakentamisen tavoitteena oli saavuttaa hyvin kantava ja routaliikkeitä tasoittava kerros. Vaikka rakennusosuus sijoittuu liikenteellisen merkityksensä mukaan kantatieksi luokitellulle tieosuudelle, on keskivuorokausiliikenne kohteella kuitenkin alhainen. Taulukossa 12 on esitetty kohteen tiestö- ja rakennetietoja.



Kuva 14. Kt 87. Teräsverkkorakenteen ja kantavan kerroksen stabiloinnin periaatekuvat (Tielaitos 2005, muokattu).

Taulukko 8. Kt 87. Tiestö- ja rakennetietoja (Tiehallinto 2005, Liikennevirasto 2017).

Päällysteleveys (m)	6,5
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	442/63
Päällystetyyppi	PAB-B 16/100
Nopeusrajoitus (km/h)	80
Tasausmurske	Kyllä (50 mm) ¹⁾
Talvihoitoluokka (nykyinen)	II

1) Päällysteen ja stabiloidun kantavan kerroksen väliin rakennettu tasausmurskekerros sijoittuu rakennuskohteella tieosotevälille 87/14/9950 – 10500.

Rakentaminen

Stabiloinnissa käytettävän sideaineseoksen lähtökohtana olivat aikaisempina vuosina tehdyt tutkimukset kipsi-lentotuhka-sementti -sideaineseoksen käytöstä soratien rakennekerrosten stabiloinnissa. Kyseisissä tutkimuksissa oli voitu osoittaa kyseisen sideaineseoksen pitkäaikaiskestävyys ja -lujittuminen. Tutkimuksissa tehdyssä seurannassa kipsi-lentotuhka-sementti -sideaineseoksilla stabiloiduista rakenteista ei ole havaittu liukenevan ympäristölle haitallisia aineita tai yhdisteitä.

Stabiloidun kantavan kerroksen rakenteen suunnittelussa hyödynnettiin rakennuskohteelle tehtyä maatumkausta sekä suhteituskokeita varten olemassa olevasta tierakenteesta otettuja rakennäytteitä. Suhteituskokeiden perusteella stabiloidun kantavan kerroksen rakenteelle asetettiin taulukossa 13 esitetyt laatuvaatimukset (Tiehallinto 2005).

Taulukko 9. Kt 87. Stabiloidun kantavan kerroksen rakentamiselle asetetut laatuvaatimukset (Tiehallinto 2005, muokattu).

Sideaineseos (Kipsi-Lentotuhka-Masuunisementti)	56 : 8,5 : 35,5
Sideainemäärä (%) ¹⁾	12
Vesipitoisuus (%) ²⁾	6
Tiiveysaste (%)	95
Kuivairtotiheys ρ_d (kg/m ³)	2090
Rakennekerrospaksuus (mm) ³⁾	200/250

1) Murskeen kuivamassasta

2) Hyväksytty vaihteluväli 4,5-7,5 %

3) 200 mm kerrospaksuus paaluväleillä 9500-9700 ja 10200-10500

Sideaineseoksen valmistaminen toteutettiin panostoimisella asemasekoittimella. Sekoitinlaitteiston arvioitiin toimivan hyvin, vaikka se olikin stabilointityösaavutusta rajoittava tekijä. Valmis sideaineseos levitettiin jyrsinsekoitetun olemassa olevan tierakenteen pinnalle asfaltinlevittimellä. Tämän jälkeen sideaineseos sekoitettiin tierakenteeseen stabilointijyrsimellä, jonka jälkeen tien pinta muotoiltiin ja rakenne tiivistettiin. Stabilointityön aikana rakenteeseen ei tarvinnut lisätä vettä, koska jyrsinsekoitetun rakenteen vesipitoisuus oli riittävän korkea johtuen ennen rakentamista esiintyneistä runsaista sateista. Rakentamisen aikana tehtyjen laadunvalvontamittauksien perusteella rakenteelta vaadittu tiiveysaste saavutettiin lähes koko rakennusosuudella. Vesipitoisuusmittauksissa esiintyi vaihtelua, mutta tulosten arvioitiin pysyvän suhteellisen hyvin hyväksytyin vaihteluvälin rajoissa. (Tiehallinto 2005)

Seurantatutkimukset

Kohteen kuntoa on seurattu vuosina 2005, 2007 ja 2017 tehdyissä seurantatutkimuksissa. Seurantatutkimustulokset on esitetty Harjun (2017) diplomityössä. Rakennuskohteen stabilointiosuuksien kunto on tienkäyttäjän vauriosumman ja tasaisuuden perusteella ollut vuonna 2017 hyvä. Vuoden 2012 PTM-mittausten urasyvyyden perusteella stabiloidun kantavan kerroksen rakennusosuus on ollut kuntoluokaltaan erittäin hyvä. Stabiloidun kantavan kerroksen sisältämä rakenne on tosin urautunut kyseisellä aikavälillä hieman teräsverkkorakennetta nopeammin.

Stabiloidun rakenteen lujuuden kehittyminen on esitetty liitteen 3 kuvassa 100. Kuvasta on havaittavissa, että rakennenäytteistä tehtyjen kokeiden perusteella stabiloitu rakenne on säilyttänyt lujuutensa kohteen olosuhteissa. Vuoden 2017 seurantatutkimuksien yhteydessä rakenteesta ei saatu porattua ehjiä rakennenäytteitä paalulukemalta 9900. Tämä viittaa siihen, että stabiloidun rakenteen lujuus on heikentynyt, tai rakenne on muutoin haurastunut kyseisellä paalulukemalla 10 vuoden aikana niin paljon, ettei se kestänyt enää porauksesta aiheutuvia kuormituksia.

Stabiloidun rakenteen osuuksilla on saavutettu huomattavasti mitoitettua (290 MPa) suurempi kantavuus (572 MPa, vuosi 2005). Kuormituskestävyyssmitoituksessa stabiloidun rakenteen E-moduuliksi asetettiin 700 MPa (Tiehallinto 2005). Odemarkin menetelmällä takaisinlasketun E-moduulin arvoksi kohteen stabiloidulle kantavalle kerrokselle on määritetty 1440...2340 MPa (Harju 2017).

Liitteen 1 kuvassa 75 on esitetty asfalttipäällysteen kunto stabiloiduilla osuuksilla. Kuvista on havaittavissa, että viiden vuoden ikäisessä rakenteessa (vuosi 2009) esiintyy pituus- ja poikkihalkeamia. Leveimmät pituushalkeamista on paikattu vuosien 2010-2017 välisenä aikana ja vastaavasti kapeimpien halkeamien ei ole katsottu vaativan päällysteen kunnossapitotoimenpiteitä. Kuvien perusteella halkeamia esiintyy yhtä paljon eri paksuisilla stabiloiduilla osuuksilla. Tasausmurskekerroksella ei ole kuvien perusteella vaikutusta halkeamien muodostumiseen tai tien päällysteen visuaalisesti havaittavissa olevaan kuntoon.

Stabiloidut rakenteet ovat tehdyn tutkimuksen perusteella kestäneet kohteen ilmasto- ja liikennekuormituksia, sillä rakennenäytteistä mitattu lujuus ei ole merkittävästi heikentynyt seurantatutkimusten välillä. Stabiloidut rakenteet eivät ole kuitenkaan kestäneet rakennuskohteella esiintyneitä epätasaisia routanousuja, vaan stabilointi on haljennut alapuolisten sitomattomien rakenteiden routaturpoaman vaikutuksesta. Routanousun suuruuteen on todennäköisesti vaikuttanut myös se, että koerakenteet sijoittuvat rinteeseen, josta valuvien vesien kuivattaminen on hoidettu puutteellisesti tierakenteen kohdalla.

Teräsverkko-osuudella päällystehalkeamia esiintyy huomattavasti vähemmän kuin stabiloiduilla osuuksilla, minkä perusteella voidaan todeta, että teräsverkko-*rakenteella on saavutettu sille suunnittelussa asetetut tavoitteet.*

2.1.3.3 Yt 14547 Teuroinen (Elimäki, 2006)

Kohde Yt 14547 on toteutettu osana Ecoinfo II – Ecoroad -projektikonaisuutta, jonka tavoitteena oli edistää Kaakkois-Suomen alueella syntyvien teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämistä tierakentamisessa. Kohde sijoittuu tierekisterin osoitevälille 14547 1/108-8165. Ennen rakenteen parantamista olemassa oleva päällysrakenne koostui ohuista rakennekerroksista, jotka olivat paikoin sekoituneita. Pääosin hienorakeisella maaperällä kulkevan tierakenteen kantavuus oli heikko. Tierakenne oli myös paikoin painunut sekä urautunut ja sen kuivatuksessa esiintyi puutteita. Alkuperäisen suunnitelman mukaan rakenteen parantaminen oli tarkoitus tehdä jyrseinsekoittamalla olemassa olevan tierakenteen päällyste ja kantava kerros, minkä jälkeen päällysrakennepaksuutta kasvatettaisiin lisämurskeella 100-300 mm. Pahimmin vaurioituneiden osuuksien päällysrakennetta oli tarkoitus lisäksi vahvistaa teräsverkolla.

Vaihtoehtoisena rakenteen parantamismenetelmänä kohteelle suunniteltiin kantavan kerroksen stabilointi. Stabiloinnin etuina alkuperäiseen rakenteen parantamissuunnitelmaan nähden arvioitiin olevan tasausviivan alhaisempi nostotarve ja materiaaliterve. Lujan ja laattamaisen stabiloidun kantavan kerroksen avulla tavoiteltiin tien kantavuuden merkittävää parantamista. Lisäksi sillä pyrittiin ehkäisemään päällysrakenteen materiaalien sekoittuminen. Stabiloinnin suunnittelun yhteydessä todettiin, että pelkästään stabiloinnin avulla ei pystytä ehkäisemään epätasaisen routimisen aiheuttamia vaurioita yhtä tehokkaasti kuin teräsverkkorakenteella ja rakenteessa voi parantamisen jälkeen esiintyä yksittäisiä routavaurioita.

Rakenteen parantaminen toteutettiin kolmella erilaisella stabiloidulla kantavalla kerroksella. Toisistaan poikkeavien rakenteiden avulla pyrittiin selvittämään uusiomateriaalideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen rakentamistekniikoita, käytönaikaista laatua, eri ratkaisujen käyttökelpoisuutta sekä eri rakenteiden rakentamiskustannuksia perinteisiin rakenneratkaisuihin nähden. Toteutetuissa rakenteissa varioitiin stabilointipaksuutta (250 mm ja 300 mm) ja käytettävää päällystetyyppiä (PAB ja AB). Lisäksi kohteen loppuosalle 300 mm paksun stabiloidun kantavan kerroksen päälle rakennettiin 50 mm paksu tasausmurskekerros ennen AB -kerroksen rakentamista. Rakenteen parantamisen yhteydessä tierakenteen kuivatusta parannettiin ja poikkileikkaus levennettiin 5,5 metristä 6,5 metriin. Taulukossa 14 on esitetty tiestö- ja rakennetietoja rakenteen parantamisen jälkeen. (Hietala et al. 2008 a)

Kohteen suunnitteluvaiheessa oli käytössä tierakenteen maatutkaluotaus- ja kantavuusmittaustulokset. Suhteituskokeita varten olemassa olevasta tierakenteesta otettiin rakennenyhteitä laboratorioon.

Suhteituskokeissa tutkittiin UPM Kymmene Oyj:n Kuusankosken voimalaitoksella syntyvän kuivana varastoidun lentotuhkan hyödyntämismahdollisuuksia kaupallista sideainetta korvaavana materiaalina. Tutkimuksen tavoitteena oli löytää tuhkan ja erilaisten kaupallisten sideaineiden seoksia, jotka olisivat potentiaalisia päällysrakenteen stabiloinnissa. Laboratoriotutkimusten perusteella stabiloinnissa päädyttiin käyttämään yleisementistä ja lentotuhkasta koostuvaa sideaineseosta, joita lisättiin 2,5 % + 8 % stabiloinnin runkoaineen kuivamassan suhteen. (Jyrävä 2006 c)

Taulukko 10. Yt 14547. Tiestö- ja rakennetietoja (Hietala et al. 2008 a, Liikennevirasto 2017).

Päällysteleveys (m)	6,0
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk.)	170/15 ¹⁾
Päällystetyyppi	PAB-V 16/100 / AB 16/100 ²⁾
Nopeusrajoitus (km/h)	80
Tasausmurske	Kyllä/Ei ³⁾
Talvihoitoluokka (nykyinen)	III ⁴⁾

1) Paaluvälillä 14547 1/4500 – 8165 KVLRAS 65 ajon./vrk.

2) PAB-V päällystetyyppi tierekisterin paaluvälillä 14547 1/0 – 4500, AB 16/100 päällystetyyppi tierekisterin paaluvälillä 14547 1/4500 – 8165

3) Tasausmurskekerros (50 mm) vain tierekisterin paaluvälillä 14547 1/7165 – 8165

4) Talvihoitoluokan III liukkaudentorjunta tehdään hiekoituksen ja tien pinnan karhennuksen avulla

Rakentaminen

Rakentamisessa käytetty tuhkamateriaali kerättiin tammi-helmikuun 2006 aikana. Tuhka välivarastoitettiin aumassa Lamminmäen kaatopaikalla. Aumassa varastoitu tuhka säilyi kuivana ($w < 1\%$) lukuun ottamatta auman pohjakerrosta, jonka vesipitoisuus kasvoi varastoinnin aikana pohjamaasta kapillaarisesti nousseen veden vaikutuksesta. Nykyisen suosituksen mukaan tuhkan aumavaraston pohjalle tuleekin asentaa muovinen kalvo katkaisemaan kapillaarisen sekä valumaveden pääsy varastoitavaan tuhkaan.

Stabilointityö toteutettiin 8.-15.6.2006, jota ennen oli tehty stabilointia edeltävät rakenteen parantamisvaiheet. Stabiloinnin sideaineseos sekoitettiin tuhkan varastointialueella Lamminmäen kaatopaikalla, josta yhdensuuntainen matka rakennuskohteelle on noin 17 km. Sideaineseoksen valmistaminen tehtiin siirrettävällä jatkuvatoimisella asemasekoittimella, jonka siiloissa voitiin varastoida sideaineseoksessa tarvittava sementti. Sideaineseoksessa tarvittava vesi toimitettiin sekoituspaikalle säiliöautoilla, koska sekoituspaikalla olleen kaivon tuotto ei ollut riittävä. Kuivana varastoidun tuhkan pölyhaittoja torjuttiin sekoitustyön aikana tehdyllä kastelulla.

Kostea sideaineseos levitettiin asfaltinlevittimellä, minkä jälkeen sekoitustyö tehtiin stabilointijyrsimen avulla. Jyrsinsekoitettu rakenne esitiivistettiin ilman täryä, jonka jälkeen tie muotoiltiin höylällä. Lopullinen tiivistystyö tehtiin saman työvuoron aikana täryä käyttäen, minkä yhteydessä rakenteeseen lisättiin vettä tarpeen mukaan. Taulukossa 15 on esitetty stabiloinnin rakentamisen laatuvaatimukset.

Rakenteesta mitattu vesipitoisuus säilyi rakentamisen aikana pääsääntöisesti tavoitellun vaihteluvälin asettamissa rajoissa. Rakenteen tiheys ja tiiveysaste ovat rakennuskohteen loppuosalla jääneet hieman tavoitetason alapuolelle. Laboratorion suhteituskokeiden perusteella tiiveysasteen lievä alittaminen ei pitäisi heikentää rakenteen laatua merkittävästi. Taulukossa 16 on esitetty rakentamisen laadunvalvontamittaustulosten keskiarvot paaluväleittäin. (Hietala et al. 2008)

Taulukko 11. Yt 14547. Stabiloidun kantavan kerroksen rakentamiselle asetetut laatuvaatimukset (Hietala et al. 2008 a).

Sideaineseos (Lentotuhka-Yleissementti) (%) ¹⁾	8,0 ja 2,5
Sideainemäärä (%) ¹⁾	10,5
Sideaineseoksen tavoitevesipitoisuus levitysvaiheessa (%)	30
Vesipitoisuus (%) ²⁾	7,0-7,5
Tiiveysaste (%) ³⁾	94-95
Kuivairtotiheys ρ_d (kg/m ³) ⁴⁾	
- plv 108-500	2200
- plv 500-5000	2180
- plv 5000-8165	2220
Rakennekerrospaksuus (mm) ⁵⁾	250/300

1) Runkoaineen kuivamassasta

2) Murske + sideaine. Hyväksytty vaihteluväli 6,0-8,5 %

3) Laboratoriotutkimusten perusteella suunniteltua alhaisemmaksi jäävä tiiveysaste ei ole kohteella rakenteen laadun kannalta kriittisin tekijä

4) Vaihtelu runkoaineen raekokojakaumassa edellytti paaluvälikohtaisen kuivairtotiheyden tavoitearvon asettamista

5) 250 mm paaluvälillä 108-4500 ja 300 mm paaluvälillä 4500-8165

Taulukko 12. Yt 14547. Rakentamisen laadunvalvontamittaustulosten keskiarvot (Hietala et al. 2008, muokattu)

Paaluväli	Tiiveysaste, ka. (%)	Kuivairtotiheys, ka. ρ_d (kg/m ³)	Vesipitoisuus, ka. (%)
108-500	95	2196	7,0
500-5000	96	2203	7,3
5000-8165	94,6	2214	6,7

Seurantatutkimukset

Stabiloidun rakenteen lujuuden kehittymistä seurattiin rakentamisen jälkeisenä syksynä 4.10.2006 sekä seuraavana kesänä 8.8.2007 poratuista rakennenäytteistä. Lujuuden pitkäaikaisseurannan rakennenäytteenotto suoritettiin vuonna 2017 (Harju 2017). Liitteen 3 kuvassa 101 on esitetty yhteenveto eri vuosina otetuista rakennenäytteistä määritetystä puristuslujuudesta. Kuvasta on havaittavissa, että lujuus on säilynyt ja jopa kehittynyt ajan suhteen.

Rakentamista seuraavana kesänä 2007 rakennuskohteelle suoritettiin visuaalinen kuntokartoitus, jonka yhteydessä asfalttipäällysteessä oli havaittavissa runsaasti kapeita pituus- ja poikkihalkeamia (kuva 15).



Kuva 15. Yt 14547. Ohuita pituus- ja poikkihalkeamia asfalttipäällysteessä (15.5.2007 Harri Jyrävä).

Liitteen 1 kuvassa 76 on esitetty rakennuskohteen asfalttipäällysteen kunto vuosina 2009 ja 2017. Kuvista on havaittavissa, että ohuiden pituus- ja poikkihalkeamien leveydet ovat kasvaneet vuosien aikana ja osa niistä on paikattu asfaltilla.

Harjun (2017) vuonna 2017 suorittamassa vauriokartoituksessa päällysteen kunto vaihteli ja kohteella esiintyi yksittäisiä voimakkaasti vaurioituneita osuuksia. 100 metrin jaksoille laskettujen tienkäyttäjän vauriosummien keskiarvon perusteella kohteen kuntoluokka on ollut hyvä vuonna 2017.

Kohteessa ei ole suoritettu PTM-mittauksia vuoden 2007 jälkeen. Vuonna 2007 tehdyissä PTM-mittauksissa kohteen päällysteen tasaisuus on ollut luokassa hyvä ja urasyvyys luokassa erittäin hyvä. Rakentamista seuraavana keväänä 2007 tehdyissä pudotuspainolaitemittauksissa päällysteen päältä mitatun kantavuuden mediaaniarvo oli 406 MPa, joka on lähes kaksinkertainen suunnitteluvaiheessa mitoitettuihin kantavuustavoitteisiin (PAB $E_y=204$ MPa ja AB $E_y=243$ MPa) nähden. Pudotuspainolaitemittauksista on laskettu pohjamaan/alusrakenteen jäykkyyttä kuvaavan BCI-indeksin mediaaniarvoksi 43. Kyseinen arvo kuvaa asiantuntijoiden mukaan pohjamaan huonoa kuntoa. (Harju 2017)

2.1.3.4 Yt 14800 Hanhikemppi (Lappeenranta, 2007)

Kohde Yt 14800 kuului osaksi Ecoinfo II – Ecoroad projektikonaisuutta ja stabiloidun rakenteen sideaineseoksessa käytettiinkin vastaavia sideainekomponentteja sekä rakenteita kuin vuotta aiemmin toteutetussa Yt 14547 kohteessa. Yt 14800 on rakenteen parantamiskohde, minkä yhteydessä aiemmin yksityistieksi luokiteltu tie muutettiin maantiekseksi, palvelemaan osana ylikorkeiden erikoiskuljetusten reittiverkostoa. Yt 14800 rakenteen parantamisessa suunnitellun stabiloidun rakenteen paksuus on 300 mm ja rakenne sijoittuu tierekisterein paaluvälille 14800 1/150 – 1100. Rakenteen parantamisen yhteydessä tietä levennettiin ja kuivatusta parannettiin tarvittavilta osin. Taulukossa 17 on esitetty Yt 14800 nykyisiä tiestö- ja rakennetietoja. Kohde sijoittuu pääosin moreenivaltaiselle maaperälle paaluvälillä 150-500. Paalulukemalta 600 eteenpäin maaperässä esiintyy silttisiä/savisia maakerroksia. Maatutkaluotausten perusteella olemassa olevan tierakenteen paksuus vaihteli 28-95 cm:n välillä, ollen keskimäärin noin 60 cm. Paalulukemilla 825 ja 1000 kallion havaittiin olevan 0,5-0,8 metrin syvyydessä olemassa olevan päällysrakenteen pinnasta. (Hietala et al. 2008 b)

Taulukko 13. Yt 14800. Tiestö- ja rakennetietoja.

Poikkileikkaus (pääll. lev/ajor.lev metriä)	7/6
Kuormitusluokka / Päällysrakenneluokka	0,4 AB / 5AB
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	263/8
Päällystetyyppi	AB 16/100
Nopeusrajoitus (km/h)	60
Tasausmurske	Ei
Talvihoitoluokka (nykyinen)	III ¹⁾

1) Talvihoitoluokan III luokkudentorjunta tehdään hiekoituksen ja tien pinnan karhennuksen avulla

Rakentaminen

Stabiloinnin sideaineseoksessa käytetty tuhka varastoitiin kostutettuna aumassa. Tehtyjen laboratoriotutkimusten perusteella hallittu kostuttaminen ei heikennä käytettävän tuhkan lujittumisominaisuuksia oleellisesti. Kostutettuna varastointi helpottaa tuhkan käsittelyä, jolloin se ei pölyä merkittävästi. Laboratorion suhteituskokeita varten olemassa olevasta tierakenteesta otettiin materiaalinäytteitä. Koetulosten perusteella rakentamiseen valittiin yleissementin ja tuhkan seos. Stabilointityölle asetettiin taulukossa 18 esitetyt laatuvaatimukset.

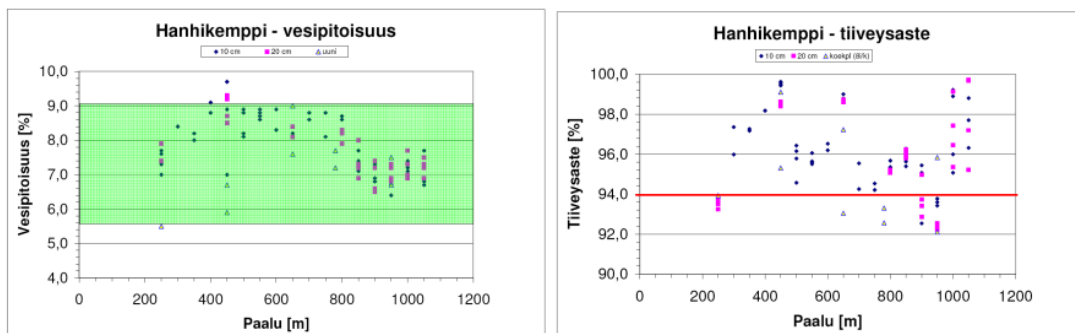
Taulukko 14. Yt 14800. Stabiloidun kantavan kerroksen rakentamiselle asetetut laatuvaatimukset (Hietala et al. 2008 b).

Sideaineseos (Lentotuhka ¹⁾ + Yleissementti)	7 % + 4 %
Sideainemäärä (%)	11
Vesipitoisuus (%) ²⁾	6,5-7,0
Tiiveysaste (%)	94-95
Maksimi kuivairtotiheys ρ_d (kg/m ³)	2150
Rakennekerrospaksuus (mm)	300

1) Kostutettuna varastoitu lentotuhka. Kostutuksen tavoitevesipitoisuus 20 %

2) Sideaine + runkoaine -seoksen tavoitevesipitoisuus

Kohteen rakentamisen aikana (17.-18.9.2007) esiintyi sateita, minkä johdosta tierakenne pehmeni paikoitellen ja valmiiden stabilointiosuuksien pinta liettyi. Veden aiheuttamia vaurioita korjattiin työn yhteydessä murskelisäyksen sekä pehmeiden kohtien massanvaihtojen avulla. Stabilointityön aikana tehtyjen laadunvalvontamittausten tulokset on esitetty kuvassa 16.

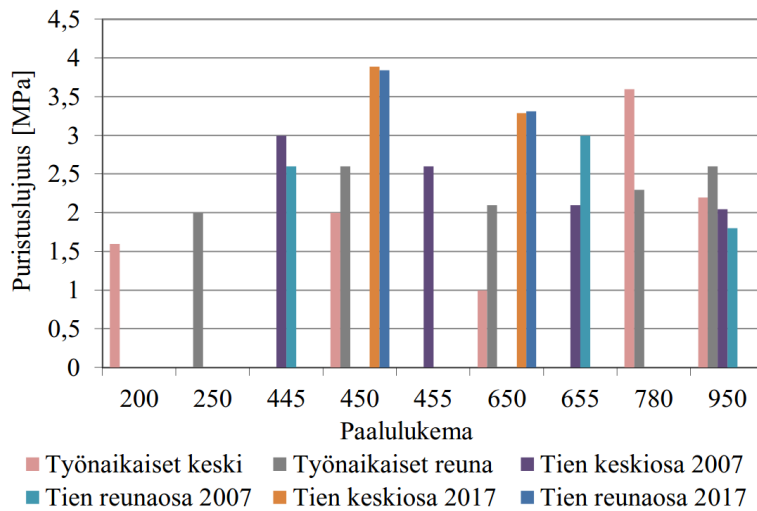


Kuva 16. Yt 14800. Stabilointityön laadunvalvonnan mittaustulokset (Hietala et al. 2008 b).

Kuvasta on havaittavissa, että stabilointimassan vesipitoisuus on tehdyissä mitauksissa ollut laatuvaatimusten mukaisella vaihteluvälillä (kuva 16 vasen, vihreä alue). Tiiveysasteen osalta kohteella esiintyy yksittäisiä alituksia, mutta tavoiteltu laatu on pääosin saavutettu.

Seurantatutkimukset

Stabiloidusta rakenteesta valmistettiin työn aikana koekappaleita laadunseurantaa varten. Lisäksi 1,5 kuukautta rakentamisen jälkeen rakenteesta porattiin koekappaleita toteutuneen lujuuden määrittämiseksi. Pitkäaikaisseurannan rakennenäytteet porattiin kymmenen vuotta rakentamisen jälkeen tehdyn seurantatutkimuksen yhteydessä vuonna 2017 (Harju 2017). Poranäytekappaleiden puristuslujuustulokset on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Yt 14800. Rakennenäytteiden puristuslujuus (Hietala et al. 2008 b, Harju 2017, muokattu).

Vuoden 2017 seurantatutkimuksissa ehjiä näytteitä saatiin porattua vain kahdesta pisteestä. Paalulukemalla 950 stabiloitu kantava kerros oli rikkonaista, eikä ehjän näytekappaleen poraaminen onnistunut. Kahdesta pisteestä saatujen ehjien näytteiden yksiaksiaalinen puristuslujuus on suurempi kuin mitä kohteen rakennenäytteistä on aiemmin mitattu. (Harju 2017).

Vuoden 2017 seurantatutkimusten yhteydessä määritetyn tienkäyttäjän vauriosumman perusteella rakenne oli tyydyttävässä kunnossa. Liitteen 1 kuvassa 83 on nähtävillä kohteella esiintyvät pituus- ja poikkisuuntaiset päällystehalkeamat, jotka ovat muodostuneet lähestulkoon vastaavalla tavalla kuin ennen rakentamista tehdyssä katselmuksessa on dokumentoitu. Halkeamat ovat varsin tyypillisiä epätasaisen routanousun aiheuttamia vaurioita. Jäykkä ja paksu hydraulinen stabilointi ei ole Yt 14800 rakennuskohteella ollut riittävä toimenpide torjumaan routivan alusrakenteen aiheuttamia routavaurioita.

2.1.3.5 Yt 16563 Seppola–Kaipola (Jämsä, 2010)

Vuonna 2010 rakennetut kohteet Yt 16563 ja 16573 kuuluivat "Infrarakentamisen uusi materiaaliteknologia" (UUMA) -kehitysohjelmaan. Keski-Suomen UUMA 2010 nimeä kantaneessa projektissa oli tavoitteena pilotoida Jämsän alueella muodostuvien UPM Kymmene Oyj:n lentotuhkien laajamittaista käyttöä. Pilotointiin valitut tiekohteet olivat rakenteen parantamistarpeessa olevia teitä,

joissa lentotuhkan hyötykäytön arvioitiin olevan teknisen soveltuvuuden kannalta perustelua. Kohteet sijaitsivat lisäksi riittävän lähellä UPM:n tehtaita, mikä oli yhtenä pilotointiin valittavien kohteiden kriteerinä. (Kiviniemi et al. 2010 b)

Ennen rakenteen parantamista olemassa oleva tierakenne oli parantamisjakson osuudella urautunut sekä paikoin verkko- ja pituussuuntaisten halkeamien vaurioittama. Rakenteen parantaminen suunniteltiin tierekisterin osoitevälille 16563 1/300 – 4450. Paalulukemasta 4150 eteenpäin olemassa oleva tierakenne oli vahvistettu teräsverkolla. Taulukossa 19 on esitetty kohteen tiestö- ja rakennetietoja.

Rakenteen parantamisen yhteydessä olemassa olevan tierakenteen päällyste sekä kantava kerros jyrsinsekoitettiin ja stabiloitiin 250 mm syvyydeltä (ks. kuva 19 b). Suhteituskokeissa tutkittiin lentotuhkan ja sementin seoksen hyödyntämistä eri pitoisuuksilla. Rakentamiseen valittiin sideaineseos, jossa käytettiin kuivaa lentotuhkaa 6 paino-% ja yleissementtiä 4 paino-% (CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N) runkoainemurskeen kuivamassasta laskettuna. Tällä sideaineseoksella saavutettiin laboratoriossa noin 5,5 MPa:n yksiaksiaalinen puristuslujuus 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen. Jäädytys-sulatuskokeen jälkeinen puristuslujuuden alenema oli noin 17 %. (Kiviniemi et al. 2010 b)

Taulukko 15. Yt 16563. Tiestö- ja rakennetietoja.

Päällysteleveys (m)	8,7
Kuormitusluokka	10,0 AB
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	1823/157
Päällystetyyppi	AB 22/120
Nopeusrajoitus (km/h)	80
Tasausmurske	Ei
Talvihoitoluokka (nykyinen)	Ib ¹⁾

1) Talvihoitoluokassa Ib tie hoidetaan pääosin ilman suolaa

Rakentaminen

Kohde rakennettiin 20.-30.9.2010 välisenä aikana. Kaksi kokonaista työpäivää kului esijyrsintävaiheeseen, jossa päällyste sekoitettiin olemassa olevan kantavan kerroksen murskeen kanssa. Itse stabilointityöhön kului kokonaisuudessaan seitsemän työpäivää. Stabiloinnin sideaineseos valmistettiin asemasekoitinlaitteistolla UPM:n tuhkavarastointipaikalla. Sekoituksen yhteydessä sideaineseokseen lisättiin vettä pölyämisen ehkäisemiseksi ja levitystyön helpottamiseksi. Taulukossa 20 on esitetty stabiloinnin sideaineseoksen valmistamisen sekä stabiloidun kantavan kerroksen rakentamisen laatuvaatimukset.

Taulukko 16. Yt 16563. Stabiloidun kantavan kerroksen rakentamiselle asetetut laatuvaatimukset. (Kiviniemi et al. 2010 a)

Sideaineseos LT + YSe (p-%) ¹⁾	8,0 + 3,5
Sideaineseoksen vesipitoisuus (%) ²⁾	20
Rakenteen vesipitoisuus (%) ³⁾	7,3
Tiiveysaste (%)	95
Maksimi kuivairtotiheys ρ_d (kg/m ³)	2220
Rakennekerrospaksuus (mm)	250

1) Stabiloitavan murskeen kuivamassasta laskettuna

2) Hyväksytty vaihteluväli 17-23

3) Hyväksytty vaihteluväli 6,3-8,3

Suhteituskokeiden tuloksista poiketen, rakentamisen sideaineseoksessa valittiin käytettäväksi 8 % kuivaa lentotuhkaa ja 3,5 % sementtiä. Sekoitustyömaalla sattuneen virheen seurauksena toteutuneet sideainesuhteet olivat 7,6 % lentotuhkaa ja 3,9 % sementtiä.

Rakentamisen laadunvalvonnan yhteydessä jyrsinsekoitetusta materiaalista valmistettiin työmaakoekappaleita laadunseurantaa varten. Kuuden työmaakoekappaleen vesipitoisuuksien keskiarvo oli 5,6 % ja yksiaksiaalisen puristuslujuuden (28 vrk) keskiarvo 1,93 MPa. Koekappaleet tiivistettiin noin kaksi tuntia näytteenottohetken jälkeen, jolloin sideaineiden lujittumispotentiaalista suurin osa oli jo todennäköisesti menetetty. Osa materiaaliseoksen vesipitoisuudesta on lisäksi kulunut sideaineiden reaktioihin, millä on vaikutusta mitatun vesipitoisuuden alhaiseen tasoon.

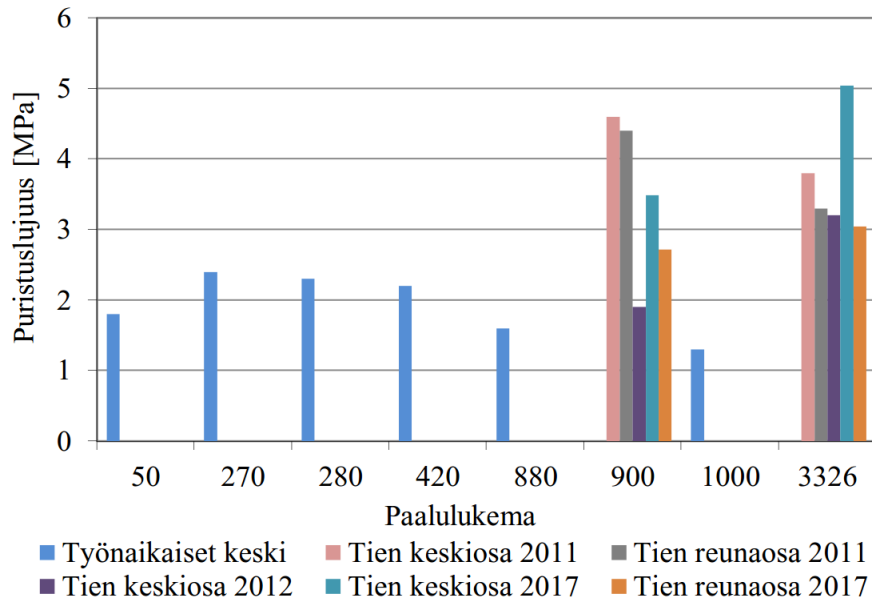
Urakoitsijan laadunvalvonnassa rakenteen tiiveysaste ei alittanut 92 % arvoa kertaakaan ja pysyi pääsääntöisesti tavoitearvoa yli 95 % korkeampana. Vesipitoisuusmittausten keskiarvo työmaalla oli 7,7 %.

Seurantatutkimukset

Seurantatutkimuksia on tehty Keski-Suomen UUMA -projektin yhteydessä vuosina 2011 ja 2012. Vuosien 2013 ja 2017 seurantatutkimukset toteutettiin Tarkkion (2014) ja Harjun (2017) diplomitöiden yhteydessä. Tehdyssä seurannassa on tutkittu rakennuskohteen asfalttipäällysteen vaurioitumista, kantavuutta ja stabiloidun kantavan kerroksen lujuutta. Päällystevauriokartoituksen yhteydessä kohteelle on määritetty tienkäyttäjän vauriosumma. Yhteenveto eri vuosina tehdyistä vauriokartoituksista on esitetty liitteen 3 kuvassa 94. Vauriokartoituksen perusteella päällysteen kunto ei ole voimakkaasti heikentynyt eri vuosien seurantatutkimusten välillä. Liitteen 1 kuvassa 81 on esitetty asfalttipäällysteen kunto vuosina 2009, 2015 ja 2017.

Liitteen 3 kuvassa 93 on esitetty kohteen kantavuusmittaustulokset vuosilta 1994, 2011, 2012 ja 2013. Vuonna 1994 rakenteesta mitattu kantavuus on ollut noin 300 MPa, mikä on noin 120 MPa alhaisempi kuin 10,0 AB murskerakenteen tavoitekantavuus. Rakenteen parantamisen jälkeiset mittaukset osoittavat, että stabiloinnilla ja uudelleenpäällystämällä rakenteen kantavuus on parantunut, ollen keskimäärin yli 600 MPa. Vuosien 2011-2013 välisistä kantavuusmittaustuloksista on havaittavissa kohtalaisen hyvä toistettavuus, jonka perusteella stabiloidun kantavan kerroksen jäykkyydessä ei ole tapahtunut muutoksia lujuuden kehittymisen tai alenemisen seurauksena ko. aikavälillä.

Stabiloinnin pitkäaikaiskestävyyttä ja -lujuutta on tutkittu rakennenäytekappaleista määritettävän yksiaksiaalisen puristuslujuuden perusteella (kuva 18). Kuvasta 18 on havaittavissa, että rakenteen lujuus on kasvanut verrattuna työnaikeisten seurantakoekappaleiden (2010) lujuuksiin.



Kuva 18. Yt 14800. Rakennenäytteiden puristuslujuus (Harju 2017).

2.1.3.6 Yt 16573 Hiidenmäki–Vaheri (Jämsä, 2010)

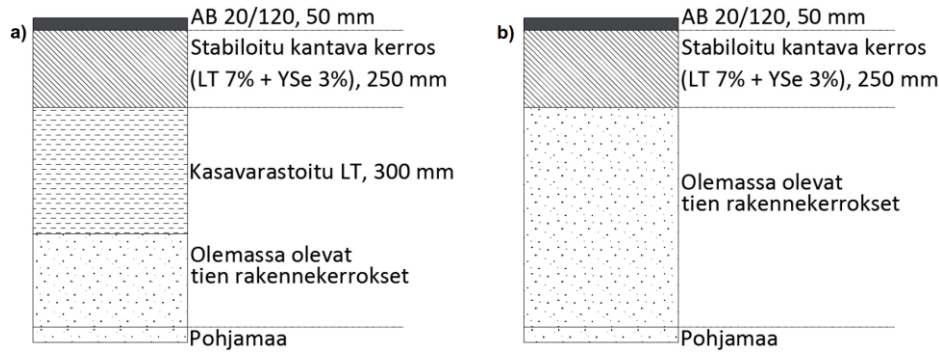
Yt 16573 rakenteet toteutettiin Keski-Suomen UUMA-projektin yhteydessä vuonna 2010 yhdessä kohteen Yt 16563 kanssa. Yt 16573 tiestö- ja rakennetiedot on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 17. Yt 16573. Tiestö- ja rakennetietoja.

Päällysteleveys (m)	7,5
Kuormitusluokka	-
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	604/24
Päällystetyyppi	AB 22/120
Nopeusrajoitus (km/h)	60
Tasausmurske	Ei
Talvihoitoluokka (nykyinen)	II ¹⁾

1) Talvihoitoluokan II liukkaudentorjunta tehdään hiekoituksen ja tien pinnan karhennuksen avulla

Yt 16573 rakenteen parantamisessa käytettiin kolmea erilaista rakennetyyppiä. Kuvassa 19 on esitetty stabiloitujen rakenneratkaisujen periaatekuvat. Pahimmin roudan vaurioittamiin kohtiin kantavan kerroksen stabiloinnin alle rakennettiin 300 mm paksu sidottu lentotuhkarakenne (19 a), jolla tavoiteltiin päällysrakenteen parempaa routaeristävyttä. Vähiten vaurioituneet osuudet päällystettiin ainoastaan uudelleen ja loput rakenteen parantamiskohteen olemassa olevasta tierakenteesta stabiloitiin (19 b). Erilaisten rakenteiden sijainnit yt 16573 rakenteen parantamiskohteella on esitetty taulukossa 22. Rakenne "c" tarkoittaa pelkkää uudelleenpäällystämistä.



Kuva 19. Yt 16573. Stabiloitujen rakenteiden periaatekuvat (Kiviniemi et al. 2010 a, muokattu).

Taulukko 18. Yt 16573. Rakennetyyppien sijainnit. Rakenteet a ja b on esitetty kuvassa 19. Rakenne c tarkoittaa pelkkää uudelleenpäällystämistä. (Kiviniemi et al. 2010 b, muokattu)

Sijainti	Rakenne	Sijainti	Rakenne
16573 2/0-290	b	16573 2/2365-3605	a
16573 2/290-675	a	16573 2/3605-3750	c
16573 2/675-975	b	16573 2/3750-4375	a
16573 2/975-1950	a	16573 2/4375-4475	c
16573 2/1950-2050	c	16573 2/4475-3/108	a
16573 2/2050-2365	b		

Rakentaminen

Rakentamisessa käytettävät tuhkat varastoituihin UPM Kymmene Oyj:n kaatopaikka-alueella. Jakavan kerroksen sidottu tuhkarakenne koostui useista eri tuhkaeristä, joita oli varastoituihin kaatopaikka-alueella eri pituisia aikoja. Tämä edellytti tuhkien huolellista sekoittamista sekä vesipitoisuuden tarkkaa kontrollointia, jotta työmaalle toimitettava tuhkaolos olisi riittävän homogeenista. Kantavan kerroksen stabiloinnissa käytettävä kuivan lentotuhkan ja sementin sideaineseos valmistettiin tuhkan varastointialueella asemasekoittimella.

Rakenteen parantamisen yhteydessä olemassa oleva päällyste jyrättiin ja kuljetettiin pois rakennuskohteelta. Rakenteen a -osuudella tarvittavien leikkaustöiden jälkeen osuuksille rakennettiin jakavan kerroksen sidottu tuhkarakenne. Näiden osuuksien yhteispituus oli noin kolme kilometriä. Osuuksien rakentaminen toteutettiin kuivissa ja lämpimissä sääolosuhteissa syyskuun 2010 aikana. Rakentamiseen kului aikaa yhteensä 16 työvuorokautta. Rakentamisen laadunvalvonnan tehtiin yhteensä 9 volymetrimittauksia. Näiden lisäksi tiivistetyn kerroksen laatua ja vesipitoisuutta kontrolloitiin Troxler-säteilymittauslaitteen avulla.

Stabiloidun kantavan kerroksen rakentaminen ajoittui lokakuun 2010 alkuun, jolloin ulkoilman lämpötila oli jo alle +5 °C. Taulukossa 23 on esitetty valmiille stabiloidulle kantavalle kerrokselle asetettavat laatuvaatimukset. Stabiloitujen osuuk-

sien kokonaispituus oli yhteensä noin 8,2 tiekilometriä, joiden rakentamiseen kuului aikaa yhteensä yhdeksän työvuoroo. Rakentamisen laadunvalvonta tehtiin urakoitsijan toimesta. Laadunvalvontatulosten perusteella stabiloidun rakenteen tiiveys ja vesipitoisuus vastasivat asetettuja tavoitteita. Laadunvalvonnan yhteydessä työmaalla sekoitetusta massasta valmistettiin koekappaleita laadunseurantaa varten. Työmaakoekappaleiden yksiaksiaalisen puristuslujuuden keskiarvo 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen oli 2,84 MPa. Työmaakoekappaleet tiivistettiin Proctor -vasaralla seitsemällä iskulla neljässä kerroksessa. (Kiviniemi et al. 2010 b)

Taulukko 19. Yt 16573. Stabiloidun kantavan kerroksen rakentamiselle asetetut laatuvaatimukset (Kiviniemi et al. 2010 a ja 2010 b, muokattu).

Sideaineseos (Lentotuhka-Sementti)	7,0:3,0
Sideainemäärä (%) ¹⁾	12
Vesipitoisuus (%) ²⁾	7,3
Tiiveysaste (%)	95
Maksimi kuivairtotiheys ρ_d (kg/m ³)	2210
Rakennekerrospaksuus (mm)	250

1) Murskeen kuivamassasta

2) Hyväksytty vaihteluväli 6,3-8,3 %

Seurantatutkimukset

Kohteelle on tehty seurantatutkimuksia vuosina 2011, 2012, 2013 ja 2017. Yhteenvedo seurantatutkimusten vauriokartoituksista on esitetty liitteen 3 kuvassa 92. Vauriokartoitustulosten perusteella rakennuskohteen asfaltin kunto ei ole heikentynyt merkittävästi seurantatutkimusvuosien välillä. Suurin vauriosumma kohteella on havaittu tierekisterin paaluvälillä 2/2800-3400. Vuoden 2009 tiekuva-aineistosta voidaan havaita, että osuudella on esiintynyt roudan aiheuttamia pituussuuntaisia halkeamia sekä ajourien verkkohalkeamia ennen rakenteen parantamista. Osuuden vaurioituminen rakenteen parantamisen jälkeen viittaa siihen, että kantavan kerroksen stabiloinnilla sekä jakavaan kerrokseen rakennetun routaa eristävän lentotuhkakerroksen avulla ei ole voitu täysin ehkäistä roudan aiheuttamaa vaurioitumista.

Vauriokartoitusten yhteydessä porattujen rakennenäytteiden yksiaksiaalinen puristuslujuus on esitetty liitteen 3 taulukossa 64. Tuloksista voidaan havaita, että vuonna 2017 porattujen rakennenäytteiden yksiaksiaalinen puristuslujuus on samaa suuruusluokkaa kuin laboratorion suhteituskokeiden perusteella tavoiteltu 3,3 MPa. Rakentamisen laadunvalvonnassa vuonna 2010 työmaalla tehtyjen koekappaleiden 28 vuorokauden lujuus oli noin 2,9 MPa. Rakennenäytteiden lujuuksien perusteella stabiloitu materiaali on kestänyt jäätymis-sulamis-sykleistä aiheutuvat kuormitukset rakenteessa, ilman lujuuden heikkenemistä.

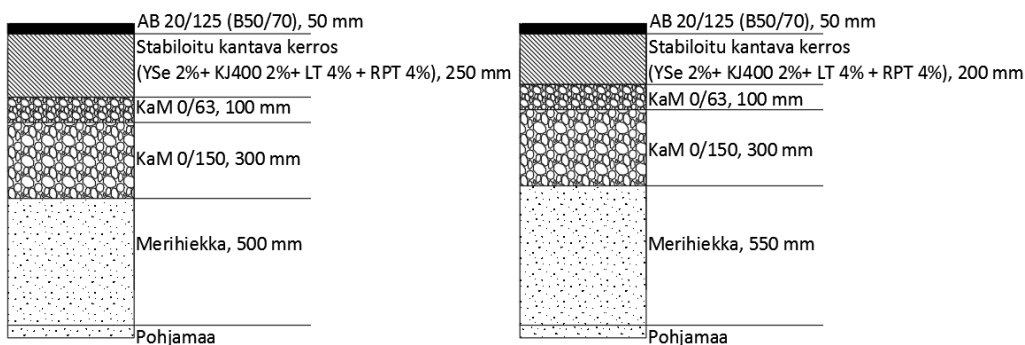
Yt 16573 kantavuus on mitattu vuosina 2012 ja 2013 ja mittaustulokset on esitetty liitteen 3 kuvassa 91. Lisäksi vuoden 2012 PPL-mittaustulokset on esitetty liitteen 3 taulukossa 63. Tulosten perusteella rakenteen kantavuus täyttää sille asetetut vaatimukset, joskin mittaustuloksissa on paljon vaihtelua. PPL-mittaustuloksista laskettu päällysrakenteen yläosan kuntoa kuvaava SCI -parametri ei ole samaa suuruusluokkaa, kuin muilla vastaavilla rakennuskohteilla. Kun kyseinen havainto yhdistetään kantavuusmittaustulosten vaihtelujen kanssa, voidaan todeta, että kohteen stabiloidun kantavan kerroksen lujuudessa esiintyy vaihtelua.

Vuoden 2011 seurantatutkimuksissa havaittiin pituussuuntainen halkeama tien reunassa paalulukemalla 3100. Liitteen 1 kuvassa 80 on esitetty asfalttipäällysteen kunto reunapainuman/-halkeaman kohdalla tierekisteriosoitteessa 16573 2/3140 ennen rakenteen parantamista sekä rakenteen parantamisen jälkeen. Kuvasta on havaittavissa, että ennen rakenteen parantamista kyseisellä tieosuudella halkeamavaurioita esiintyi runsaasti. Tarkkio (2014) arvioi, että halkeamavauriot johtuvat mitä ilmeisemmin epätasaisesta routanoususta. Vauriokohdassa tie kulkee loivan rinteeseen kalliroleikkauksessa. Rinteestä kalliroleikkaukseen valuva vesi kasvattaa tien alusrakenteen sekä päällysrakennekerrosten vesipitoisuutta, mikä voi osaltaan kasvattaa routanousua.

2.1.3.7 Satamakenttä, Vuosaaren satama (2006)

Liikenneviraston päällystetyille tieverkolle toteutettujen rakennuskohteiden lisäksi, lujittuvien uusiomateriaalien hyödyntämistä kantavan kerroksen stabiloinnin sideaineseoksessa on tutkittu *Helsingin Satama, Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysrakenteet* -hankkeella vuosien 2004-2007 välisenä aikana. Hankkeen yhteydessä rakennettiin Vuosaaren satama-alueelle uutta kenttä aluetta, jonka päällysrakenteeseen toteutettiin stabiloitu kantava kerros. (Lahtinen et al. 2007)

Hanke koostui kahdesta vaiheesta, joista ensimmäinen toteutettiin vuosina 2004-2006. Ensimmäinen vaihe käsitti suunnitelluissa rakenneratkaisuissa käytettävien materiaalien laboratoriotutkimuksia sekä lokakuussa 2004 rakennettujen koerakennusalueiden (4 x 250 m²) seurannan. Hankkeen toisessa vaiheessa vuonna 2006 tehtiin täydentäviä laboratoriotutkimuksia ja rakennettiin yhteensä 61 200 m² uutta kenttärakennetta (kuva 20) stabiloidun kantavan kerroksen rakenneratkaisua hyödyntäen (Ronkainen & Sikiö, 2007; Lahtinen et al. 2017). Stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineena käytettiin 2. luokan kiviaineksesta paikalla murskattua kalliomurskettä (0/31 mm). Satamakenttä-alueen täytöissä käytetyt materiaalit olivat peräisin liikenneväylien rakentamisesta ja merenpohjasta (merihiekka) (GTK 2009).



Kuva 20. Vuosaaren satama. Rakennetyyppien poikkileikkaukset (vas. rakenne 2NS ja oik. rakenne 4NS) (Ronkainen & Sikiö, 2007).

Rakentaminen

Stabiloinnin sideaineseoksessa käytetty lentotuhka ja rikinpoistolopputuote ovat Helsingin Energian Hanasaaren B-voimalaitoksella muodostuvia materiaaleja, jotka varastoitettiin kostutettuna aumassa noin 4-5 kuukautta ennen rakentamista. Varastointia varten tehdystä kostutuksesta johtuen materiaalit paakkuuntuivat varastoinnin aikana. Sideaineseos valmistettiin asemasekoittimella,

levitettiin asfaltinlevittimellä ja sekoitettiin murskeeseen stabilointijyrsimen avulla. Kuvia rakentamisvaiheesta on esitetty liitteen 5 kuvassa 107. Tarkempia tietoja rakentamisesta on saatavilla kohteen rakentamista käsiteltävästä raportista (Ronkainen & Sikiö, 2007).

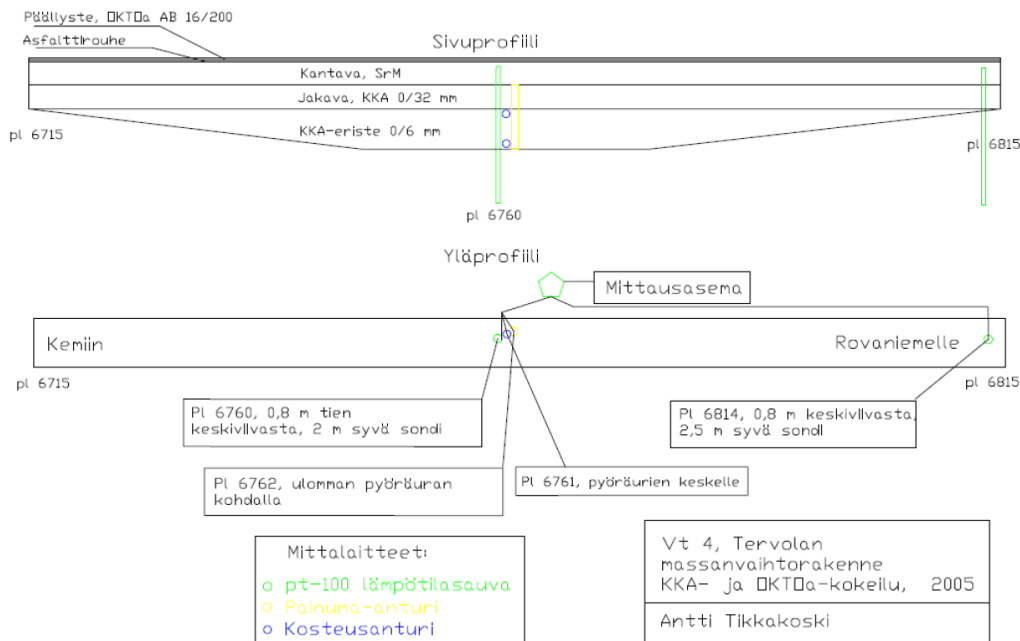
Seurantatutkimukset

Vaihtoehtoisten rakenteiden kuntoa on tutkittu vuosina 2007, 2009 ja 2013. Yhteenveto tehdyistä seurantatutkimuksista on esitetty Tarkkion (2014) diplomityössä sekä vuonna 2009 julkaistussa raportissa *Helsingin Satama. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysrakenteet*. (Ronkainen & Sikiö, 2009)

2.2 Jakavat kerrokset

2.2.1 Vt4 Tervola, massanvaihto (Keminmaa, 2005)

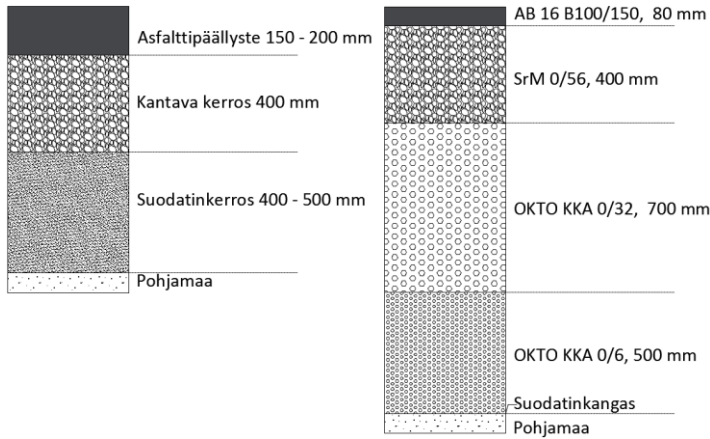
Tierekisteriosoitteeseen Vt4 429/6715-6815 sijoittuva massanvaihto-osuus rakennettiin vuonna 2005 hyödyntäen Tornion alueen terästeollisuudessa muodostuvaa teräskuonaa. Käsitellyn teräskuonamateriaalin eri fraktioita käytettiin massanvaihto-osuuden päällysrakenteen suodatin- ja jakavassa kerroksessa sekä asfalttipäällysteen runkoainemateriaalina (kuva 21). (Salmenkaita & Tikkakoski, 2005)



Kuva 21. Vt 4 Tervola. Päällysrakenteen periaatekuva (pituusleikkaus) ja instrumentointien sijainnit (Salmenkaita & Tikkakoski, 2005).

Asfalttipäällysteen runkoaineena käytetyn teräskuonamateriaalin lujuusluokka oli murskaustavasta riippuen I tai II. Päällysrakenteen mitoituksessa hyödynnettiin teräskuonan eri fraktioiden teknisiä ominaisuuksia siten, että kohteella voitiin pienentää massanvaihdon leikkaussyvyyttä sekä välttää luonnonhiekan käyttö rakentamisessa. Kuvassa 22 on esitetty rakennuskohteen vanhan päällysrakenteen ja toteutetun teräskuonarakenteen periaatekuvat. Asfalttipäällyste käsiteltiin viikko valmistumisen jälkeen REM -menetelmällä, minkä yhtey-

dessä aiemmin teräskuonalla suhteitetun AB 16 B100/150-massan sekaan lisättiin luonnonkiviaines-päällystemassaa 20 kg/m². Taulukossa 24 on esitetty Vt 4 massanvaihto-osuuden tiestö-rakennetietoja. (Salmenkaita & Tikkakoski, 2005)



Kuva 22. Vt 4 Tervola. Massanvaihto-osuuden vanhan päällysrakenteen (vas) ja toteutetun teräskuonarakenteen (OKTO-rakenne) rakennekerrokset (Salmenkaita & Tikkakoski 2006, ISCORD 2007, muokattu)

Taulukko 20. Vt 4 Tervola. Massanvaihto-osuuden tiestö- ja rakennetietoja.

Päällysteleveys (m)	10,0
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	3273/452
Päällystetyyppi	AB 16/200 ¹⁾ (B100/150) ²⁾
Nopeusrajoitus (km/h)	100
Talvihoitoluokka	I

1) Päällystemassaa lisätty REM -käsittelyn yhtedessä noin 20 kg/m²

2) Sideaineena käytetty suhteellisen kovaa bitumia B100/150

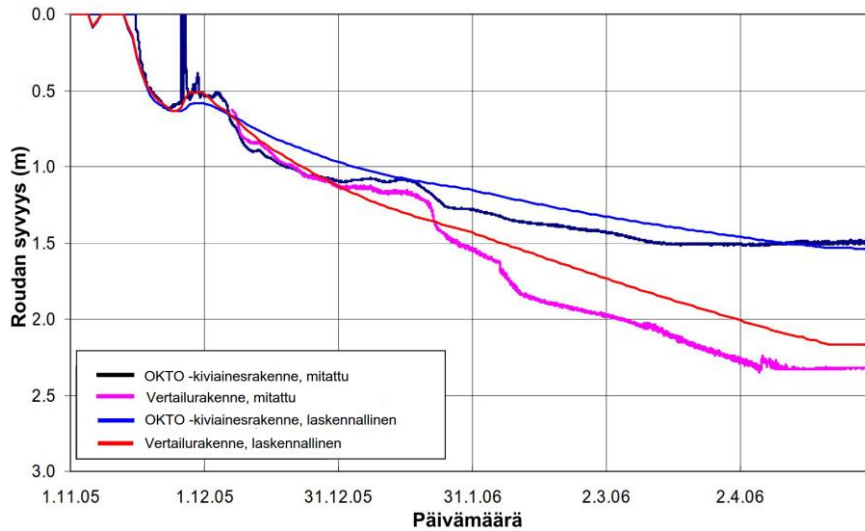
Rakentaminen

Teräskuonamateriaalien käsittely rakentamisen aikana ei urakoitsijan mukaan poikennut luonnon kiviaineksella tehtävästä rakentamisesta. Teräskuonan levittämisessä käytettiin pyöräkuormaajaa. Materiaalin käsittely oli urakoitsijan näkemyksen mukaan helppoa ja levitetyn tiivistämättömän materiaalikerroksen päällä pystyi ajamaan työkoneella. Rakenteet tiivistettiin yksivalssiyrällä.

Seurantatutkimukset

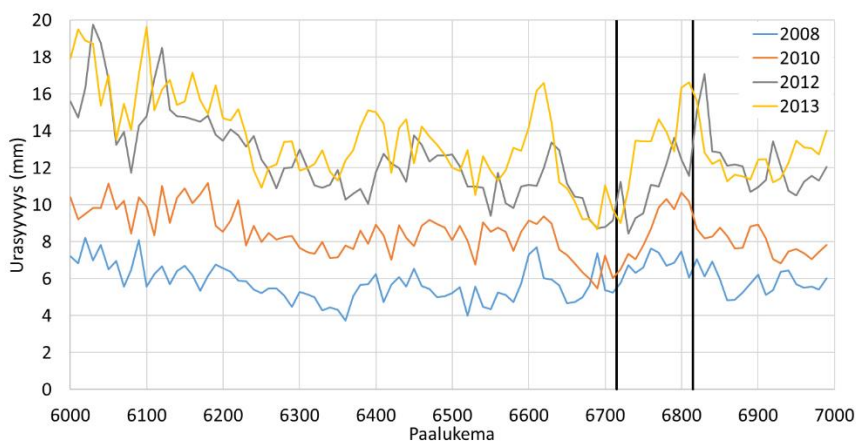
Päällysteen urautumista ja routimisesta aiheutuvia mahdollisia epätasaisuuksia on suunniteltu seurattavaksi PTM-mittausaineistosta saatavan tiedon avulla. Muita rakenteiden kunnon seurantamenetelmiä ovat rakenteisiin asennettujen instrumenttien seurantamittauksien analysointi rakenteiden lämmöneristävyyssominaisuuksien selvittämistä varten sekä päällysrakenteen kantavuusmittaukset teräskuonan mahdollisen jälkilujittumisen vaikutuksen arvioimiseksi.

Kuvassa 23 on esitetty lämpötilaseurannan mittauksista laadittu roudan syvyyskuvaaja talvelta 2005-2006, jolloin teräskuonarakenteen roudan syvyys oli 1,51 m ja vertailurakenteen 2,35 m (pakkasmäärä 31 600 Kh).



Kuva 23. Vt 4 Tervola. Laskennallinen ja mitattu roudan syvyys teräskuonarakenteessa (OKTO-rakenne) sekä luonnon kiviaineksesta rakennetussa vertailurakenteessa (ISCORD 2007, muokattu).

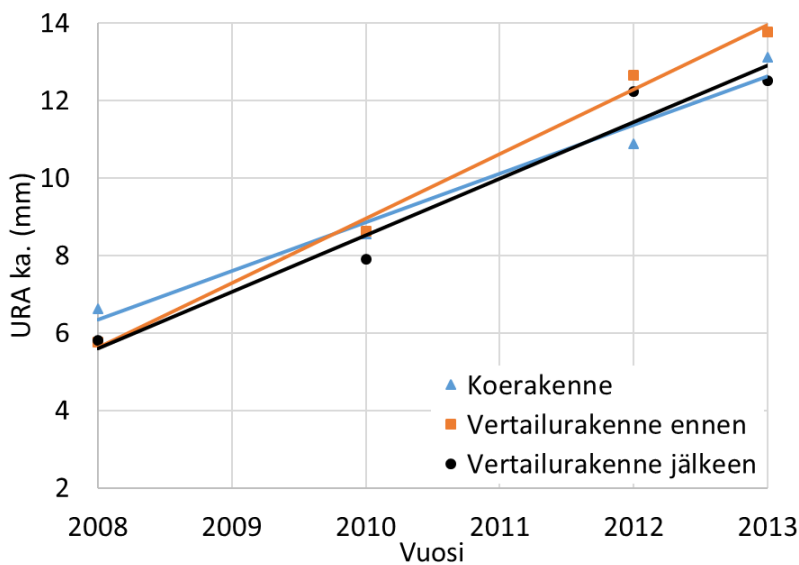
PTM-mittaustuloksia on saatavissa vuosilta 2008, 2010, 2012, 2013 ja 2014. PTM-mittaustulosten ja tiekuva-aineiston perusteella rakennuskohteen oikealle kaistalle suunnassa 1 on tehty päällysteen urapaikkauksia vuosien 2013 ja 2014 PTM-mittausten välillä. Vuonna 2015 rakennuskohte on päällystetty uudelleen REM+ (AB 16, 50 kg/m²) -menetelmällä paaluvälillä 6715-6789 ja MPKJ (AB 16, 80 kg/m²) -menetelmällä paaluvälillä 6789-6815. Kuvassa 24 on esitetty urasyvyysmittaustulokset vuodesta 2008 vuoteen 2013. Koerakennusosuudella (kuva 24 rajattu osuus) mitattu urautuminen on vaihdellut, ollen voimakkaampaa osuuden loppuosassa. Kohteella on tehty urapaikkauksia vuosien 2013 ja 2014 mittausten välisenä aikana. Urapaikkaus on vuoden 2015 tiekuva-aineiston perusteella suunnan 1 oikean kaistan oikeassa ajourassa paalulukemalta 6740 eteenpäin (liite 1 kuva 73).



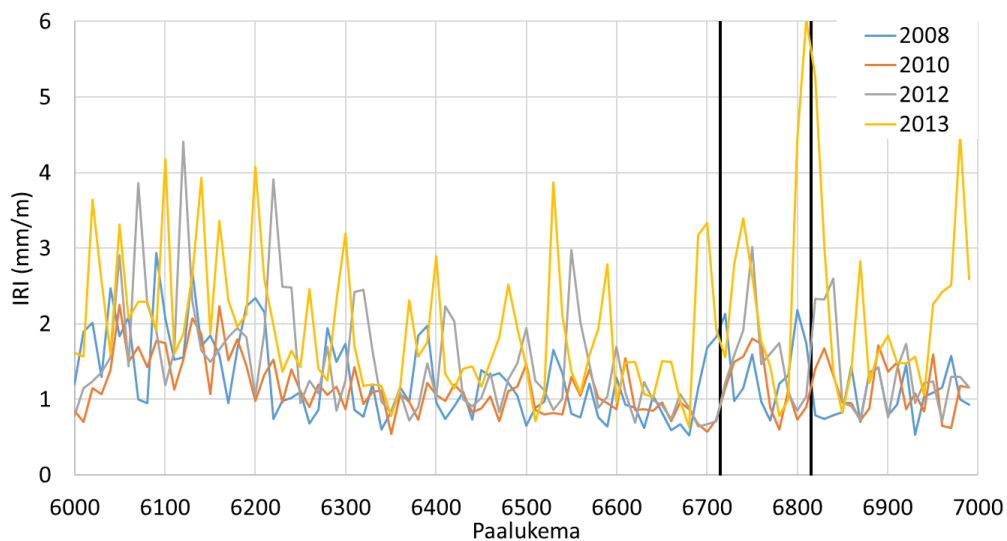
Kuva 24. Vt4 Tervola. Urasyvyys plv. 429/6000–7000 vuosina 2008, 2010, 2012 ja 2013 (Liikennevirasto 2017, muokattu).

Urasyvyyshavainnoista on laskettu päällysteen keskimääräinen urautumisnopeus (mm/v) teräskuonarakenteen osuudella sekä viereisillä vertailurakennemuksilla (kuva 25). Teräskuonarakenteella päällysteen urasyvyys on ollut vuo-

den 2008 mittauksissa keskimäärin 1 mm syvempi kuin vertailurakenneosuuksilla. Teräskuonarakenteen urautumisnopeus on ollut vuosien 2008-2013 välisen mittauksen aikana keskimäärin samaa tasoa tai hieman hitaampi kuin vertailurakenneosuuksilla. Rakenteiden urautuminen on siis käytännössä ollut molemmissa tapauksissa samaa suuruusluokkaa mittaustarkkuus huomioiden. Kuvassa 26 on esitetty PTM -mittausaineistosta laadittu esitys teräskuonarakenteen (rajattu osuus) tasaisuudesta. Vuoden 2008 mittaustuloksissa teräskuonarakenteella esiintyy hieman suurempia tasaisuusmittaustuloksia (IRI) kuin vertailurakenteella. Tuolloin päällysteen ikä on ollut 3 vuotta. Ero rakenteiden tasaisuusmittaustulosten välillä tasoittuu rakenteiden ikääntyessä. Vuoden 2013 tasaisuusmittauksissa esiintyy yksittäisiä korkeita mittaustuloksia koko osuudella.



Kuva 25. Vt 4 Tervola. Päällysteen keskimääräinen urautumisnopeus vuosina 2008-2013 aikana vt4 teräskuonarakenteella sekä viereisillä osuuksilla (Liikennevirasto 2017, muokattu).

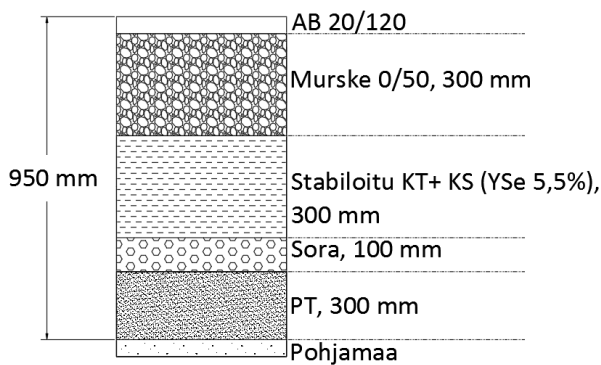


Kuva 26. Vt4 Tervola. Plv. 429/6000–7000 tasaisuus (IRI) vuosina 2008, 2010, 2012 ja 2013 (Liikennevirasto 2017, muokattu).

Litteen 1 kuvassa 73 on esitetty teräskuonarakenteen ja sitä edeltävien osuuk-sien päällysteen kunto vuosina 2009, 2010 ja 2015. Kuvasta on havaittavissa, että teräskuonarakenteen päällysteen vaurioitunut vuoteen 2015 mennessä hie-man vertailurakenteiden päällysteitä enemmän. Teräskuonarakenteen päällys-teen osalta on huomioitava, että teräskuonasta suhteitettu alkuperäinen pääl-lyste käsiteltiin viikko valmistumisensa jälkeen REM-menetelmällä, mikä on muuttanut alkuperäisen suhteitetun päällystemassan runkoaineen rakeisuutta.

2.2.2 Yt 14795 Vihtola-Jäkkö (Lappeenranta, 2006)

Yt 14795 rakennuskohteella tutkittiin kantavan kerroksen stabiloidun rikastus-hiekka-tuhkakerroksen lisäksi sementillä stabiloidun kuitusaven ja lentotuhkan seoksen (kuitutuhka) soveltuvuutta jakavan kerroksen materiaaliksi (kuva 27). Kuitutuhkan luonnehdittiin olevan lämmöneristävyuden, joustavuuden ja muo-donmuutoskestävyyden ansiosta epätasaista routanousua tasaava rakenneker-ros. Kuitusaven ja lentotuhkan seostaminen sekä stabilointi olivat osa Lappeen-rannan teknillisen yliopiston koordinoimaa Ecoinfo II -projektikonaisuutta, jonka tavoitteena oli edistää Kaakkois-Suomen alueella syntyvien sivutuotema-teriaalien hyödyntämismahdollisuuksia tierakentamisessa. Kuitusaven ja lento-tuhkan seostamisen peruseriaatteina olivat molempien sivutuotemateriaalien maarakennusteknisten ominaisuuksien hyödyntäminen siten, että seossuhdetta optimoimalla voitaisiin saavuttaa mahdollisimman hyvä materiaaliseos tiera-kenteen jakavan kerroksen materiaaliksi. Taulukossa 25 on esitetty kolmivaihei-sen laboratoriotutkimusohjelman tulosten perusteella rakentamiskäyttöä var-ten valittu seos ja sen ominaisuudet rakentamisen kannalta.



Kuva 27. Yt 14795. Suunniteltu kuitutuhkarakenne (rakenne 2) plv. 14795 1/1513-1763 (Jokinen et al. 2008, muokattu). KS = kuitusavi, PT = pohjatuhka

Taulukko 21. Yt 14795. Kuitutuhkarakenteessa käytetty materiaaliseos ja sen teknisiä ominaisuuksia sekä (Jyrävä 2006 a). KT = kostutettu len-totuhka, KS = kuitusavi ja YSe = yleissementti.

Materiaaliseos	KT + KS 25% + YSe 5,5%
Puristuslujuus 28 vrk (MPa) ¹⁾	≈1
Optimivesipitoisuus (%)	42
Tiiviyssastetavoite (%)	90

1) Puristuslujuuden alenema jäädytys-sulatuskokeen jälkeen noin 7 %

Rakentaminen

Kuitutuhkarakentamisessa toteutuneet massamäärät olivat suurempia kuin alustavasti oli arvioitu. Urakoitsijan työmaapäivänkirjan mukaan molempina rakentamispäivinä työmaalle kuljetetuissa kuitutuhkaerissä esiintyi poikkeamia vesipitoisuuden ja sekoitustyön tasalaatuisuuden osalta. Urakoitsijan tekemien laatumittausten perusteella kuitutuhkarakenteen tiivistystyössä oli kuitenkin saavutettu ennen rakentamista määritetty tiiveysastetavoite. Rakentamisen laadunvalvonnan yhteydessä tehtyjen seurantakoekappaleiden lujustaso oli kuitenkin jäänyt laboratorion suhteituskokeiden tavoitelujustasoa alhaisemmaksi.

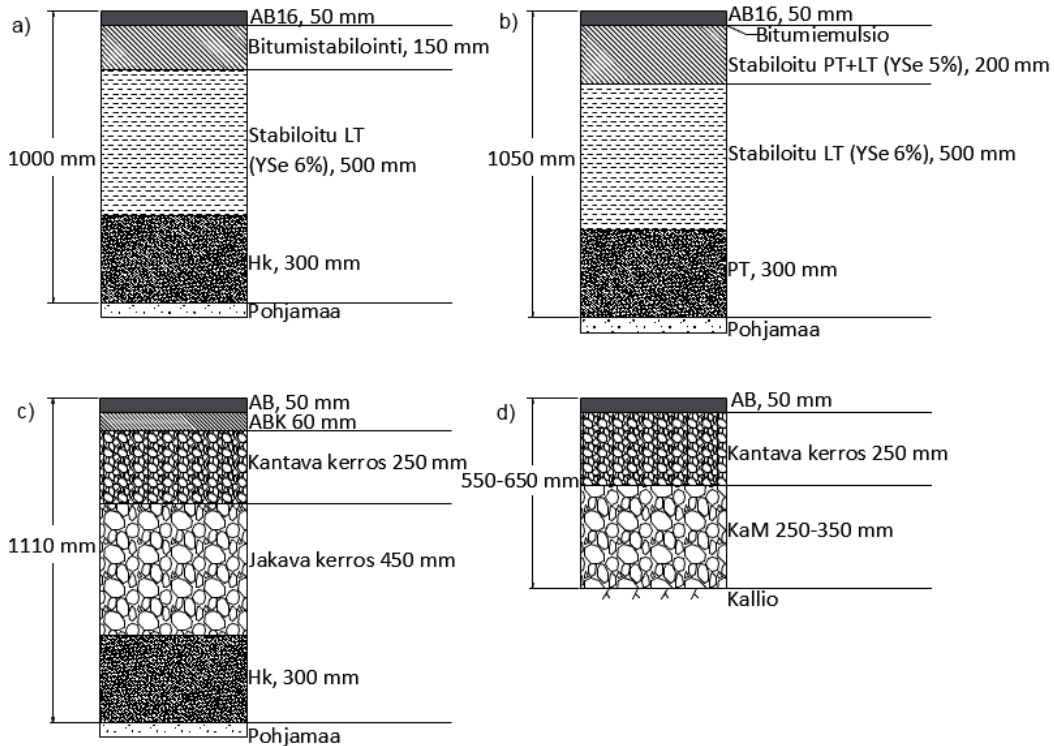
Urakoitsija oli kirjannut rakentamisen yhteydessä eräänä huomiona kuitutuhka-seoksen suuren kokoonpuristuvuuden tiivistettäessä, mikä oli johtanut rakentamisen yhteydessä suunnitellun rakennekerrospaksuuden alitukseen. Kuitutuhkan kokoonpuristuvuutta ei tutkittu yt 14795 -hankkeessa.

Seurantatutkimukset

Vertailuosuuden sekä kantavan kerroksen stabiloidun rikastushiekka-tuhkarakenteen seurantatutkimukset on esitetty kappaleessa 2.1.2.1. Kuitutuhkaosuudella päällysteen vaurioituminen ei ole ollut yhtä voimakasta kuin kantavan kerroksen stabiloidun rikastushiekka-tuhkarakenteen osuudella. Kuitutuhkaosuudella on kuitenkin enemmän vaurioita kuin vertailurakenteeksi toteutetulla murskerakenteella. Kuitutuhkarakenteen päällysteessä esiintyy pituus- ja poikisuuntaisia päällystehalkeamia. Vuosi rakentamisen jälkeen kesällä 2007 tehtyjen PTM-mittausten tuloksista on havaittavissa, että kuitutuhkarakenteen IRI-arvot ovat koko tieosuuden keskiarvotasoa suurempia. URA-mittaustulokset ovat sen sijaan keskiarvotasoa alhaisempia.

2.2.3 Mt 272 Ämttöö–Poikeljärvi (Pori, 1997)

Vuonna 1997 toteutettu Mt 272 rakennuskohde sijaitsee Porin Ämttöö–Poikeljärvi välisen tieyhteyden tierekisteriosoitteessa 272 2/340–1340. Kohteen rakentamisessa käytettiin Meri-Porin voimalaitoksen kivihiilenpolton tuhkia. Kaikki tuhkarakenteet (kuva 28) sijaitsevat uudella tielinjauksella leikkauspohjilla, penkereillä ja kallioilla. Leikkauspohjilla pohjamaa on pääosin moreenimaa-lajeja (hkSrMr-saHkMr). Leikatun osuuden moreenimaat on käytetty pengerrettyjen osuuden pengerrakentamisessa. Lentotuhkaa käytettiin lisäksi asfaltin täytejuuhteena sekä bitumistabiloinnin runkoaineena käytetyn kalliomurskeen ra-keisuuden korjaamisessa. Rakenteet toteutettiin taulukossa 26 esitettyihin sijainteihin. Taulukossa 27 on listattuna Mt 272 -rakennuskohteen tiestö- ja rakennetietoja.



Kuva 28. Mt 272. Päätien ja liittymien päällysrakenteiden periaatekuvat (Juvankoski & Kivikoski 2001, muokattu). LT = lentotuhka, PT = pohjatuhka, YSe = yleisementti.

Taulukko 22. Mt 272. Rakenteiden sijainnit. Rakennetyypit a, b, c ja d on esitetty kuvassa 28. (Juvankoski & Kivikoski 2001, muokattu)

Sijainti	Rakenne	Sijainti	Rakenne
272 2/340 - 566	a	272 2/1020 - 1340	c
272 2/566 - 660	d	Liittymät Y2 ja P1 **	b
272 2/660 - 849	a	Paikallistieosuus (60 m) **	a / b *
272 2/849 - 885	d	Yksityistieosuus (110 m) **	a / b *
272 2/885 - 1020	a		

* Saatavilla oleva aineisto ei kuvaa käytettyä rakennetyypä

** Saatavilla olevan aineiston perusteella rakenteen sijaintia ei voida kohdentaa tarkasti

Taulukko 23. Mt 272. Tiestö- ja rakennetietoja.

Poikkileikkaustyyppi	8/7
Kuormitusluokka	2 AB
KVL/ KVLRA5 (ajon./vrk)	1026/194
Päällystetyyppi	AB 16/120
Nopeusrajoitus (km/h)	80
Talvihoitoluokka	Ib ¹⁾

1) Liukkauden torjunnassa käytetään maantiesuolaa vain syys- ja kevätiliukkailla sekä liikenneturvallisuuksi erityisesti vaarantavissa ongelmatilanteissa

Rakentaminen

Rakentamisessa käytettyjen materiaalien sekoitus tehtiin voimalaitoksen lentotuhkasiilon läheisyydessä olevalla alueella. Sekoituksessa käytettiin 3 m³ anostoitimista pakkosekoitinta.

Ennen rakentamista tuhkamateriaalin tiivistettävyyttä tutkittiin koetiivistysvaiheessa usealla eri tavalla. Koetiivistyksessä varioitiin käytettävää kalustoa/kalustoyhdistelmää ja ylityskertojen lukumäärää. Rakentamisvaiheessa tiivistystyö suoritettiin ensimmäisellä ylityskerralla 12 tn sileävalssisella täryjyrällä. Lopputiivistämisessä käytettiin kumipyöräjäyrää. Jakavan kerroksen stabiloitu tuhkarakenne tiivistettiin kahtena 250 mm paksuna kerroksena.

Liittymien ja päätien jakavan kerroksen stabiloidun tuhkerakenteen toteutunut keskimääräinen tiiveysaste oli 90 % (vaihteluväli 87-94 %, vaatimus 92 %). Alhaisin jakavasta kerroksesta mitattu tiiveysaste sijoittuu paaluvälille 700-780, jossa maapohja petti tiivistettäessä ja tiivistys jätettiin vajaaksi. Paaluväleillä 450-500 ja 750-850 jakavan kerroksen alaosassa käytetty tuhka poikkesi väriltään ja tehdyn arvion perusteella myös ominaisuuksiltaan laboratorion ennakkokokeissa käytetystä tuhkasta. Alhaiseksi jääneiden tiiveysasteiden arvioitiin johtuvan laboratoriotutkimusten ja rakentamisen välisenä aikana voimalaitoksessa muodostuneen tuhkan ominaisuuksissa tapahtuneista muutoksista.

Rakentamisen yhteydessä jakavan kerroksen tuhkamateriaaliseoksesta valmistettujen seurantakoekappaleiden 28 vrk:n lujuudet ylittivät 3 MPa tavoitelujuustason ollen keskimäärin noin 4 MPa.

Rakentamisen aikana tehdyissä kantavuusmittauksissa seurattiin stabiloitujen tuhkarakenteiden kantavuuksien kehittymistä ajan suhteen. Levykuormituskokeiden tulosten perusteella jakavan ja kantavan kerroksen tuhkarakenteiden tavoitekantavuudet saavutettiin jo muutaman päivän ikäisenä. Nopeaan kantavuuskehitykseen arvioitiin vaikuttavan rakentamisajankohdan lämmin sää sekä siilossa varastoidun tuhkan korkea lämpötila.

Seurantatutkimukset

Rakentamisen jälkeen kohteella on tehty seuranta vuosien 1998-2001 välisenä aikana. Seuranta on tehty instrumenttien, kantavuus- ja palvelutasomittausten, vauriokartoituksen sekä routanousumittausten avulla. Seurantatutkimustulokset on esitetty liitteen 3 taulukossa 65.

Seurantatutkimuksissa selvitettiin päällysrakenteen routakäyttäytymistä lämpötila-antureiden ja pintavaaituksen avulla. Talven 1998-1999 mittauksissa havaittiin päätien tuhkarakenteen suurin routanousu 8.3.1999. Lämpötila-antureista kerätyn tiedon mukaan routa oli kyseisenä ajankohtana vasta juuri läpäissyt päällysrakenteen. Tämän perusteella tutkimuksessa voitiin osoittaa, että mitattu routanousu on stabiloidun lentotuhkarakenteen routimista. Kohteelle suoritettiin kesällä 2000 radiometrisiä mittauksia, joiden perusteella havaittiin riippuvuus routanousun sekä stabiloidun lentotuhkan kuivatilavuuspainon ja vesipitoisuuden välillä. Routanousun havaittiin olevan suurin silloin kuin stabiloidun lentotuhkan kuivatilavuuspaino oli alhainen ja vesipitoisuus suuri.

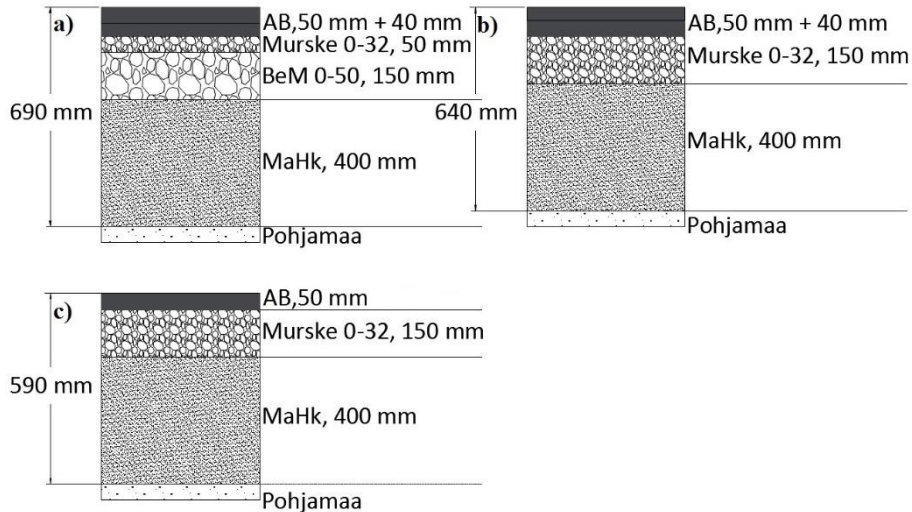
Tiekuva-aineiston perusteella tieosoteväli 272 1/6775 – 2/340 on uudelleenpäälystetty vuonna 2006. Tälle osuudelle sijoittuu yhdysteiden 13004 ja 13009 liittymät, jotka ovat todennäköisesti Juvankoski & Kivikoski (2001) kohderaportissa mainittuja liittymiä Y2 ja P1. Näihin liittymiin on toteutettu kuvassa 28 esitetyn b -rakennetyypin mukaiset rakenteet. Päätien ja sen liittymien tuhkarakenteet tieosotevälillä 272 2/0 - 2/1000 on uudelleenpäälystetty vuonna 2014 MPKJ-menetelmällä (AB16 80 kg/m²) (Liikennevirasto 2017).

Seurantareporttia ja -tutkimustuloksia tarkastelemalla voidaan todeta, että laboratoriotutkimuksissa käytetyn materiaaliseoksen tiivistyvyysominaisuudet on arvioitu rakentamisen kannalta liian optimistisiksi. Keväällä 1997 ennen rakentamista tehdyissä ennakkokokeissa tutkitun lentotuhkan tiivistäminen vaati lisäksi suuremman työmäärän kuin aiemmissa laboratoriotutkimuksissa käytetty lentotuhkamateriaali. Laboratoriotutkimusten routanousu- ja jäädytysulatuskokeissa käytettyjen koekappaleiden tiiveydet olivat suurempia kuin rakentamisessa saavutetut tiiveydet. Tämä on aiheuttanut laaturisikin, sillä toteutuneilla tiiveysasteilla stabiloiduissa rakenteissa voi tapahtua jälkitiivistymistä ja routimista. Alhaisesta tiiveysasteesta johtuvan routimisen seurauksena, kohteella on havaittu stabiloitujen rakenteiden routanousuja ja päälystevaurioita (liite 1, kuva 74).

2.2.4 Haikala, kadut (Nurmijärvi, 1999)

Nurmijärvellä Haikalan asuinalueen katurakentamisessa tutkittiin betonimurskeen ja masuunihiekan toimivuutta kadun päällysrakenteiden suodatinkerroksessa sekä masuunihiekan ja betonimurskeen yhdistelmäkäyttöä kadun päällysrakenteessa. Haikalan rakentamiskohde oli osa Ympäristöministeriön tukemaa *"Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikkörakentamisessa"* -tutkimusprojektia, jonka tavoitteena oli tutkia muun muassa lujittuvien uusiomateriaalien E-moduulia huonosti kantavan pohjamaan sekä joustavan kevennysmateriaalin päällä. Tutkimusprojektin muissa rakennuskohteissa tutkittiin lisäksi lujittuvista uusiomateriaaleista rakennetun rakennekerroksen toimimista laattamaisena rakenteena syvästabilointipilareiden yläpuolella (Forsman & Koivisto 2001).

Haikalan rakennuskohteessa toteutettiin kolme erilaista betonimursketta ja/tai masuunihiekkaa hyödyntävää päällysrakenneratkaisua pääkadun-, sivukatujen ja kevyen liikenteen väylän päällysrakenteissa (kuva 29).



Kuva 29. Haikala. Pääkadun (a), sivukatujen (b) ja kevyen liikenteen väylien (c) periaatekuvat (Forsman & Koivisto 2001, muokattu). BeM = BeM I, MaHk = masuunihiekka.

Alkuperäisessä suunnitelmassa normaalien kiviainesrakenteiden pohjavahvistukseksi suunniteltiin pilaristabilointi tai kevytsorakevennys. Kustannussäästöjen aikaansaamiseksi tehtiin vaihtoehtosuunnitelma, jonka mukaisesti rakentamisessa käytettiin alkuperäistä suunnitelmaa huomattavasti ohuempaa masuunihiekka- ja betonimurskerakennetta ilman pohjavahvistuksia sekä siirrettiin kunnallistekniikka erillisten raittien alle. Masuunihiekan käytöllä saavutettiin savipehmeikölle sijoittuvalla alueella tavanomaista päällysrakennetarkaisua ohuempi, kevyempi ja paremmin routaa eristävä rakenne. Betonimurske oli luokituksestaan BeM I. (Forsman & Koivisto 2002)

Rakentaminen

Masuunihiekkakerroksen ja pohjamaan väliin asennettiin suunnitelmien mukaisesti suodatinkangas (N3). Vuorenhaltijantien (pääkadun) kantavan kerroksen betonimurske ja masuunihiekkakerroksen väliin työmaa asensi toisen (ja turhan) suodatinkankaan, jota ei ollut suunnitelmassa. Betonimurskeella ja masuunihiekkalla rakentaminen sujui kohteessa ongelmitta.

Seurantatutkimukset

Rakentamisen jälkeen kohteella on mitattu pohjamaan painumia, routanousua, roudan syvyyttä sekä päällysrakenteen kantavuutta (taulukko 28). Vuorenhaltijantiellä (pääkatu) suurimmat mitatut painumat ja routanousut on havaittu rakentamista seuraavan talven/kevään aikana. Tätä seuraavana vuonna mitatut routanousut ovat pienempiä. Roudansyvyyden mittaustulosten perusteella routanousun on arvioitu olevan pohjamaasta aiheutuvaa.

Taulukko 24. Haikala. Seurantamittaustulokset 2001-2002. Rakenteen a ja b on esitetty kuvassa 29. (Forsman & Koivisto 2002).

	2001		2002	
	Rakenne a	Rakenne b	Rakenne a	Rakenne b
Kantavuus ka. (MPa)¹⁾	316	236 (284) ²⁾	420	205 (267) ²⁾
Painuma (mm)	12 - 25	-	4 - 10	-
Routanousu (mm)	18 - 27	-	8 - 14	-
Roudan syvyys (m)	-	-	0,73	-

1) Mitoituskantavuudet Rakenne a=277 MPa ja Rakenne b=213 MPa

2) Vertailevat mittaustulokset kahdelta eri katurakenteelta (kuva 25 rakenne b)

Rakenteiden paalukohtaiset kantavuusmittaustulokset on esitetty liitteen 3 kuvissa 96 ja 97. Kuvista on havaittavissa rakenteen kantavuuden parantuminen ajan suhteen, mikä on seurausta betonimurskeen ja masuunihiekan sitoutumisesta. Kantavuusmittaustuloksissa on toisaalta havaittavissa vaihtelua, johon vaikuttavat pohjamaan kantavuusvaihtelun lisäksi sitoutuvien rakennekerrosten vaihteleva lujuustaso eri mittauspisteissä.

Kohteen seurantamittausjakso jäi suunniteltua lyhemmäksi mittausten jatkamiseen haetun rahoituksen puuttuessa. Googlen Street Viewissä on nähtävillä valokuva-aineistoa 09/2009, joiden perusteella pääkadun ja sivukatujen päällyste on tasainen ja hyväkuntoinen. Street View -kuvien perusteella ei pysty arvioimaan onko päällystepaksuus suunnitelmassa esitetty 50 mm vai 50+40 mm. Liitteen 1 kuvassa 79 on esitetty valokuvia kohteen päällysteen kunnosta vuonna 2018.

2.2.5 Vt19 Seinäjoen itäinen ohikulkutie (Seinäjoki, 2015)

Kohteen rakentamisessa hyödynnettiin yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta eroteltua mineraalijaetta kevyen liikenteen väylän J2 jakavassa kerroksessa. Kerroksen paksuus oli 700 mm ja pohjakuonaa hyödynnettiin rakentamisessa yhteensä 1 900 tonnia. Kuonarakenne toteutettiin vuonna 2015 ja kohde päällystettiin vuonna 2016.

Kohteessa on tehty kantavuusmittausten lisäksi roudan seurantamittauksia. Käsitelty jätteenpolton pohjakuonan käyttö kohteella edellytti ympäristölupaa ja -tarkkailusuunnitelmaa muun muassa vesien seurannan osalta. Ympäristökelpoisuuden seuranta tehtiin lysimetrien avulla. Lysimetrit keräävät rakenteen läpi suotautuvan veden, jonka laatu voidaan analysoida laboratoriossa (Sormunen 2017 a). Tietoa kohteen seurantamittausten toteutustavasta ja tuloksista ei ollut saatavilla tätä selvitystä laadittaessa.

Urakoitsijan kokemuksen perusteella jätteenpolton pohjakuona vastasi toteuttamisen kannalta mursketta. Rakentamisen jälkeen tehdyissä kantavuusmittauksissa kantavuustavoite alittui selvästi, mihin yhdeksi selittäväksi tekijäksi arviottiin olevan materiaalin liian korkea vesipitoisuus. Rakenteen kantavuuden havaittiin kuitenkin kehittyvän ajan myötä kuonan lujittumisominaisuudesta johtuen. Kolme kuukautta rakentamisen jälkeen tehdyissä mittauksissa kantavuusvaatimusten havaittiin täyttyvän. (Immonen 2017)

Liikenneviraston selvityksen (2016) mukaan jätteenpolton pohjakuona ei ole mekaanisilta ominaisuuksiltaan yhtä kestävää kuin tavanomainen kiviaines. Tämä rajoittaa jätteenpolton pohjakuonan käyttömahdollisuuksia kantavassa kerroksessa. Suomalaisissa tutkimuksissa (Sormunen 2017) on havaittu jätteenpolton pohjakuonan jälkilujittumista. Lujittumisominaisuudet voivat kuitenkin vaihdella poltettavan jätteen laadun vaikutuksen seurauksena.

2.2.6 Tilanhoitajankaari, Viikin savikatu (Helsinki, 1997)

Viikin savikaduksi kutsutussa Tilanhoitajankaaren katurakenteessa tutkittiin massastabiloidun saven soveltuvuutta kadun jakavan kerroksen materiaaliksi. Tilanhoitajankaaren uusiomateriaalirakenteet liittyvät "Massastabiloitujen saven hyötykäyttö katurakenteissa" -projektiin, joka oli osana Tekesin vuosina 1995-1999 tukemaa Ympäristögeotekniikan tutkimusohjelmaa. Kohteen rakentaminen ja sitä edeltävät tutkimukset on esitetty kootusti raportissa Mäkelä et al. (2000). Tilanhoitajankaaren päällysrakenteen ja pohjanvahvistuksen periaatepoikkileikkaus on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Tilanhoitajankaari. Viikin savikadun poikkileikkauksen periaatekuva (Mäkelä et al. 2000, muokattu).

Kohteelle toteutetut rakenteet vaihtelevat liitteessä 4 esitetyn pituusleikkauksen mukaisesti siten, että osa rakenteista on perustettu pilaristabiloinnin sijasta maanvaraisesti tai kallioleikkaukselle. Rakenteissa tutkittiin eri sideaineiden vaikutusta stabiloidun saven laatuun sekä kantavaan kerrokseen asennetun teräsverkon vaikutusta päällysrakenteen ominaisuuksiin. Stabiloidun savirakenteen sisältämän päällysrakenteen kantavuusvaatimuksiksi asetettiin 136 MPa stabiloidun saven päältä ja 188 MPa päällysteen päältä.

Laboratoriokokeissa tutkittu savi oli Viikin alueelta otettua lihavaa savea, jonka vesipitoisuus vaihtelee 54-84 % välillä. Tutkimuksissa käytetyillä sideainereseptillä stabiloidulle savelle saavutettiin 95-2158 kPa:n puristuslujuus, mikä kasvoi sideaineseoksessa käytetyn sementtimäärän suhteessa. Laboratoriotutkimusten perusteella stabiloidun saven E-moduulin arviottiin olevan 150 MPa, silloin kun stabiloinnin sideaineseoksina käytettiin Se+CaO (95:5) tai JMk+Se (70:30) 12 % stabiloitavan saven massasta. (Mäkelä et al. 2000)

Tutkimuksissa käytetyt sideaineseokset ja -määrät sekä materiaaliseosten 28 vuorokauden yksiaksiaaliset puristuslujuudet on esitetty taulukossa 29.

Laboratoriokokeissa tutkittujen materiaalseosten segregatiopotentiaali vaihteli 1,0-7,8 mm²/Kh välillä. Kaikki tutkitut materiaalit olivat siis routivia, kun vedensaanti routakokeessa oli avoin. Tutkimusten yhteydessä todettiin, että koe-rakentamisen kriittisin osavaihe on sideaineen annostelu ja sekoittaminen stabiloitavaan saveen. Sideaineen sekoittaminen onnistui tehtyjen kokeiden perusteella helpoiten kaikista häiriintymisherimpään saveen. Kuivakuorisaveen sekoitettaessa sideaine ei sekoittunut kunnolla, vaan lopputuloksena oli mururakennetta, jossa sideaine oli ainoastaan rakeiden pinnalla.

Rakentaminen

Tilanhoitajankaaren rakenteen alueen savipehmeikköosuudet on pilaristabiloitu kalkki-sementtiseidaineseoksella päällysrakenteiden toteuttamista edeltävänä talvena. Ennen rakentamista rakennuspohja pengerrettiin ja tiivistettiin tasoon tsv -1,1. Stabiloidun savikerroksen rakentaminen toteutettiin tekemällä saveen stabilointityö ex-situ, jonka jälkeen stabiloitu materiaali kuljetettiin välittömästi rakennuskohteelle levitys- ja tiivistystyötä varten.

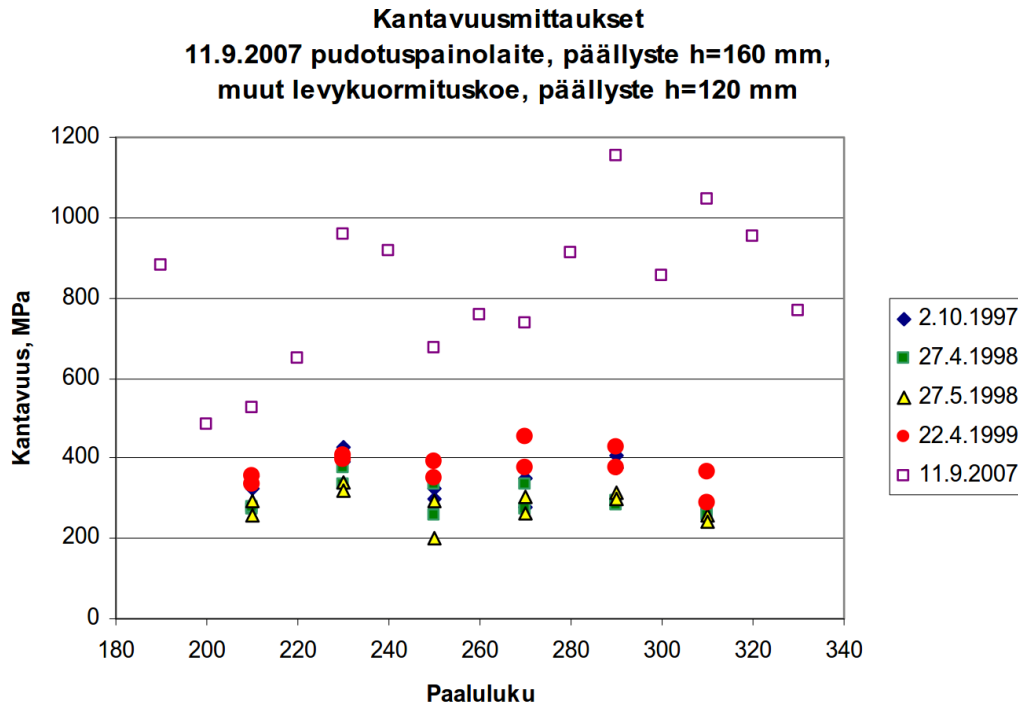
Seurantatutkimukset

Rakentamisen aikana tutkittiin stabiloidun savikerroksen kantavuutta levykuorimituskokeiden avulla. Tehdyissä kenttäkokeissa rakenteen kantavuus ylitti sille asetetun tavoitteen (taulukko 29). Rakentamista seuraavien vuosien seuranta-mittauksissa (1997-1999) rakenteiden kantavuuden havaittiin kasvavan (taulukko 29 ja kuva 31), minkä arvioitiin olevan seurausta stabiloidun saveen lujuuden kasvusta (Mäkelä et al. 2000).

Taulukko 25. Viikin savikatu. Kantavuusmittaustulokset. (Korkiala-Tanttu et al. 2008). Se = sementti, JMk = jauhettu masuunikuona, E1 = Lohja-Rudus E1 -sideaine

Paalu-lukema	Sideaine (14 %)	$\sigma_{,28}$ vrk (kPa) ¹⁾	Kantavuus (MPa)		
			Savikerroksen päältä 7/1997 (oik/vas)	Päällysteen päältä 4/1999 (oik/vas)	Päällysteen päältä 9/2007
210	E1	~550	154/145	335/354	695
230	Se+CaO (95:5)	~1300	210/199	407/398	-
250	Se+CaO (95:5)	~1300	172/155	390/348	858
270	JMk+Se (70:30)	~1400	137/153	455/375	-
290	JMk+Se (70:30)	~1400	242/177	375/425	1067
310	JMk+Se (70:30)	~1400	195/184	368/290	-
Vertailurakenne			-	-	929

1) Arvioitu julkaisussa Mäkelä et al. 2000 esitetyistä kuvaajista



Kuva 31. Viikin savikatu. Kantavuusmittaustulokset (Korkiala-Tanttu et al. 2008).

Kymmenen vuotta rakentamisen jälkeen tehdyissä mittauksissa (vuosi 2007) rakenteiden kantavuus on moninkertaistunut rakentamisen jälkeisiin mittauksiin verrattuna. Vuonna 2007 mitatut kantavuudet eivät ole kuitenkaan täysin vertailukelpoisia vuosien 1997-1999 mittauksiin nähden, sillä käytetty kantavuusmittausmenetelmä on erilainen kuin alkuperäisissä mittauksissa. Lisäksi kohde päällystettiin 40 mm:n asfalttibetonikerroksella vuonna 2004. Jos tarkastellaan pelkästään 40 mm:ä paksun asfalttibetonikerroksen laskennallista vaikutusta päällysrakenteen kantavuuteen, voidaan vaikutuksen suuruusluokan arvioida olevan noin 30-50 MPa, kun asfalttibetonin E-moduuli on 2500 MPa. Nämä tekijät huomioiden voidaan todeta, että Viikin savikadun rakennekerrosten jäykkyys on muuttunut seurantamittausten välillä ja vaikuttanut siten vuoden 2007 kantavuusmittaustuloksiin. Stabiloidun savikerroksen lujittumisen lisäksi kantavuuteen on voinut vaikuttaa muutokset pilaristabiloidun alusrakenteen sekä bitumisorakerroksen jäykkyyksissä.

Liitteen 1 kuvassa 78 on esitetty valokuvia vuosien 2007 ja 2018 vaurioinventaarioista. Valokuvista havaittavien vaurioiden lisäksi kesällä 2007 koerakennusosuudella havaittiin pituussuuntaisia päällystehalkeamia kadun keskilinjalla sekä yksi kadun läpi kulkeva poikkihalkeama. Vuoden 2007 vauriosumman perusteella, katu oli hyvässä kunnossa kymmenen vuotta rakentamisen jälkeen. Vuoden 2018 valokuvissa on havaittavissa vuonna 2007 havaittu poikkihalkeama suunnitelman paalulukemalla 313, mikä on todennäköisesti seurausta rakennetyypin muutoksesta erisuuruuksista routanousuista. Vuoden 2018 valokuvista nähdään, että rakennuskohteen päällystettä on ylläpidetty päällystepaikauksilla, mikä on usein seurausta päällysrakenteen poikki- tai pituussuuntaisesta epätasaisesta vaurioitumisesta, liikennekuormituksen kaistakohtaisesta vaihtelusta, päällysteen ylläpidon määrärahojen vähäisyydestä sekä näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Vuosina 2007 ja 2018 tehtyjen havaintojen perusteella on kuitenkin syytä epäillä, että koerakenteiden routakäyttäytyminen ja/tai

jälkitiivistäminen sekä niiden yhteisvaikutus kunnallisteknisten rakenteiden kanssa, on vaikuttanut kadun päällystevaurioiden muodostumiseen.

2.3 Suodatinkerrokset

2.3.1 Vt4 Tervola, massanvaihto (Keminmaa, 2005)

Perustiedot Vt4 Tervolan kohteesta on kuvattu tämän selvityksen kappaleessa 2.2.1. Vanha tierakenne koostui 150–200 mm asfalttilaatasta, 400 mm kantavasta kerroksesta ja 400–500 mm suodatinhiekkakerroksesta. Uusi päällysrakenne on esitetty kuvassa 21. Kohteen suodatinkerroksena käytettiin 500 mm paksua teräskuonarakennetta (OKTOa KKA 0/6 mm). Suodatinkerroksen teräskuona valmistettiin murskaamalla ja seulomalla ilmajähdytettyä konventterikuonaa. Materiaalia varastoidaan muutama kuukausi ennen käyttöä, jolla ehkäistään mahdollisen paisumisen aiheuttamat ongelmat. OKTO-KKA -materiaali valmistetaan puolestaan valokaariuuni- tai kromikonventterikuonasta (Salmenkaita & Tikkakoski 2005; Outokumpu 20xx).

Rakentaminen

Suodatinkerroksessa käytettiin sekä valokaariuuni- että kromikonventterikuonasta valmistettua teräskuonaa (OKTO-KKA 0/6 mm). Valokaariuunikuonasta valmistettu OKTO-kevytkiviaines rakennettiin kohteen oikealle kaistalle ja kromikonventterikuonasta valmistettu materiaali vasemmalle kaistalle.

Seurantatutkimukset

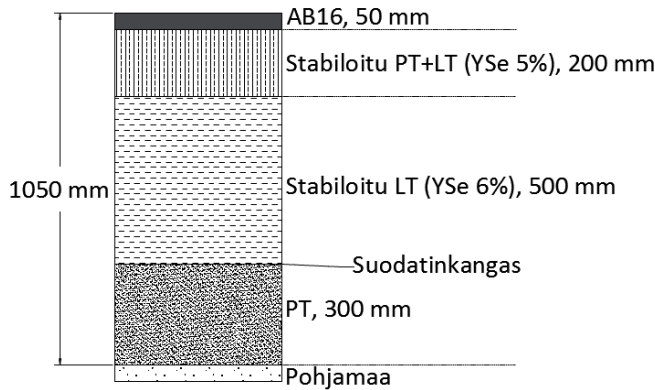
Instrumentointi ja seurantamittaustulokset on esitelty kappaleessa 2.2.1.

Rakennuskohteen päällysteen ylläpitohistorian mukaan kohteen oikealle kaistalle on suoritettu urapaikkaustoimenpiteitä vuonna 2013. Vuonna 2015 koko osuus päällystettiin uudelleen. Saatavilla olevien tutkimustietojen perusteella on ilmeistä, että urapaikkaus- tai päällystystarve ei aiheudu suodatinkerroksen OKTO-materiaalista. Kappaleessa 2.2.1 esitetyn routasyvyyskuvaajan perusteella suodatinkerroksessa käytetyn materiaalin lämmöneristävyys on ollut rakenteessa ennakoitun (laskennallinen) mukaista.

2.3.2 Mt 272 Ämttö–Poikeljärvi (Pori 1997)

Tuhkien hyödyntäminen Mt 272 rakennuskohteella kantavassa ja jakavassa kerroksessa on esitetty kohdissa 2.1.2.2 ja 2.2.3. Suodatinkerroksessa hyödynnettiin pohjatuhkaa liittymien ja kanavointien (yht. 2 kpl) alueella (kuva 32).

Pohjatuhkan E-moduuli on suunnittelussa 50 MN/m² (MPa). Pohjamaan E-moduulin ollessa 10 MN/m², 300 mm paksuisen pohjatuhkakerroksen päältä tavoittekantavuus oli 33 MN/m². Pohjatuhkan tiiveysastevaatimus oli 92 %.



Kuva 32. Mt 272. Liittymien ja kanavointien päällysrakenne, rakenne 3 (Juvankoski & Kivikoski 2001, muokattu). LT = lentotuhka, PT = pohjatuhka, YSe = yleissementti.

Rakentaminen

Rakentamisen aikana pohjatuhkakerroksen päältä levykuormituskokeella mitatut kantavuudet olivat liittymässä Y2 keskimäärin 18 MPa, kun alusrakenteen kantavuus oli 36 MPa. Liittymässä P1 pohjatuhkan päältä mitattu kantavuus oli 39 MPa, kun alusrakenteen kantavuus oli 44 MPa. Levykuormituskoe tulosten takaisinlaskennassa Odemarkin menetelmällä pohjatuhkan keskimääräiseksi moduuliksi saatiin 40 MPa.

Seurantatutkimukset

Lento- ja pohjatuhkan seoksesta koostuvan stabilointimassan Proctor-kokeissa havaittiin pohjatuhkan hienonemista/murskautumista, mikä vääristi kyseisen rakenteen rakentamisajan laadunvalvontatuloksia. Pohjatuhkan murskautumisen vaikutusta suodatinkerroksen pohjatuhkarakenteen toteuttamisen kannalta ei ole arvioitu kohteen rakentamista ja seurantaan koskevissa raporteissa. Päällysrakenteen yläosan vaurioiden on arvioitu aiheutuneen stabiloidun kerroksen vaurioitumisesta. Suodatinkerroksen pohjatuhkan merkitys päällysrakenteen yläosan vaurioihin on arvioitu vähäiseksi, vaikkakin suodatinkerroksen tavoitetta alhaisempi kantavuus on voinut osaltaan vaikuttaa ylempien stabiloitujen kerrosten tiiviiden jäämiseen tavoitetta alhaisemmaksi.

2.4 Soratiet

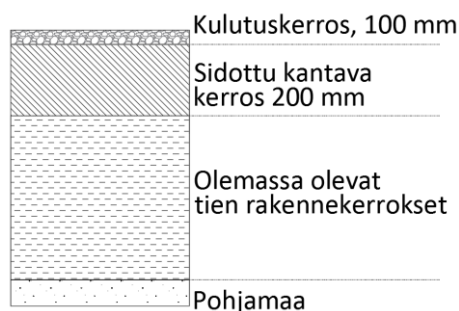
2.4.1 Yt 14567 Metsäkulmantie (Koria, 1998 ja 2001)

Yt 14567 on Kouvolassa sijaitseva sorapintainen yhdystie. Rakennuskohteen ongelmina ennen rakenteen parantamista olivat heikko kevät kantavuus, tien hallitsematon leventyminen ojiin, heikko reunakantavuus ja tien rakennekerrosten sekoittuminen pohjamaahan (saSi).

Kohteella tutkitut rakenteet sijoittuvat tierekisterin paaluvälille 14657 1/1000 – 2550, jonne rakennettiin vuosina 1998 ja 2001 yhteensä viisi erilaista tuhkarakennetta (taulukko 30). Tuhkakerrokset sijoittuvat soratien päällysrakenteen yläosaan 100-150 mm paksun kulutuskerroksen alle (kuva 33). Tuhkarakenne plv. 2135-2250 on huomionarvoinen, koska siinä käytettyä lentotuhkaa ei ole stabiloitu erillisellä sideaineella. (Ramboll 2008 d, muokattu).

Taulukko 26. Yt 14567. Rakenteet ja sijainti (Ramboll 2008 d, muokattu). aosa = aloitusosa, aet = aloitusetäisyys ja let = lopetusetäisyys

Tie	aosa	aet	let	Rakenne	Rak. vuosi
14567	1	1000	1350	Stab. LT+RPT (85:15), sideaine CaO+Yse (1:1) 5% + KaM 150 mm	2001
14567	1	1350	1500	Stab. LT+RPT (85:15), sideaine CaO+Yse (1:1) 5% + KaM 100 mm	2001
14567	1	1500	1550	Lujiteverkko + KaM 100 mm	1998
14567	1	1550	1602	Lujiteverkko + KaM 200 mm	1998
14567	1	1602	1695	Teräsverkko + KaM 200 mm	1998
14567	1	1695	1840	Stab. LT, sideaine Nordkalk FT2 6% + KaM 100 mm	1998
14567	1	1860	2000	Stab. LT, sideaine Yse 3% + KaM 100 mm	1998
14567	1	2000	2135	Murskerakenne (Vertailuosuus)	1998
14567	1	2135	2250	LT, ei erillistä sideainetta + KaM 100 mm	1998
14567	1	2250	2385	Stab. LT, sideaine Yse 6% + KaM 100 mm	1998
14567	1	2385	2550	Murskerakenne (Vertailuosuus)	1998



Kuva 33. Yt 14567. Päällysrakenteen periaatekuva. (Ramboll 2008 d, muokattu)

Rakentaminen

Vuonna 1998 materiaalien sekoitus tehtiin Korian kaatopaikalla, jossa aumavarastoituihin tuhkiin sekoitettiin tarvittava vesi- ja sideainemäärä aumasekoittimella. Vuonna 2001 materiaalien sekoitus tehtiin Koriolla asemasekoitinlaitteistolla (Tarkkio 2014).

Tuhkan levittämisessä ja esitiivistämisessä käytettiin 1998 ja 2001 tiehöylää. Rakenteet tiivistettiin hinattavalla täryvalssiyrällä. Pohjamaan/alusrakenteen kantavuus on ollut alhainen, mikä on todennäköisesti vaikeuttanut tuhkerakenteiden tiivistämistä ja lisännyt stabiloituun kerrokseen kohdistuvia käytön aikaisia vetojännityksiä.

Seurantatutkimukset

Rakenteiden kuntoa on tutkittu vauriokartoitus-, kantavuusmittaus- ja rakennetutkimusmenetelmillä. Viimeisin tutkimustieto rakenteiden toimivuudesta ja yhteenveto aikaisemmista seurantatutkimuksista on julkaistu Tarkkion (2014) diplomityössä. Tarkkion mukaan kohteen sidotut tuhkarakenteet ovat parantaneet tien kantavuutta (Liite 3, kuvat 98 ja 99). Stabiloitujen tuhkarakenteiden kantavuus on säilynyt samalla tasolla tai parantunut vuosien 1998-2017 välisissä mitauksissa.

Stabiloitujen tuhkarakenteiden lujuuskehitystä on pyritty tutkimaan rakenne­näytteenoton avulla. Eri vuosina tehdyissä poranäytteenotoissa on havaittu vaakasuuntaista halkeilua (kuva 34) kaikilla tuhkarakenneosuuksilla, jolloin rakenteesta on ollut vaikea porata ehjiä rakennenyhteitä. Kuvan 34 näytteenotto­reiässä oleva vesi on peräisin porauslaitteesta.



Kuva 34. Yt 14567. Rakennenyhteenotossa halkeillut näyte­kappale paalu­lukema 1400 (kuva: Tero Jokinen 20.8.2013).

2.4.2 Mt 5341 Mustinsalo Sarkalahti (Leppävirta, 2002)

Kohteessa tutkittiin lehtotuhkan hyödyntämistä kelirikkoisen soratien parantamisessa kahdella erilaisella rakennetyypillä:

1. lentotuhka+sementti -sideaineseoksella stabiloitu soratien kantava kerros (tierekisterin plv. 5341 3/5000 – 5280 ja 5341 3/5979 – 6379)
2. kantavan kerroksen sidottu lentotuhkerakkerros, 200 mm paksu (plv. 5341 3/5280 – 6140)

Rakennetyypissä 2 on vastaava periaate kuin kuvassa 33 esitetty Yt 14567:n rakenne.

Rakentaminen

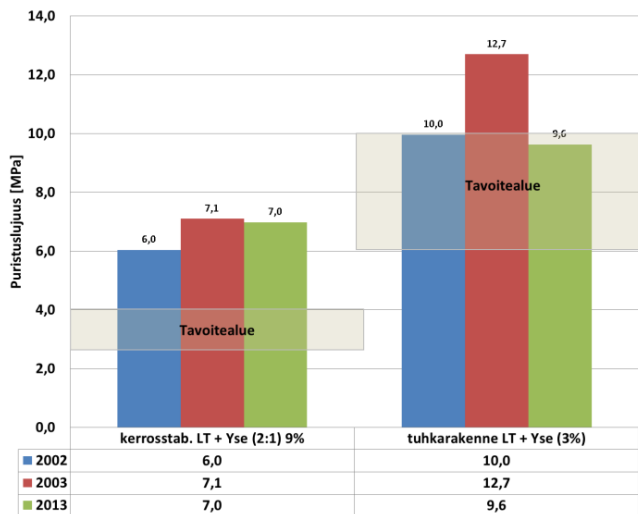
Rakentamisessa käytetyt tuhkamateriaalit sekoitettiin asemasekoittimella. Rakentamisessa käytetty lentotuhka varastoitui kuivana ja kostutettiin vasta sekoitustyön yhteydessä, jotta tuhkan lujittumisominaisuudet eivät heikkenisi kostutuksen seurauksena varastoinnin aikana. Tuhka varastoitui ja sekoitettiin Varkaudessa, joka on noin 30 kilometrin etäisyydellä rakennuskohteelta.

Rakenne 1: Stabiloitu kantava kerros rakennettiin syyskuussa 2002. Ennen stabiloinnin rakentamista olemassa olevan tierakenteen yläosa homogenisoitiin sekoitusjyrsimellä. Valmis sideaineseos levitettiin homogenisoidun kerroksen päälle asfaltinlevittimellä, minkä jälkeen sideaine ja homogenisoitu kerros jyr­sinsekoitettiin sekä kostutettiin tavoitevesipitoisuuteen ennen kerroksen tiivistämistä.

Rakenne 2: Ensimmäisessä työvaiheessa olemassa olevan tierakenteen pinta­kerros levitettiin tien reunoille. Reunatuot tiivistettiin ennen tuhkerakkeroksen le­vitystä ja tiivistämistä.

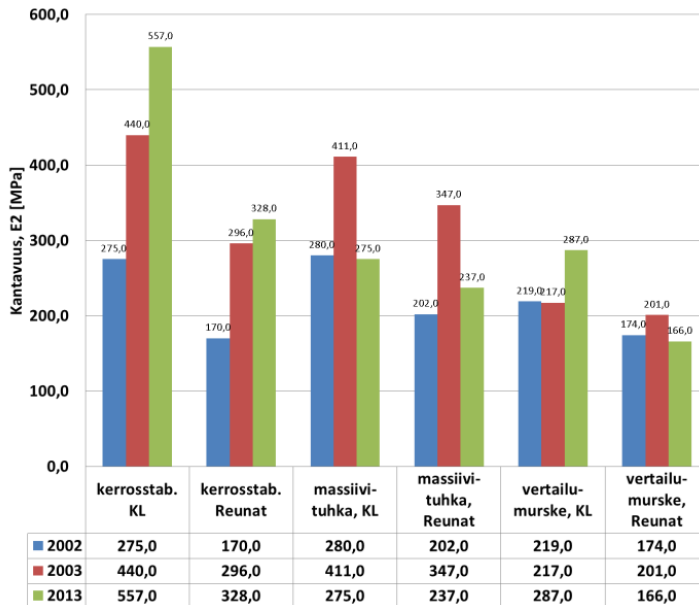
Seurantatutkimukset

Rakenteiden pitkäaikaiskestävyyttä on tutkittu kantavuusmittausten, vauriokartoitusten ja rakennetutkimuksien avulla (Tarkkio 2014). Vuoden 2013 vauriokartoituksessa tien arvioitiin olevan yleiskunniltaan hyvä. Yksittäisiä ongelmia tiellä olivat puutteellinen sivukaltevuus, reunapalteet sekä lievä urautuminen ajoradan reunoissa. Yksittäisillä erittäin kuivilla osuuksilla kulutuskerroksen pintaan oli muodostunut epätasaisuutta (ns. nimismiehen kihara). Paikoitellen kulutuskerros oli niin ohut, että stabiloitu kantava kerros sekä sidottu kantava tuhkarakenne olivat nähtävillä tien pinnassa (liite 1 kuva 82). Rakenteesta otetuista poranäytteistä määritetyt puristuslujuudet on esitetty kuvassa 35. Tulosten perusteella molempien rakenteiden lujuus on säilynyt tavoitetasolla.



Kuva 35. Mt 5341. Rakennenäytteiden puristuslujuudet sekä laboratorion suhteituskokeissa asetetut tavoitteet (Tarkkio 2014).

Seurantatutkimusten yhteydessä tehdyt kantavuusmittaukset sekä kohteella aiemmin mitatut kantavuudet on esitetty kuvassa 36 (Tarkkio 2014). Kantavuudet olivat säilyneet pääpiirteittäin samansuuruisina seurantatutkimusten aikana, vastaavasti kuin rakennenäytteiden puristuslujuudet. Tien reunaosilta mitatut kantavuudet ovat alhaisempia kuin tien keskiosalla kaikilla rakenteilla, mikä on tyypillinen havainto sorateilla. Rakennuskohteen hyvä lähtötilanteen kantavuus on edesauttanut molempien rakenteiden tiivistämistä ja toiminut kantavan pohjana dynaamisesti kuormitetuille hydraulisesti sidotuille jäykille kerroksille.



Kuva 36. Mt 5341. Seurantatutkimusten kantavuusmittaustulosten yhteenveto (Tarkkio 2014).

Tienpitäjän kommentit, haastattelut 2003

Tienpitäjät ovat haastattelututkimuksessa (Tieliikelaitos ja SGT 2002) todenneet kohteen rakenteista seuraavasti.

Stabiloitu kantava kerros (rakenne 1):

- Yleiskunto vastaa normaalia soratien kuntoa,
- Syksyn 2002 kostean jakson aikana ilmeni lievää pintapehmenemistä, joka oli voimakkaampaa kuin viereisellä perinteisellä tavalla kunnostetulla osuudella.
- Keväällä 2003 pintakunto oli selkeästi parantunut menneiden vuosien tasosta.
- Kevätkelirikon vaikutus oli aiempaa lievempi, joten liikennöinti ja kelirikon hoito olivat huomattavasti aiempaa helpompaa, muutoin kunnossapito kuten muillakin sorateilla.
- Jonkin verran esiintyy halkeilua, erityisesti reunoilla. Jälkimmäisen stabilointiosuuden alussa on pahempi 10-15 m vauriokohta, jossa vaurioita on esiintynyt koko tien leveydellä.

Sidottu kantava tuhkakerros (rakenne 2):

- Melko suuret routaheitteet, pinnan "aaltoilu" ja keskeltä pehmeät ja reunoiltaan terävsärmäiset silmäkkeet (kooltaan renkaanmenevistä rei'istä muutama neliöön).
- Silmäkkeitä, joissa pinta pehmeni tuhkan pintaan saakka, muodostui kuivan kesän runsaan liikennöinnin aikana sekä varsinkin syksyn kostean jakson aikana, jolloin oli käynnissä myös soranajo. Silmäkkeitä on paikattu ja tasattu pitkin syksyä useasti (pinnan jäätymis-sulamissykliä takia pintakelirikko on ollut muuallakin ko. tiellä poikkeuksellisen voimakas).
- Silmäkkeidenkin kohdalla tuhkakerros oli sitoutunut todella kovaksi kerrokseksi, jota oli erittäin vaikea kaivaa auki.
- Silmäkkeiden syyksi on arvioitu huonosti vettä johtavaa tuhkakerrosta ja riittämätöntä pinnan kallistusta, mikä on estänyt pintakerroksen kuivumisen alaspäin ja sivulle. Silmäkkeitä ja aaltoilua on esiintynyt erityisesti tietyllä alueella, mihin selityksenä saattaa olla erityisen hiekkapitoisten / tasarakeisten kuormien osuminen ao. alueen kulutuskerrokseen

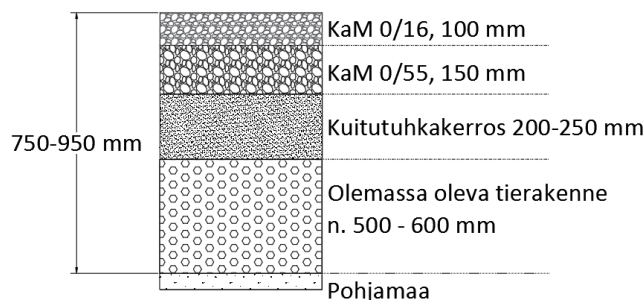
- Kesän aikana muodostui laikkuja, joista kulutuskerros kului pois ja kova, sileä tuhkerakkeen pinta tuli näkyviin. Syyksi on arvioitu sitä, että kulutuskerros on jäänyt paikoin liian ohueksi tai tuhkerakkeen yläpinta on jäänyt liian sileäksi, jolloin kulutuskerros ei tartu riittävän hyvin tuhkerakkeen pintaan.
- Kevään pintakelirikon aikaan tuhkarakenne oli aiempaa paremmassa kunnossa eikä vaatinut kevätkelirikon aikaan juurikaan erityistä kunnostamista. Kevään ja kesän aikana kunnossapitotoimenpiteet olivat vastaavat kuin muillakin sorateilla.
- Osuudella on vaurioalue (30-40 m), jossa tuhkerakos on halkeillut. Muilla osin on nähtävissä, että tuhkerakos on selvästi tasoittanut ja loiventanut syntyneitä routanousuja eikä ole mennyt rikki, vaikka on esiintynyt jopa 15 cm loivapiirteisiä patteja.

Molempien rakenteiden kommentit (rakenteet 1 ja 2):

- Tien kantavuus on parantunut. Erityisesti tien pientareiden kunto ja reunakantavuus ovat parantuneet oleellisesti.
- Murskerakenne läpäisee kosteutta tuhkarakennetta tai stabilointia paremmin, jolloin pintakelirikko on syksyisin ja keväisin lievempää. Toisaalta murskerakenteen nopeampi kuivuminen aiheuttaa tuhkarakennetta suuremman pölynsidontatarpeen ja pölynsidonnin uusimistarpeen kesän aikana.
- Kohteen kuivatus on puutteellinen.

2.4.3 Yt 13791 välillä Vt 11 - Ala-Pinsiö (Nokia, 2012)

Murskepintaisen Pinsiöntien rakenteen parantamisen yhteydessä vuonna 2012, päällysrakenteen jakava kerros toteutettiin kuitutuhkarakenteella paaluvälillä 13971 1/580 – 3340. Kuitutuhkaseoksessa käytettiin turpeen- ja puunpolton lentotuhkaa (UPM Valkeakoski) sekä keräyspaperin siistausprosessin (SCA, Nokia) sivutuotteena syntyvää siistauslietettä (kuitusavi). Kuvassa 37 on esitetty rakennuskohteessa toteutettu kuitutuhkarakenne. Kuitutuhkarakenteen tavoitteena oli parantaa tierakenteen käyttäytymistä kelirikkoaikana. Kohteeseen toteutettiin myös vertailuosuus perinteisellä murskerakenteella, joka sijoittuu tie-rekisterin paaluvälille 3500–4000. (Ronkainen et al. 2011)



Kuva 37. Yt 13791. Periaatekuva päällysrakenteesta (Ronkainen et al. 2011, muokattu).

Ennen rakenteen parantamista tie oli huonokuntoinen. Tiesuunnitelmaselostuksen (Kirvesniemi et al. 2009) mukaan rakennuskohteella on esiintynyt keväisin monin paikoin runkokelirikkoa ja reunakantavuus on ollut paikoin huono. Ongelmien on arvioitu olevan seurausta puutteellisista sivuojista (kuivatus) sekä puutteellisista sekoittuneista tierakenteista. Taulukossa 31 on esitetty kohteen tiestö- ja rakennetietoja.

Taulukko 27. Yt 13791. Tiestö- ja rakennetietoja.

Tien leveys (m)	5,5 – 6,5
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	179/11
Nopeusrajoitus (km/h)	50
Hoitoluokka	III

Rakentaminen

Tuhka, kuitusavi, sideaine ja vesi sekoitettiin panostoimisella asemasekoittimella, jonka arvioitiin soveltuvan hyvin kyseisten sivutuotemateriaalien sekoittamiseen. Ko. materiaaliseoksella sekoittimen kapasiteetti vaihteli 150-200 t/h välillä.

Sääolosuhteet vaihtelivat 2.-27.7.2012 tehdyn rakentamisen aikana. Sateisella säällä varastoitujen tuhkamateriaalien vesipitoisuudet kasvoivat, mikä vaikeutti materiaaliseoksen levitys- ja tiivistystyötä (liite 5, kuva 105 c). Liian kosteina levitetyt seokset häiriintyivät tiivistystyön yhteydessä. Häiriintyneet osuudet jätettiin muista osuuksista poiketen peittämättä yön ajaksi ja osuus rauhoitettiin liikenteeltä. Häiriintyneet osuudet peitettiin murskeella seuraavan työvuoron alussa ja tiivistettiin murskekerroksen päältä ilman täryä. Liian suuren vesipitoisuuden vaikutusta rakenteen laatuun pyrittiin ehkäisemään säätämällä sekoitettavien materiaalien keskinäisiä seossuhteita. Säätäminen tehtiin lisäämällä seokseen kuivaa lentotuhkaa ja sideainetta. Säätö vaikutti taulukossa 32 esitettyihin rakenteisiin. (Ronkainen et al. 2011, muokattu)

Taulukko 28. Yt 13791. Jakavan kerroksen kuitutuhkakerroksen materiaaliseokset ja kerrospaksuudet eri paaluväleillä. Suluissa esitetyt runkoainemateriaalit on sekoitettu ensin, johon on lisätty sementtiä. (Ronkainen et al. 2011, muokattu). Aosa = aloitusosa, Aet = aloitusetäisyys, Loet = lopetusetäisyys, KT = kasavarastoitu lentotuhka, LT = kuiva siilovarastoitu lentotuhka, KS = kuitusavi ja YSe = yleissementti.

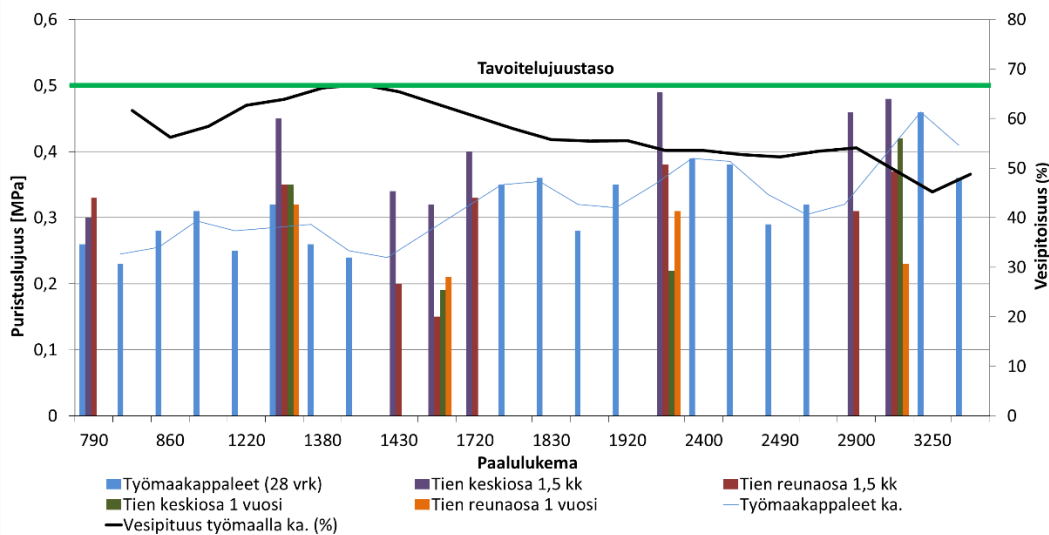
Tie	Aosa	Aet	Loet	Pituus (m)	Runkoaine	Sideaine	Kerrospaksuus
13791	1	580	630	50	(KT 85% + LT 15%)	YSe 7%	200
13791	1	630	680	50	(KT 65% + LT 15% + KS 20%)	YSe 7%	200
13791	1	680	990	310	(KT 45% + LT 15% + KS 40%)	YSe 7%	200
13791	1	990	1330	340	(KT 45% + LT 15% + KS 40%)	YSe 7%	250
13791	1	1330	1650	320	(KT 60% + KS 40%)	YSe 5%	250
13791	1	1650	3300	1650	(KT 60% + KS 40%)	YSe 5%	200

Seossuhteiden säädön avulla seoksesta saatiin rakentamiskelpoista. Rakentamisen aikana kuitutuhkaseoksen vesipitoisuutta ja tiivistymistä seurattiin laadunvalvontakokeilla (kuivaus, Proctor ja Troxler). Rakentamisen aikana työmaalla tiivistettiin koekappaleita seurantaan varten, jotka koestettiin noin kuukauden lujittumisajan jälkeen (kuva 38) (Mäkinen & Ronkainen 2013).

Rakentamisen loppuvaiheessa kohteella havaittiin yksittäisiä 15–20 metrin pituisia jaksoja, joissa päällysrakenne oli vaurioitunut. Osuuksia havaittiin olevan yhteensä noin 15 kappaletta, joista suurin osa sijoittui osuuden alkupäähän (viimeisimpänä rakennettu osuus) (Kousa 2012). Vaurioituneet kohdat paikattiin murskeella.

Seurantatutkimukset

Rakentamisessa käytetyn materiaalseoksen lujuuden kehittymistä on seurattu määrittämällä rakenteesta porattujen näytekappaleiden yksiaksiaalinen puristuslujuus. Rakennenäytteet on otettu noin 1,5 kk ja noin 1 vuosi rakentamisen jälkeen (kuva 38). Tuloksista ilmenee, että työmaalle saapuneen seoksen korkea vesipitoisuus on vaikuttanut rakenteen lujittumiseen. Rakennenäytteiden puristuskoetulosten perusteella lujuuskehitys on heikentynyt ensimmäisen vuoden aikana. Tien reunaosilta porattujen rakennenäytteiden lujuudet ovat kauttaaltaan heikompia kuin tien keskiosalla.



Kuva 38. Yt 13791. Kuitutuhkarakennenäytteiden yksiaksiaalinen puristuslujuus ja työmaanäytteiden vesipitoisuus (KL+1,5 m = näytteenotopisteen etäisyys tien keskilinjasta) (Mäkinen 2017, muokattu).

Kuntokartoituksessa 2016 todettiin, että rakenteessa ei esiinny vaurioita, vaan merkittävimmät havainnot olivat liikenteen aiheuttama kulutuskerroksen urautuminen. Seurantatutkimuksen yhteydessä tehdyistä koekuopista (pl 740, 1460 ja 2020) tehtyjen mittausten perusteella, kuitutuhkakerroksen päällä olevan murskekerroksen paksuuden havaittiin vaihtelevan 200–230 mm välillä. Kohteen murskekerroksen paksuutta on siis kasvatettu rakentamisajankohdan jälkeen yli 50 mm.

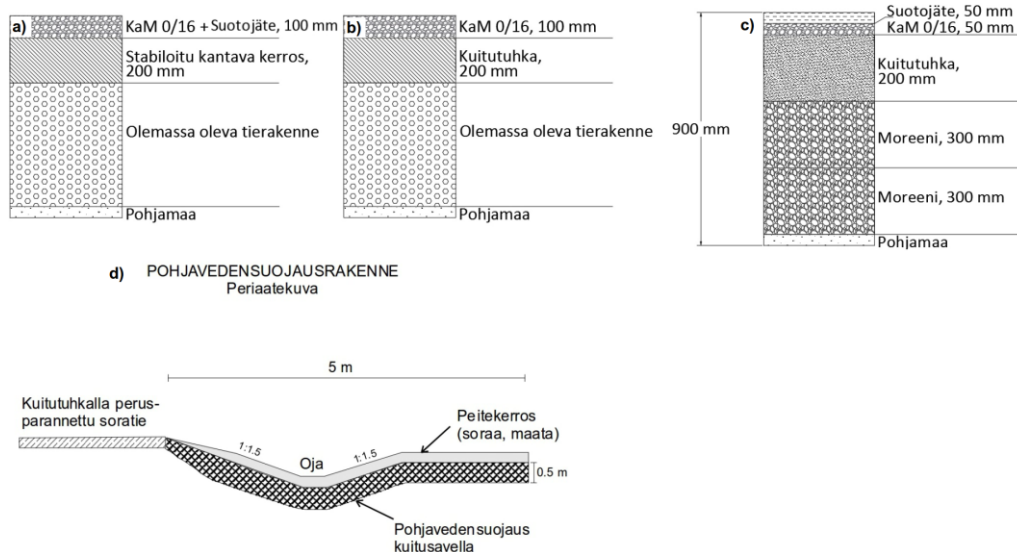
Tienkäyttäjät ovat raportoineet, että kulutuskerros pehmenee sateella ja sotkee ajoneuvoja. Syksyllä 2015 tien pinnasta otettujen murskenäytteiden vesipitoisuus oli suuri (16–22 %). Näytteistä tutkittiin lisäksi dielektrisyys, jonka perusteella todettiin, että kohteella käytetty kunnossapitomurske pidättää paljon vettä (Valkonen 2017). Kulutuskerroksen kuivatusta kohteella heikentää lisäksi se, että sitomattomien murskekerrosten alapuolinen kuitutuhkakerros läpäisee vettä heikommin kuin sitomaton materiaali (Mäkinen 2017).

2.4.4 Kukkia Cirlet (Pälkäne, 2002-2005)

2002-2005 toteutettu Kukkia-Cirlet-tutkimushanke oli osa Euroopan unionin rahoittamaa Life-Environment -hanketta. Hankkeen tavoitteena oli osoittaa, että uusiomateriaaliratkaisut ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan, ympäristövaikutuksiltaan ja taloudellisuudeltaan kilpailukykyisiä vaihtoehtoja muun muassa alemman tieverkon parantamisessa. Hankkeeseen sisältyi mm. seuraavia osavaiheita (Ramboll & Tiehallinto 2005):

- Vuosina 2002 ja 2003 toteutetut rakenteet (kuva 39)
 - Soratien parantaminen stabiloimalla
 - Soratien parantaminen ja kevyen liikenteen rakentaminen kuitutuhkalla
 - Kuitutuhkan hyödyntäminen päällystetyn tien pientareiden levennysrakenteissa
 - Kuitusaven hyödyntäminen pohjavedensuojusrakenteena (tutkittava rakenne ei sijoitu oikealle pohjavesialueelle)
 - Suotojätteen hyödyntäminen soratien kulutuskerroksessa
- Seurantatutkimukset
- Tulosten ympäristöllisten vaikutusten arviointi
- Tulosten taloudellisten vaikutusten arviointi

Vuonna 2002 tutkittiin soratien Mt 3201 parantamista stabiloimalla. Kohteella esiintyi ennen rakenteen parantamista routaongelmia sekä kantavuuspuutteita. Kohteessa tutkittiin murskekerroksen stabilointia lentotuhka+sementti-sideaineseoksella sekä kalsiumkloridipitoisen suotojätteen käyttöä soratien kulutuskerroksen murskeen seassa ehkäisemässä kulutuskerroksen kuivumista ja pölyämistä (kuva 39 a). Kohteelle toteutettiin vertailurakenteina kelirikkokunnos, jossa olemassa olevan tierakenteen paksuutta kasvatettiin 300 mm:n KaM 0/32 -murskekerroksella sekä kulutuskerroksen uusiminen perinteisellä murskekiiviaineksella sekä suotojätteen ja murskeen seoksella. (SCC Viatek Oy 2003 a)



Kuva 39. Kukkia Cirlet -hanke. Toteutettujen rakenteiden periaatekuvat. a) Mt 3201, stabiloitu kantava kerros, b) Pt 13981, kuitutuhkarakenne, c) pehmeikölle sijoittuvan klv:n päällysrakenne ja d) Pt 13981, pohjavedensuojusrakenne kuitusavella (suojauskoerakenne ei sijaitse pohjavesialueella) (SCC Viatek Oy 2003 a, muokattu).

Kohteessa Pt 13981 tutkittiin kuitutuhkan (siistauslietteen, lentotuhkan ja sementin seos) käyttöä eristävänä ja erottava kerroksena soratien rakenteen parantamisessa (kuva 39 b) sekä kevyen liikenteen väylän rakentamisessa (kuva 39 c). Kuitutuhkarakenteet toteutettiin soratielle, joka ennen rakenteen parantamista oli heikosti kantava ja roudan vaurioittama. Kohteeseen toteutettiin lisäksi koerakenne, jossa tutkittiin kuitusaven soveltuvuutta pohjavedensuojusrakenteeksi (kuva 39 d). Koerakenne ei todellisuudessa sijoittunut pohjavesialueelle. (SCC Viatek Oy 2003 a)

Kukia Circler -hankkeessa tutkitut uusiomateriaalirakenteet, -rakenteissa käytettyjen materiaalien seossuhteet sekä rakenteiden sijainnit on esitetty taulukossa 33. Kuvassa 40 on esitetty stabiloidun kantavan kerroksen suhteituskokeiden vaiheen II tulokset.

Rakentamisessa käytetyillä sideaineratkaisuilla A-C puristuslujuuden alenemat jäädytys-sulatuskokeen jälkeen ovat noin 41 %, 48 % ja 27 %. *Tuhkarakentamisen käsikirjan* mukaan hyväksyttävä lujuuden alenema olisi < 20 % (Kiviniemi et al. 2012). Kuvasta 40 nähdään, että yleisementillä saavutettiin suurin lujuus sekä alhaisin lujuuden alenema jäädytys-sulatuskokeen jälkeen.

Taulukko 29. Kukkia Cirlet -hanke. Uusiomateriaalirakennetyypit ja niiden sijainnit. Stabiloidun kantavan kerroksen sideainetyypit A-C on esitetty kuvassa 40. (SCC Viatek Oy 2003 a). Aosa = aloitusosa, Aet = aloitusetaisyys ja Loet = lopetusetaisyys.

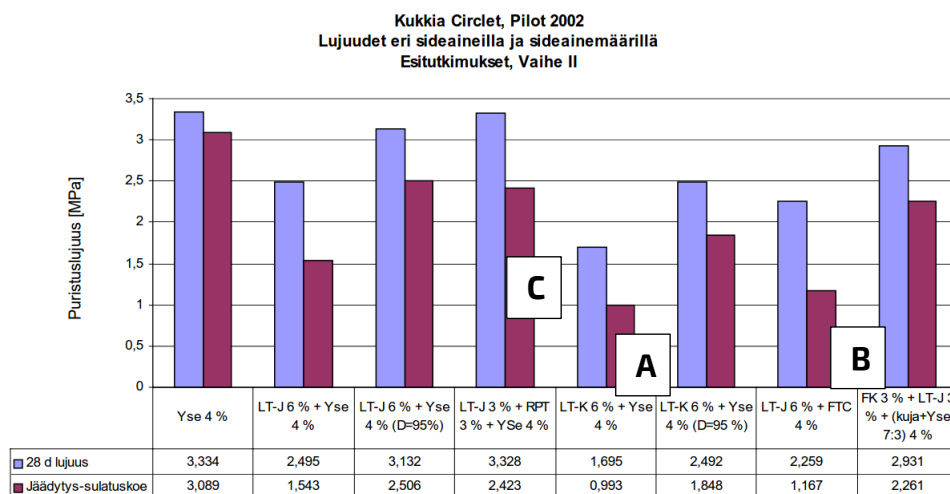
Tie	Aosa	Aet	Loet	Pituus (m)	Rakenne	Kerrospaksuus (mm)
3201	3	2850 7640 10340	4350 8690 12180	1500 1050 1840	Stabiloitu kantava kerros (A) LT+YSe (3:2) ¹⁾ 10 % ²⁾ + murske	200
3201	3	5800	7640	1840	Stabiloitu kantava kerros (B) LT+FTC (3:2) 10 % + murske	200
3201	3	9150	9320	170	Kulutuserros SJ+KaM, KaM 0/16 ³⁾	50 + 50
3201	3	9320	10340	1020	Stabiloitu kantava kerros (C) LT+RPT+YSe (3:3:4) 10 % +murske	200
13981	1	340 2000	760 2500	420 500	Sidottu kantava kerros LT 39 % + KS 55 % + YSe 6 % Kulutuserros SJ 7,5 % + KaM 0/16	200 50
13981	1	360	390	30	Pohjavedensuojaurakenne KS (ei todellinen pohjavesialue)	300-500
Kevyen liikenteen väylä (N:6805667, E:374737 – N:6805528, E:374307) ⁴⁾				1200	Sidottu kantava kerros LT 39 % + KS 55 % + YSe 6 % Kulutuserros SJ 7,5 % + KaM 0/16	200
Kevyen liikenteen väylä (N:6805703, E:374734 – N:6806480, E:375435)					Moreenipenger Sidottu kantava kerros LT 39 % + KS 55 % + YSe 6 % Kulutuserros SJ 7,5 % + KaM 0/16	50 200 50
						600

1) Sideaineseossuhde paino-%. LT = kuiva lentotuhka, UPM Jämsä/Jämsänkoski, FTC = Nordkalk Oy:n kalkki- ja sementtipohjainen sideainetuote. RPT = Helsingin Energian rikinpoistolopputuote.

2) Paino-%:a stabiloitavan tierakenteen murskeen kuivamassasta.

3) SJ= Kalsiumkloridipitoinen suotojäte. Sekoitettu kulutuserroksen murskeeseen 7,5 p-%:a kulutuserroksen murskeen kuivamassasta.

4) Pälkäneen kunnan alueella kulkevien jalankulku- ja pyöräteiden arvioidut aloitus- ja lopetus-pisteet ETRS-TM35FIN -koordinaatistossa.

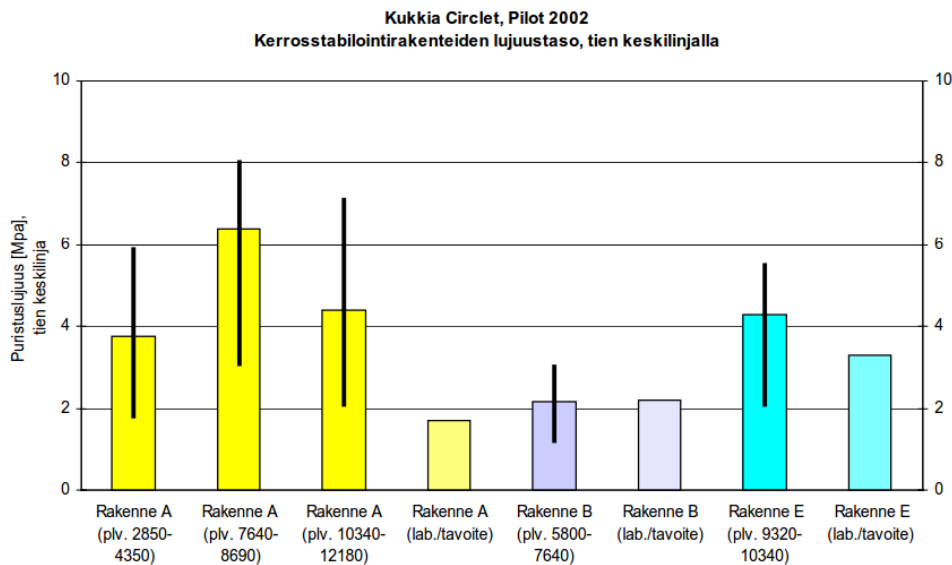


Kuva 40. Kukkia Cirlet, Mt 3201. Suhteituskokeiden yhteenvedo. A, B ja C ovat kohteen rakentamisessa käytettyjä sideaineratkaisuja. (Tarkkio 2014).

Rakentaminen

Kantavan kerroksen stabiloinnissa käytetyt sideaineseokset sekä kulutuskerroksen materiaalina tutkittu suotojätteen ja kalliomurskeen seos sekoitettiin asemasekoittimella. Lisäksi rakentamisessa kokeiltiin suotojätteen sekoittamista kulutuskerroksen murskeeseen tiehöylällä paaluvälillä 4350-5800. Sideaineiden sekoituksessa ilmeni rakentamisen aikana ongelmia, kun sideaineseos pölysi kuivana. Sekoitussyrsintätyön yhteydessä sideaineseosta jouduttiin kastelemaan pölyämisen vähentämiseksi. Koska ylimääräinen sideaineseoksen kastelu heikentää sideaineseoksen reaktiivisuutta, kasvatettiin olemassa olevaan murskekerrokseen sekoitettavan sideaineseoksen määrää 2 kg/m². Soratierungossa esiintyneet suuret kivet aiheuttivat rakentamisen aikana sekoitusjyrsimen ajoittaisen rikkoontumisen, mikä aiheutti rakentamisen keskeytyksiä (SCC Viatek Oy 2003 a).

Kuvassa 41 on esitetty stabiloidun kantavan kerroksen rakentamisen aikaisten työmaakoekappaleiden lujuudet sekä laboratorion ennakkokokeissa määritetyt lujuuden tavoitetasot. Sekä reuna- että keskiosaa edustavien työmaakoekappaleiden lujuudet ylittivät laboratorion ennakkokokeissa asetetut lujuustavoitteet. Hyvä lujuuskehitys kuvaa sideaineiden valmistus-, levitys- ja sekoitustyön onnistumista kohteessa.



Kuva 41. Kukkia Circler, Mt 3201. Kerrosstabilointirakenteiden työmaakoekappaleiden puristuslujuudet (28 d) tien keskilinjalla. Musta viiva palkkien yläosassa ilmaisee mitattujen puristuslujuuksien vaihteluväliä (SCC Viatek 2003 a).

Kuitutuhkarakentamisen aikana havaittiin tiivistetyn kuitutuhkakerroksen urautuminen työmaaliikenteen vaikutuksesta. Tätä ehkäistiin rakentamalla kuitutuhkan päälle noin 100 mm:n paksuinen murskekerros, jolla parannettiin rakenteen kantavuutta työmaan kuorma-autoliikennettä varten.

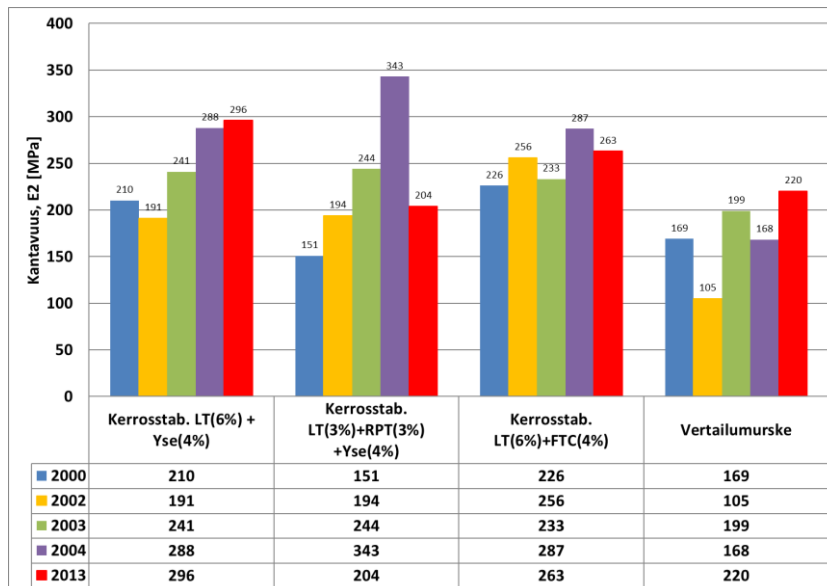
Kevyen liikenteen väylien kapea poikkileikkaus aiheutti ongelmia rakentamisessa. Kuitutuhka tarttui kuorma-autojen lavoihin kiinni, jolloin kuormien purkamiseksi lava oli nostettava pystyasentoon, mikä oli työturvallisuusriski kapealla penkereellä. Lisäksi kuitutuhkan levittäminen kapealle poikkileikkaukselle johti materiaaliseoksen leviämiseen pientareille.

Seurantatutkimukset

Kukkia Cirlet -hankkeen loppuraportissa on arvioitu kokonaisvaltaisesti rakentamisen, materiaalilogistiikan sekä eri rakenteiden toimivuutta. Rakentamisen materiaalilogistiikan eräänä keskeisenä kokonaisuutena olleesta aumasekoitustyövaiheesta on kirjattu seuraavia kommentteja:

- Sementin lisääminen aumasekoituksen yhteydessä on haastavaa sementin pölyämisestä johtuen
- Suuritehoisen aumasekoittimen käyttö edellyttää suuria massamääriä ja/tai useiden rakennuskohteiden toteuttamista samasta sekoituspisteestä
- Aumasekoitinta käytettäessä sekoitusalueen tulee olla riittävän suuri

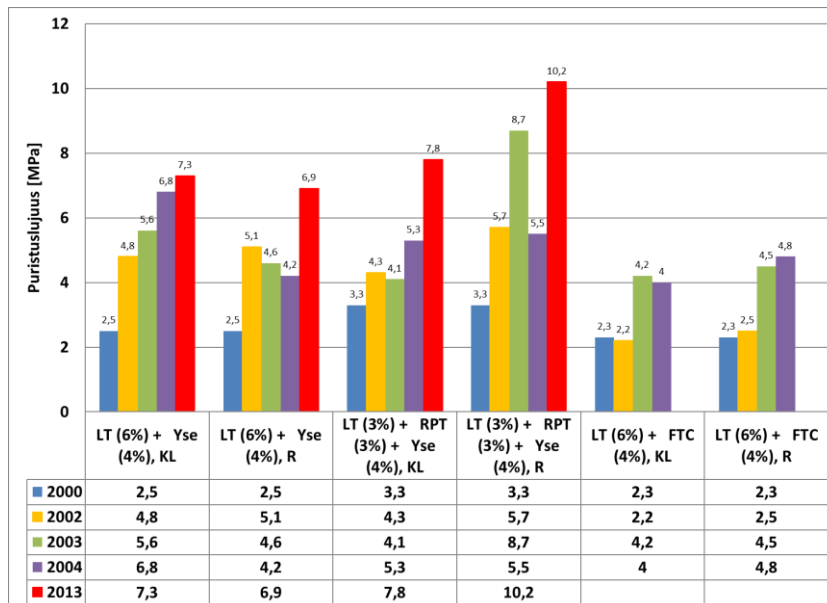
Vuonna 2002 toteutetut stabilointirakenteet on arvioitu seurannan loppuraportoinnin yhteydessä onnistuneiksi, sillä rakenteen kantavuus oli parantanut sekä tie oli kestänyt vuoden 2002 rakentamista seuranneen kevään ja talven kelirikkoajan. Kuvassa 42 on esitetty Mt 3201 kantavuusmittaustulosten yhteenveto aikaväliltä 2000-2013. Vuoden 2000 tulokset edustavat kantavuutta ennen rakenteen parantamista.



Kuva 42. Kukkia Cirlet, Mt 3201. Kantavuusmittausten yhteenveto (Tarkkio 2014).

LT+RPT+YSe-sideaineseoksen osuudella rakenteen kantavuus on laskenut voimakkaasti vuoden 2004 mittaustuloksista. Kantavuus ennen rakenteen parantamista on ollut tieosalla 3 keskimäärin 196 MPa ja tieosalla 4. Hyvä alustan kantavuus on edesauttanut stabiloidun kantavan kerroksen tiivistämistä, mikä on havaittavissa kuvan 43 puristuslujuustuloksissa.

Laboratorion suhteituskokeiden tuloksista havaittavat kohtalaisen suuret lujuuden alenemat JS-kokeiden jälkeen eivät ole tehdyn seurannan perusteella vaikuttaneet haitallisesti rakenteiden lujuuskehitykseen. Lähes kaikilla tutkituilla rakenteilla on havaittu lujuuden kasvua vuoden 2000 laboratorioskokeisiin nähden (kuva 43).



Kuva 43. Kukkia Circllet, Mt 3201. Stabiloidusta kantavasta kerroksesta otettujen näytteiden puristuslujuudet rakenteittain (Tarkkio 2014).

Kantavuusmittauksia (kuva 42) ja puristuslujuuskokeita (kuva 43) vertailtaessa voidaan kuitenkin havaita, että rakennenäytekappaleen alhaisempi puristuslujuus ei ole alentanut LT+FTC -rakenteen kantavuutta, sillä LT+FTC-rakenteiden kantavuus on samaa suuruusluokkaa kuin muilla rakenteilla.

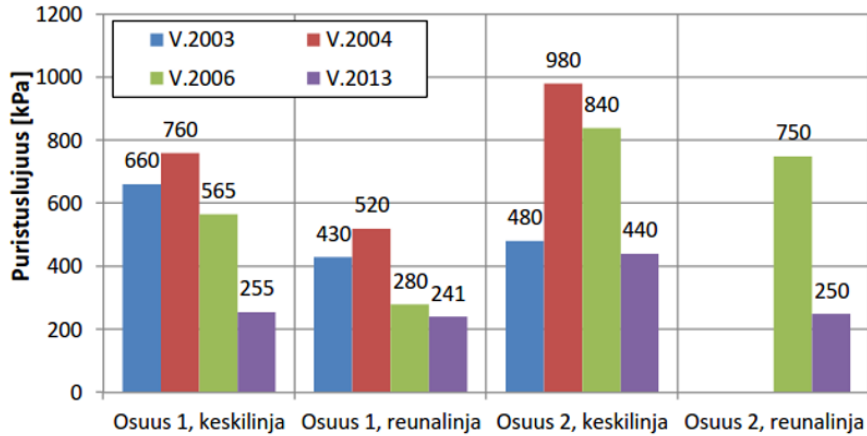
Seurantatutkimuksissa Mt 3201 rakenteen kunto oli yleisesti hyvä (Tarkkio 2014). Kohteessa esiintyi vain yksi pistemäinen kohta, jossa tie oli painunut ja levennyt. Stabiloitujen rakenteiden alueella yleisenä havaintona oli ohut kulutuskerros. Paikoitellen kulutuskerroksen paksuus oli niin ohut, että stabiloidun kantavan kerroksen pinta oli näkyvissä.

Pt 13981 kuitutuhkakerros oli hankkeen loppuraportin mukaan pienentänyt routasyvyyttä ja hidastanut roudan sulamista rakenteen pintaosasta. Kuitutuhkaosuus oli säilynyt hyvänä ensimmäisen vuoden seurannan aikana, vaikkakin siinä oli havaittu jonkin verran painumia. Painumien oli arvioitu olevan seurausta rakentamisesta käytetyn materiaaliseoksen epähomogeenisuudesta, mikä oli vaikuttanut ko. osuuksien puutteelliseen lujuuskehitykseen.

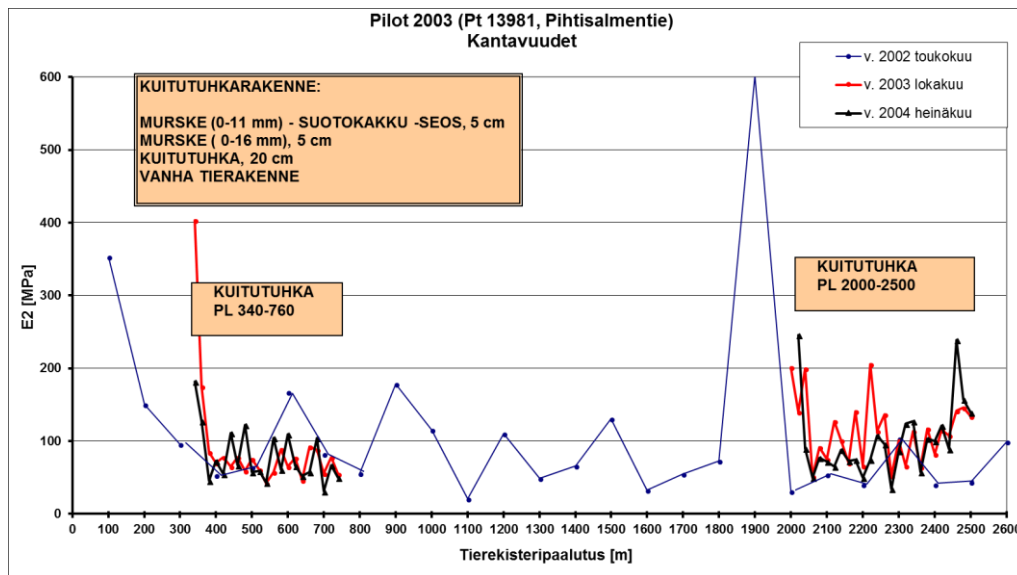
Kuitutuhkarakenteiden pitkäaikaiskestävyyttä on seurattu syksyllä 2013 (Hyvönen 2014). Tehdyssä seurannassa Pt 13981 kunnan havaittiin olevan yleisilmeeltään kohtalainen, eikä tien kunnossa ollut suuria eroavaisuuksia kuitutuhkarakenteiden ja vertailurakenteiden välillä. Molemmilla rakenteilla havaittiin liikenteen kulutuksesta, heikentyneestä kuivatuksesta sekä routivasta pohjamaasta aiheutuvia vaurioita. Kulutuskerroksen havaittiin kuitenkin olevan paikoitellen niin ohut, että kuitutuhkarakenteen pinta oli näkyvissä. Kevyen liikenteen väylien kuntokartoituksessa ei havaittu mitään poikkeavaa vaurioitumista.

Rakennetutkimuksissa oli ongelmana ehjän rakennenäytteen saaminen kuitutuhkakerroksesta. Näytteenotossa käytettiin sekä timanttiporaa että rakenteseen lyömällä upotettavaa näytteenottoputkea. Kuvassa 44 on esitetty Pt 13981 kuitutuhkarakenteesta otettujen rakennenäytteiden puristuskokeiden tulokset (Hyvönen 2014). Kuitutuhkakerroksen lujuus on laskenut molemmilla osuuksilla 10 vuoden aikana (2004/06 => 2013).

Kuvassa 45 on esitetty Pt 13981 kantavuusmittaustulokset ennen rakenteen parantamista ja rakenteen parantamisen jälkeen. Käytetyllä kuitutuhkaseoksella ei ole voitu oleellisesti vaikuttaa kantavuuteen. Hyvösen mukaan kuitutuhkaseoksessa tulisi olla yli 50 %:n lentotuhkaa, jotta siitä rakennettu kerros saavuttaa riittävät jäykkyys- ja kestävyysominaisuudet. Kukkia-Circler-hankkeen kuitutuhkakerroksissa lentotuhkaa oli alle 40 %.



Kuva 44. Kukkia Circler, Pt 13981. Kuitutuhkakerroksesta otettujen näytteiden puristuslujuuksien keskiarvot (Hyvönen 2014).



Kuva 45. Kukkia Circler. Pt 13981 kuitutuhkarakenteen kantavuusmittaustulokset (Ramboll 2005).

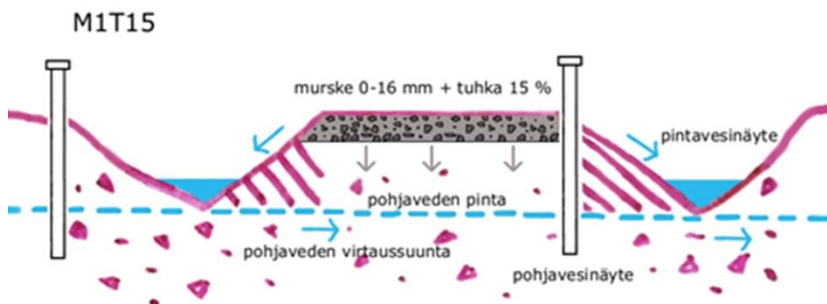
Kuitusavella rakennetut pohjavedensuojusrakenteet eivät täyttäneet seuranta tutkimustulosten perusteella niille asetettuja vedenläpäisevyysvaatimuksia. Tehdyssä seurannassa rakenteen vedenläpäisevyys määritettiin 1-rengasinfiltrimetrimittauksilla (in-situ). Syiksi liian suureksi jääneille vedenläpäisevyysarvoille arvioitiin olevan alhaiset tiiveysasteet. Myöskään kuitusaven päälle rakennettu ohut peittokerros ei tuottanut riittävää pystykuormitusta, jotta se olisi aikaansaanut kuitusaven jälkitiivistymisen.

Suotojätteen hyödyntämisestä kulutuskerroksen murskeessa saatiin hankkeen aikana lisää tietoa. Soratien kulutuskerroksessa käytetty suotojäte -rakenne oli vaurioitunut muun muassa höyläämisen seurauksena, jolloin kulutuskerrokseen oli syntynyt reikiä. Toisaalta kulutuskerroksen murskerakenteen oli arvioitu pehmenevän myös sen alla olevan stabiloidun kerroksen alhaisesta vedestä johtuen.

2.4.5 Tuhkatie-hanke (Karstula, 2011)

Tuhkan hyödyntämistä metsäautoteiden kantavuuden parantamisessa on tutkittu vuonna 2011 rakennetun Karstulan tuhkatie -hankkeen testiosuuksilla. Koe-kohteessa rakennettiin yhteensä 18 erilaista koerakennetta, joissa vaihtelevat sekä murskeen raekoko että tuhkamäärä. Tuhkan seostaminen murskemateriaalin kanssa muuttaa murskeen ominaisuuksia siten, että murske tiivistyy metsätien pintaan lujaksi pinnoitteeksi. Tuhka sitoo murskeen tehokkaasti, jolloin irtomurske ei kasaannu palteeksi tai kulkeudu ojiin. Päällysten sivukaltevuudet säilyvät myös oikeanlaisina (Joensuu & Vanhanen 2013).

Tuhka-murskeseoksella käytetään samoja kerrospaksuuksia kuin murskerakenteella. Kerrospaksuuteen vaikuttavat murskepäällysrakenteen tavoin pohjaan kantavuusluokka, tien käyttötarkoitus ja liikenteen määrä. Myös tuhkapitoisuutta tulee vaihdella käyttökohteen ja murskeen raekoon mukaan.



Kuva 46. Tuhkatie Karstula. Poikkileikkaus tuhkamursketieltä (Kajander 2014).

Seurantatutkimukset

Tuhkateiden kantavuusmittaukset on suoritettu 2012–2014. Vuosittaisista kahdesta mittauksesta toinen on pyritty tekemään roudan sulamisen aikaan. Taulukossa 34 on esitetty vuonna 2013 syksyllä tehtyjen kantavuusmittauksien keskiarvot eri koerakenteille.

Kantavuusmittausanalyysien perusteella tuhkan käyttö tierakenteessa on kantavuuden kannalta hyödyllistä. Tulosten perusteella kantavuus on paras tuhkatieillä, joissa on käytetty tuhkaa 15 painoprosenttia sekoitettuna 0/16 mm rakeisuuden murskeeseen. Kaikilla tuhkatieillä kantavuudet olivat tuhkan määrästä riippumatta parempia kuin vastaavalla referenssi soratiellä. (Kajander 2014)

Taulukko 30. Tuhkatie Karstula. Vuoden 9/2013 kantavuusmittauksien keskiarvot. (Kajander 2014)

Murskeen rakeisuus	Tuhkan paino-%			
	50 p-%	30 p-%	15 p-%	0 p-%
0/63 + 0/32 *	98	-	-	91
0/32	-	52	66	45
0/16	-	84	127	66

*tuhka on sekoitettu 0/32 murskeen sekaan

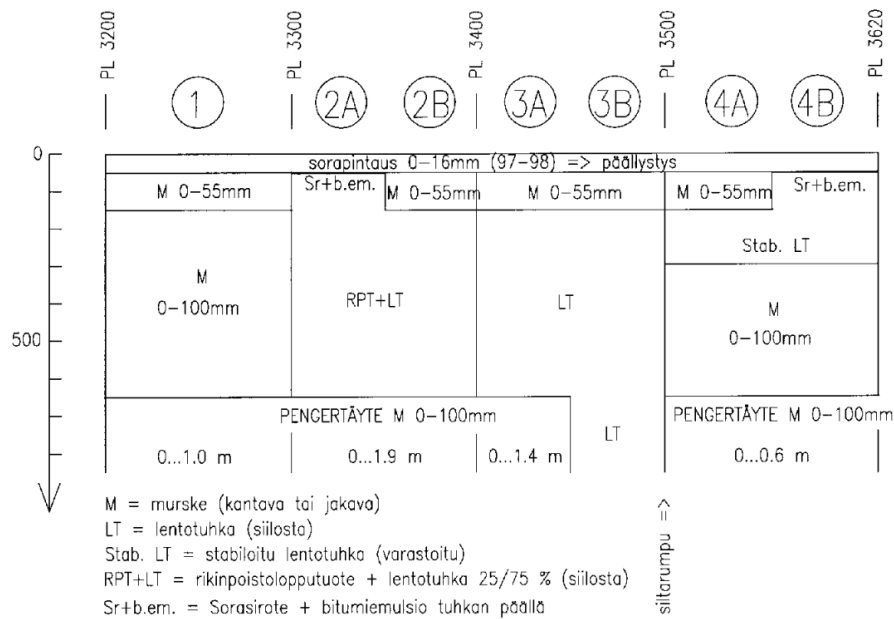
2.4.6 Yt 11636 Knuters-Östersundom (Sipoo, 1997)

Kohde sijoittuu tierekisterin paaluvälille 11636 1/1475 -1855 (suunnitelman pl. 3200 on tierekisteriosoite 11636 1/1475). Aiemmin yksityistienä toimineen tien rakenteen parantamisen yhteydessä tie muutettiin sorapintaiseksi paikalliseksi ja sen alkuperäistä linjausta muutettiin. Koerakenneosuus oli sorapintainen vuoteen 2012 saakka, jolloin se päällystettiin AB 16/120 -päällysteellä. Päällystämisen yhteydessä mahdollisesti tehdyistä muista rakennustöistä ei ollut saatavilla tietoa tämän selvityksen laadinnassa. Taulukossa 35 on esitetty Yt 11636 tiestö- ja rakennetietoja.

Taulukko 31. Yt 11636. Tiestö- ja rakennetietoja.

Päällysteleveys (m)	6,5
KVL/ KVLRAS (ajon./vrk)	336 (9)
Nopeusrajoitus (km/h)	60
Talvihoitoluokka	II

Kohteeseen rakennettiin kuusi erilaista tuhkarakennetta kolmella erilaisella tuhcaseoksella sekä yksi vertailurakenne murskeesta. Rakentamisessa käytetty tuhka oli peräisin Helsingin Energian Hanasaaren voimalaitokselta kivihiilen poltosta. Kuvassa 47 on esitetty toteutettujen rakenteiden sijainnit. Pohjasuhteet vaihtelevat kalliroleikkauksesta, yli 5 metriä syvään savikkoon. Ennen rakentamista tuhkille tehtiin laboratoriotutkimuksia, joiden tulokset on esitetty taulukossa 36. Tuhkille määritetyt puristuslujuudet ovat huomattavasti alhaisempia kuin 2000-luvulla rakennetuissa tuhkarakennuskohteissa. (Hautalahti et al. 2003)



Kuva 47. Yt 11636. Tuhkarakenteiden periaatekuva (Hautalahti et al. 2003).

Taulukko 32. Yt 11636. Tuhkien ennakkokokeiden tuloksia (Haatainen et al. 2003).

Materiaali	Maksimi kuivairto- tiheys (kg/m ³)	Optimivesi- pitoisuus (%)	Puristuslujuus (MPa)
LT	1170	27	0,44
LT+RPT 75/25	1240 - 1310	24 - 26	1,8
Stab. LT	1080	33	1,1

Rakentaminen

Rakentaminen aloitettiin toukokuussa 1997, jolloin tielinjalta leikattiin humuspi-toinen pintamaa sekä rakennettiin pengertäytöt. Tuhkarakenteet toteutettiin syksyllä 15.9.-14.10.1997 välisenä aikana sen jälkeen, kun voimalaitos oli kesä-seisokin jälkeen käynnistetty. Rakenteissa käytetyt lentotuhka ja rikinpoisto-tuote (RPT) toimitettiin Hanasaaresta suoraan siilosta ja siihen lisättiin siilosta purkamisen yhteydessä vettä suoraan purkuruuviin. Stabiloitu lentotuhkara-kenne (lentotuhka + sementti) sekoitettiin Vuosaaressa jatkuvatoimisella ase-masekoittimella (Aran). Tuhka levitettiin tela-alustaisella puskukoneella ja tiivistettiin täryjyrällä (8t) ja kumipyöräjyrällä. Tuhkarakenteiden tiivistystyötavat sekä tiivistystyön laadunvalvontatulokset on esitetty taulukossa 37. (Haatainen et al. 2003).

Taulukko 33. Yt 11636. Tuhkarakenteiden tiivistystapa ja laadunvalvonnan mitaustulokset. Rakennetyypit (esim. 2A) on esitetty kuvassa 47. (Haatainen et al. 2003).

Rakenne	Kerralla tiivistetty kerrospaksuus	Tiivistystyötap	Vesipitoisuus (%) ¹⁾	Kuivairtitiheys ²⁾ ρ_d (kg/m ³)	Tiiveysaste ²⁾ D (%)
3 B	250 mm	Täryjyvä (ylityskertojen lukumäärä ei tiedossa)	16,2-30,9 (tav. 27 %)	1075	91,9
3 A	250 mm	3 ylityskertaa täryn kanssa (8tn)		985	84,2
4 A	500 mm	6 ylitystä täryjyrällä 6 ylitystä kumipyöräjäyrällä	36,2-44,4 (tav. 33 %)	940	87
4 B	500 mm	6 ylitystä täryjyrällä 6 ylitystä kumipyöräjäyrällä		920	85,2
2 B	250 mm	4 ylitystä täryjyrällä 6 ylitystä kumipyöräjäyrällä	23,6-25,3 (tav. 24 - 26 %)	1120	85,5
2 A	600 mm	4 ylitystä täryjyrällä 6 ylitystä kumipyöräjäyrällä		1125	90,7

1) Mitattu rakentamisen aikana työmaalle saapuneista kuormista

2) Mitattu koekuoppänäytteistä

Tuloksista havaitaan, että työmaalle saapuneiden tuhkien vesipitoisuus on vaihdellut varsin paljon. Stabiloidun lentotuhkan (rakenteet 4 A ja B) vesipitoisuus on ollut tavoiteltua suurempi kaikissa mittauksissa, mikä on poikkeuksellista, sillä asemasekoitinlaitteistolla tehtävä veden sekä kuivamassojen annostelu on yleensä tarkkaa ja sekoitettu massa tasalaatuista.

Seurantatutkimukset

Toteutettuja tuhkarakenteita seurattiin rakentamisen jälkeisinä vuosina ja tulokset on raportoitu vuonna 2003 (taulukko 38). Mittaustulosten ja havaintojen perusteella tuhkarakenteiden toimivuuteen on arvioitu vaikuttavan ratkaisevasti rakenteissa olevan veden määrä. Keväällä tuhkarakenteisiin suotautunut ja sulanut vesi ei ole päässyt poistumaan rakenteista, sillä keväällä roudan sulamisen aikaan rakenteet sulavat ensin tien keskiosalta ja myöhemmin tien reunaosilta. Tämä aiheutti keväällä 2001 pinnan pehmenemistä rakenteilla (2A ja 4B), joissa tuhkerakenteiden päällä oli ainoastaan bitumiliuos ja sorapinta. Näille osuuksille jouduttiin ajamaan lisää mursketta. Näiden "riskirakenne" koemusten perusteella tuhkarakenteiden päälle on sittemmin suositeltukin rakennettavaksi vähintään 150 mm:n paksu murskekerros.

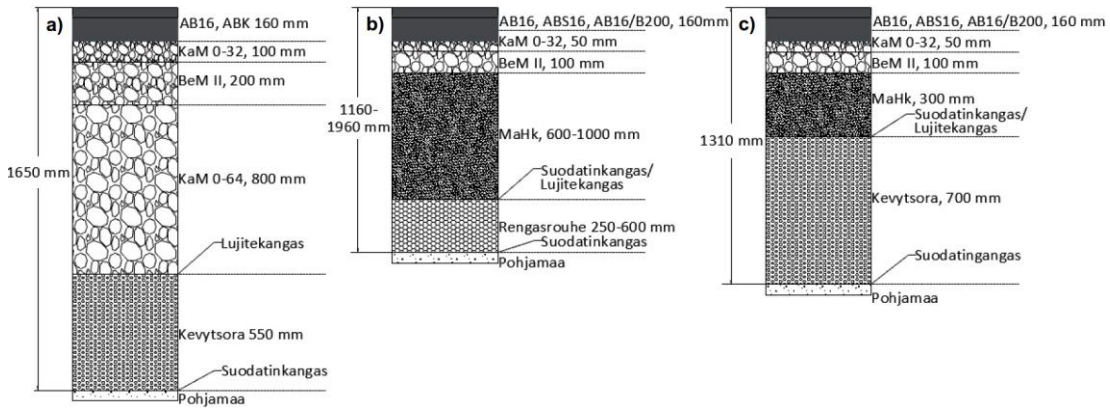
Taulukko 34. Yt 11636. Tuhkarakenteiden teknisten ominaisuuksien seuranta-tutkimukset ja tutkimuksista kirjatut havainnot. Rakennetyypit (esim. 2A) on esitetty kuvassa 47. (Haatainen et al. 2003).

Seurantatutkimus	Seuranta-aika	Havainnot
Painumaletkut	11 mittausta (elokuuhun 2002 asti)	Pohjamaa painunut keskimäärin 30-50 mm. Painuma vähäisintä vertailurakenteessa sekä rakenteessa 2A.
Kosteusanturit	1997-2002	Tuhkarakenteiden vesipitoisuus vaihdellut 18-67 %:n välillä, ollen keskimäärin noin 40 %. Tuhkarakenteiden optimivesipitoisuus välillä noin 20-30 %.
Pölyleijumamittaukset	15.9 ja 18.9.1997	Pölyn ohjearvo voi ylittyä alle 40 metrin etäisyydellä tuhkatyöstä
Levykuormituskokeet	mitattu 1997 ja 1998	Rak. 2 A kantavuus pysynyt rakentamisen jälkeen suhteellisen vakiona ja ylittänyt asetetun 150 MPa tavoitteen. Rak. 2 B kevätkantavuus vaihdellut 164-254 MPa välillä. Rak. 3 A ja B kevätkantavuus jäänyt suhteellisen alhaiseksi vaihdellen 105-142 MPa välillä. Rak. 4 A ja B saavutettu riittävän suuri kantavuus, mikä on myös pysynyt suhteellisen tasaisena mittausten välissä
Pudotuspainokokeet	2 kertaa vuodessa (vuoteen 2003 asti)	
Koekuopat	1998, 1999 ja 2001	Rak.-2 B rakenne pysynyt hyvin koossa, mutta havaittu pientä pintapehmenemistä ja lujuus heikentynyt 100 mm syvyydelle. Rak 2 A lujuus heikentynyt yläpinnasta 50 mm syvyydelle. Rak. 3 A murske ja tuhka sekoittunut 150 mm syvyydelle vuonna 2001. 200 mm syvyydellä tuhka kiinteää. Rak. 3 B tuhkeroksen havaittu olevan tasalaatuista, mutta ei erityisen lujaa. Lujuus pienenee alaspäin.
Laboratorio-kokeet	Koekuoppänäytteistä	Koekuoppänäytteistä havaittu tuhkarakenteissa kasvaneita vesipitoisuuksia. Rak. 2 A puristuslujuus alhaisempi kuin ennakkokokeissa, mutta ei alentunut merkittävästi seurantatutkimuksissa. Rak. 2 B lujittunut ensimmäisen vuoden aikana hyvin, mutta lujuus alentunut seurantatutkimuksissa. Rak. 3 A ja B lujuudet jääneet suunniteltua alhaisemmiksi ja alentuneet seurantatutkimuksissa. Rak. 4 A ja B lujittuneet ensimmäisen vuoden aikana hyvin, mutta lujuus alentunut sen jälkeen.
Liikennelaskenta	9/1997-10/1998	KVL _{min-max} 192-361, KVL _{min-max} 6-69
Muut tutkimukset	Säähavainnot 1997-2002, routanousumittaukset 1997-2002, lämpötila-anturit 1997-2002, pohjavesiputket 1997-2002, lysimetrinäytteet 1997-2003	

2.5 Kevennetyt penkereet

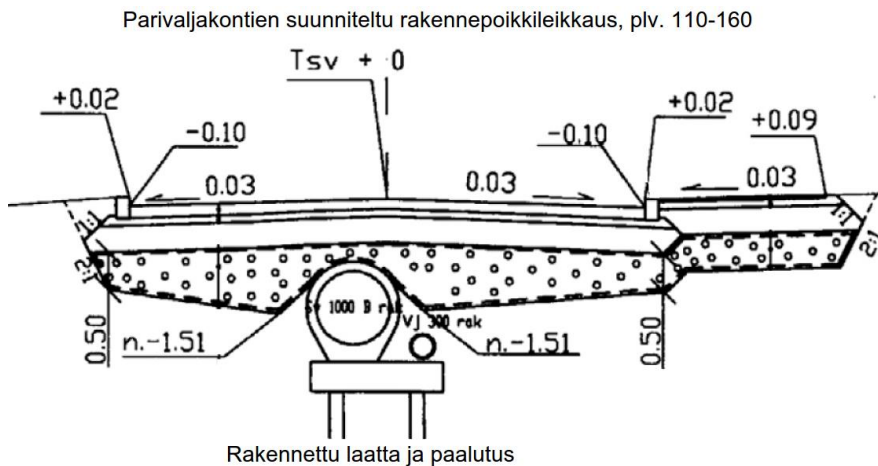
2.5.1 Parivaljakontie (Helsinki, 2001)

Kohteessa tutkittiin rengasrouheen, masuunihiekan ja betonimurskeen hyödyntämistä pehmeikölle rakennetun, painuneen kadun parantamisessa. Tavoitteena oli tarkastella masuunihiekka- ja betonimurskekerroksista koostuvan päällysrakenteen rakentamista sekä rakenteen kantavuuden kehittymistä rengasrouheesta tai kevytsorasta rakennetun kevennysrakenteen päällä. Rakentamisessa selvitettiin lisäksi lujitekankaan vaikutusta kyseisten rakenteiden kantavuuteen. Kuvassa 48 on esitetty rakenteiden periaatekuvat.



Kuva 48. Parivaljakontie. Päällysrakenteiden periaatekuvat. a) paaluväli 20-45 (KS), b) 45-60 (BeM+MaHk+suodatinkangas+RR), 60-100 (BeM+MaHk+lujitekangas+RR) ja c) 100-130 (BeM+MaHk+suodatinkangas+KS), 130-163 (BeM+MaHk+lujitekangas+KS). RR:n teoreettinen palakoko 100 x 300 (Haatainen & Forsman 2001, muokattu).

Lähtötilanteessa maanvaraisesti perustettu katurakenne oli pahoin painunut lukuun ottamatta kadun keskiosaa, jossa sijaitsti paalulaatalle perustettu putkilinja (kuva 49). Painuneita reunaosia oli korotettu 1980-luvulla, jonka jälkeen reunaosat olivat painuneet merkittävästi lisää, haitaten liikennettä. Savikerroksen ($w = 40-142\%$) paksuus on 0-5 m paaluvälillä 0-50, jonka jälkeen sen syvyys kasvaa merkittävästi ollen jopa yli 10 metriä rakennuskohteen loppuosalla paaluvälillä 50-160. Savikerroksen alla on siltti-/hiekkamoreenikerros. (Haatainen & Forsman 2001)



Kuva 49. Parivaljakontien suunniteltu rakennepoikkileikkaus paaluvälillä 110-160. Keskellä paalulaatalle perustetut vesijohto- ja sadevesiviemäri (Haatainen & Forsman 2002, muokattu).

Rakentaminen

Rakentaminen toteutettiin elo-syyskuussa 2001. Olemassa olevat päällysrakenteet leikattiin suunnitelman mukaisiin tasoihin ennen uusien rakennekerrosten rakentamista. Kevennyskerrokset rakennettiin tela-alustaisella kaivinkoneella. Rakentamisen yhteydessä rengasrouhekerroksen havaittiin tiivistyvän huo-

nosti, koska materiaali oli kappalekooltaan osin suunniteltua suurempaa. Ren-
gasrouheen 100 mm x 300 mm seassa oli jopa puolikkaita renkaita, minkä arvi-
oitiin aiheutuneen siitä, että renkaiden leikkaus oli tehty liian tylsillä leikkurin te-
rillä.

Masuunihiekkakerros levitettiin ja tiivistettiin yhdessä kerroksessa. Lujitekän-
gasosuuksilla masuunihiekkakerroksen rakentaminen oli helpompaa lujitekän-
kaan tukieissa rakennuspohjaa suodatinkangasta paremmin. Masuunihiekka ja
betonimurskekerrokset levitettiin tiehöylällä ja tiivistettiin 7,4 t täryjyrällä. Be-
tonimurske oli paikoin lajittunutta ja siitä puuttui hienoainesta. Liitteen 5 ku-
vassa 103 on esitetty kohteen rakentamisen työvaiheita ja kohteella käytettyjä
uusiomateriaaleja.

Kohteen asfalttipäällysteeseen lisättiin suunnitelmista poiketen ylimääräinen
ABS16 -kerros, koska poikkeavan kappalekoon omaavan rengasrouherakenteen
teknisestä toimivuudesta ei oltu täysin varmoja. Lisäksi kantavan kerroksen ala-
osan päältä mitatut kantavuudet olivat alhaisia.

Seurantatutkimukset

Pohjamaan painumaa ja rengasrouhekerroksen kokoonpuristumaa seurattiin
rakenteisiin asennettujen painumalevyjen avulla. Painumalevyjä asennettiin
rengasrouhe- ja kevytsoraosuuksille. Taulukkoon 39 on koottu Parivaljakontien
painumamittaustulokset noin puoli vuotta rakentamisen jälkeen. Esitettyjä mit-
taustuloksia edeltävien sekä seuraavien vuosien painumamittaustulokset ke-
vennyksen ja pohjamaan pinnan osalta ovat säilyneet muuttumattomina, mikä
kuva pohjamaan painuman sekä kevennysrakenteiden kokoonpuristuman lop-
pumista. (Haatainen & Forsman 2002)

Taulukko 35. Parivaljakontien painumamittaukset (Haatainen & Forsman 2002,
muokattu).

Paalu- lukema	Kevennysma- teriaali / ker- rospaksuus	Päällys- raken- teen paino (kN/m ²)	Rakennekerrok- sen suhteellinen kokoonpuristuma 1.11.2001 (%)	Pohjamaan painuma 14.4.2002 (mm)	Pohjamaan ja ke- vennysrakenteen painuma + kokoon- puristuma 14.4.2002 (mm)
65	RR / 725 - 750 ¹⁾	19,7	44 - 45	20	340
80	RR / 800 - 850 ¹⁾	15,2	39 - 42	38	360
95	RR / 700 - 750 ¹⁾	17,5	39 - 42	40	330
125	KS / 200 - 250 ²⁾	16,1 ³⁾	≈5-10 ⁴⁾	-	75
140	KS / 150 - 200 ²⁾	15,9 ³⁾	≈5-10 ⁴⁾	-	72

1) Mitattu kerrospaksuus ennen yläpuolisten kerrosten rakentamista

2) Kerrospaksuus määritetty vaatusten ja koekuoppien perusteella 2,5 m keskilinjasta

3) Laskettu 27.1.2018 Harju

4) Mikäli pohjamaan painuma on noin 50-60 mm, on kevytsorakerroksen kokoonpuristuma n. 5-10
%

Päällysteen päältä pudotuspainolaitteella mitattujen kantavuuksien (taulukko
40) parantuminen mittausten välillä on selkeä osoitus masuunihiekan ja beto-
nimurskeen lujittumisesta rakenteessa. Tämä oli havaittavissa myös kanta-
vuusmittaustulosten takaisinlaskennan perusteella määritetyissä materiaalien
E-moduulien arvoissa, jotka on esitetty yksityiskohtaisemmin raportissa Haatai-
nen & Forsman 2002. Lujitekankaan arvioitiin vaikuttavan jossakin määrin beto-
nimurskeen E-moduulin arvoon. Rakentamisvaiheessa lujitekankaan havaittiin

helpottavan yläpuolisen masuunihiekkakerroksen tiivistämistä, mikä on voinut osaltaan vaikuttaa masuunihiekkarakenteen lujittumiseen ja parantaa näin ollen lujitekankaan sisältämän rakenteen päällysteen päältä mitattua kantavuutta verrattuna suodatinkankaan sisältämään rakenteeseen nähden.

Taulukko 36. Parivaljakontie. Pudotuspainolaitemittauksien lämpötilakorjauksista (+20°C) arvoista määritetyt kantavuudet. Mittaukset on tehty rakentamisen jälkeen ja rakentamista seuraavana keväänä (Haatainen & Forsman 2002).

		BeM 200 mm	MaHk 600 mm **)	MaHk 600 mm **)	MaHk 300 mm **)	MaHk 300 mm **)
(MPa)		Kevyt-sora + lujitekangas	Rengasrouhe + suodatinkangas	Rengasrouhe + lujitekangas	Kevyt-sora + suodatinkangas	Kevytsora + lujitekangas
2.11.2001	vaihteluväli	403-578	297-400	305-411	288-516	237-460
	keskiarvo	466	356	359	356	391
28.5.2002	vaihteluväli	531-724	658...692	647-804	461-586	389-618
	keskiarvo	614	675	725	502	541
rakenteen paksuus *)		410-1460 mm	1060-1460	910-1310	830-1110	730-960
keskimäärin *)		1060 mm	1230 mm	1070 mm	920 mm	870 mm

*) kevytsora/rengasrouherakenteen yläpuolisten päällysrakennekerrosten yhteispaksuus

**) + BeM 100 mm

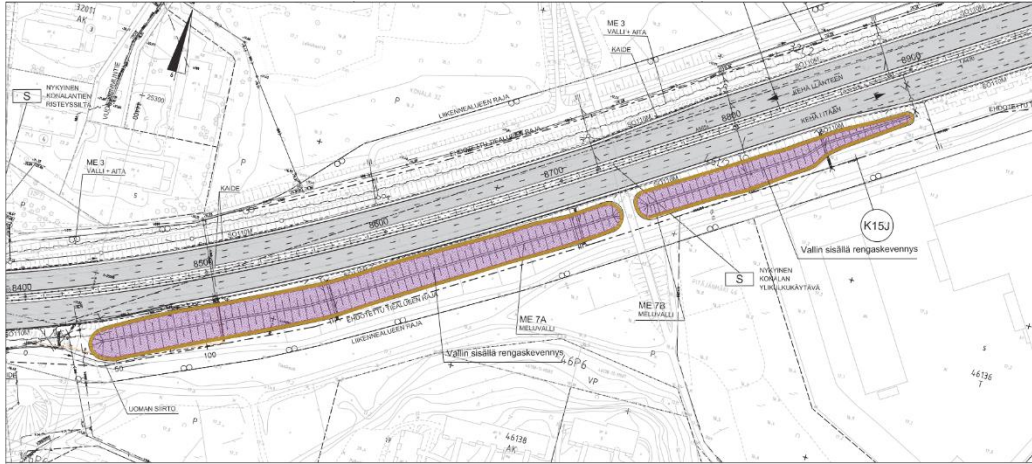
Google Street View -sovelluksen kuvista on havaittavissa pituus- ja poikkisuuntaisia päällystehalkeamia kadun keskellä kulkevan vesihuoltorakenteen sekä siihen liittyvien hulevesikaivojen ja niiden putkien kohdalla vuonna 2011. Kyseiset vauriot ovat havaittavissa myös vuonna 2018 (liite 1 kuva 77). Kuvista havaittavat vauriot aiheutuvat painumattoman putkilinjan ja painuvan katurakenteen painumaerosta. Painumaton vesihuoltolinja on "jäynyt kantamaan", aiheuttaen asfalttipäällysteeseen vetojännityksiä ja halkeamia. Vähiten päällystevaurioita esiintyy kuvien perusteella lujitekankaalla vahvistetun kevytsorakevennysrakenteen (kuva 48 rakenne a) osuudella paalulukemalla 30. Vähäisemmät vauriot selittynevät paaluvälin 0-50 muita osuuksia ohuemmasta savikerroksesta.

2.5.2 Kehä I, Meluvalli (Helsinki, 2016-2017)

Meluvalli oli osana Liikenneviraston ja Helsingin kaupungin 2013-2017 toteuttamaa yhteishanketta. Meluvallissa hyödynnettiin kierrätysrenkaita ja EPS -blokkeja keventeenä. Rengaskevennys oli esitetty rakennussuunnitelmassa. Kierrätettyjen EPS-blokkien käyttö kevennyksenä päätettiin tilaajan toimesta toteutusvaiheessa.

Meluvallin alueella maaperä koostuu noin 4...9 m paksusta savikerroksesta, jonka redusoimaton leikkauslujuus vaihtelee välillä 3-20 kPa ja vesipitoisuus välillä 50-130 %. Vallin eteläpuolella sijaitsee kaasuputki, joten liukupintasortumaa vastaan riittävän varmuuden saavuttamiseksi ja kustannusten optimoinniksi vallin kohdalle tehtiin pilaristabiloinnin ja kevennyksen yhdistelmä rakenne. Rengasrakenteeseen rakennettiin palokatkot 100 metrin välein.

Kierrätysrenkaiden hyödyntämiseksi haettiin ympäristölupa, jonka käsittely kesti puoli vuotta. EPS - blokkien hyödyntämistä varten ympäristölupaa ei haettu erikseen, vaan niiden käyttäminen rakenteessa mainittiin kierrätysrenkaita koskevassa ympäristölupahakemuksessa. Ympäristöluvan mukaisesti meluvallissa rengastäytön tilavuus oli n. 9 000 m³.



Kuva 50. Kehä I välillä Vihditi-Espoon raja. Meluvallin asemapiirustus.

Rakentaminen

Vallin länsiosassa käytettiin kierrätettyjä EPS-blokkeja (1 000 m³rtr). Ne ovat Salon Muurlassa sijainneesta koerakenteesta, joka toimi väliaikaisena yhdystienä 2003-2008 maantie 110:ltä moottoritie E18:lle. Koerakenne purettiin vuonna 2016, jolloin EPS-blokit olivat olleet rakenteessa lähes 15 vuotta.

Rakentamisjärjestyksenä oli suodatinkankaan levitys pilaristabiloidulle pohjamaalle, renkaiden tai EPS-blokkien ladonta suunnitelman mukaisesti, blokkien ja renkaiden peittäminen suodatinkankaalla ja maakerroksella. Lopullinen pinta tasattiin tavoitekorkeuteen myöhemmässä vaiheessa. EPS-blokit asennettiin kuuteen kerrokseen meluvallissa.

Kokonaisten renkaiden lisäksi rengastäyttöön asennettiin autonrenkaista tehtyjä räjäytysmattoja (suunnitelman vastaisesti), mikä aiheutti sen, että täytön tilavuuspaino muodostui suunniteltua suuremmaksi. Rakentamisen aikana esiintyi haasteita rengasrakenteen painuman arvioinnissa, mikä johti siihen, että rengaskerroksen yläpinta painui suunniteltua alemmaksi ennakkokorotuksesta huolimatta. Ensimmäisen maatäytön jälkeen meluvallia korotettiin EPS -blokkeilla.



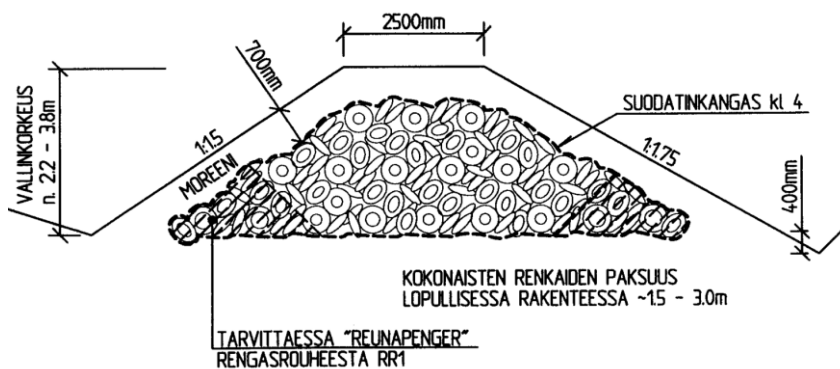
Kuva 51. EPS kevennetyn meluesteen rakentaminen. Katkoviivalla on esitetty suunnitelmien mukainen ytimen raja. Vihreällä yhtenäisellä viivalla on esitetty meluesteen lopullinen muoto. Maatiivisteiden paksuus ytimen ympärillä on 1,0 m. (Napari 2017)

Seurantatutkimukset

Ympäristöluvan vaatimusten mukaisesti vallin alaosaan asennettiin lysimetrit läpi suotautuvan veden laadun seuraamiseksi.

2.5.3 Vt 7 Porvoo–Koskenkylä (Porvoo, 2000)

Porvoonjokilaakson pehmeikköalueelle sijoittuvassa meluvallissa käytettiin kierrätysrenkaita (kuva 52).



Kuva 52. Vt 7 Porvoo–Koskenkylä. Kierrätysrenkaiden hyödyntämisperiaate meluvallirakenteessa (Palo 2000).

Rakentaminen

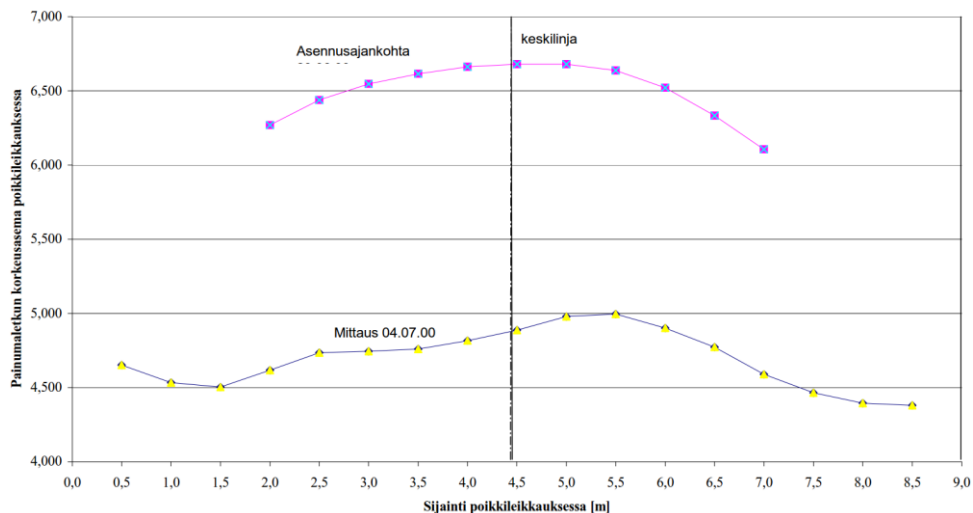
Rakentamisen aikana kierrätysrenkaat pysyivät suunnitellussa luiskakaltevuudessaan ja penkereen muotoilu toteutettiin kahden työkoneen avulla. Rakentamisessa esiintyneitä haasteita olivat renkaiden pitkistä kuljetusetaisyydestä aiheutunut työtehon hidastuminen sekä suodatinkankaan asennustapa joustavan pengermateriaalin päälle. Suodatinkankaan asentamisessa havaittiin soveltuvaksi asennustavaksi suodatinkankaan ankkurointi 10 metrin matkalla verhoustahtyon etupuolelle. Lisäksi ennen verhoustoreenikerroksen rakentamista vallin harjalle lisättiin moreenikerros suodatinkankaan päälle painoksi. Kuvassa 53 on esitetty rakentamisen eri vaiheita.



Kuva 53. Vt 7 Porvoo-Koskenkylä. Kierrätettyjä kokonaisia renkaita sisältävän meluvallin rakentamisen eri vaiheita (Palo 2000).

Seurantatutkimukset

Rakentamisen yhteydessä kaikkiin kierrätysrengasmeluvalleihin asennettiin painumalevyt 50 metrin välein. Yhteen meluvallirakenteeseen asennettiin lisäksi painumaletkut. Painumaletkut asennettiin vallin pohjalle ja yläpintaan, kierrätysrengasrakenteen kokoonpuristuman sekä pohjamaan painuman määrittämiseksi. Vallin yläpintaan sijoitetun painumaletkun mittauksista voidaan havaita rengaskerroksen painuneen jopa 2 metriä (kuva 54). Vallin pohjan painumien ollessa 20–30 mm, on rengaskerroksen keskimääräinen kokoonpuristuma noin 30 %. (Palo 2000)



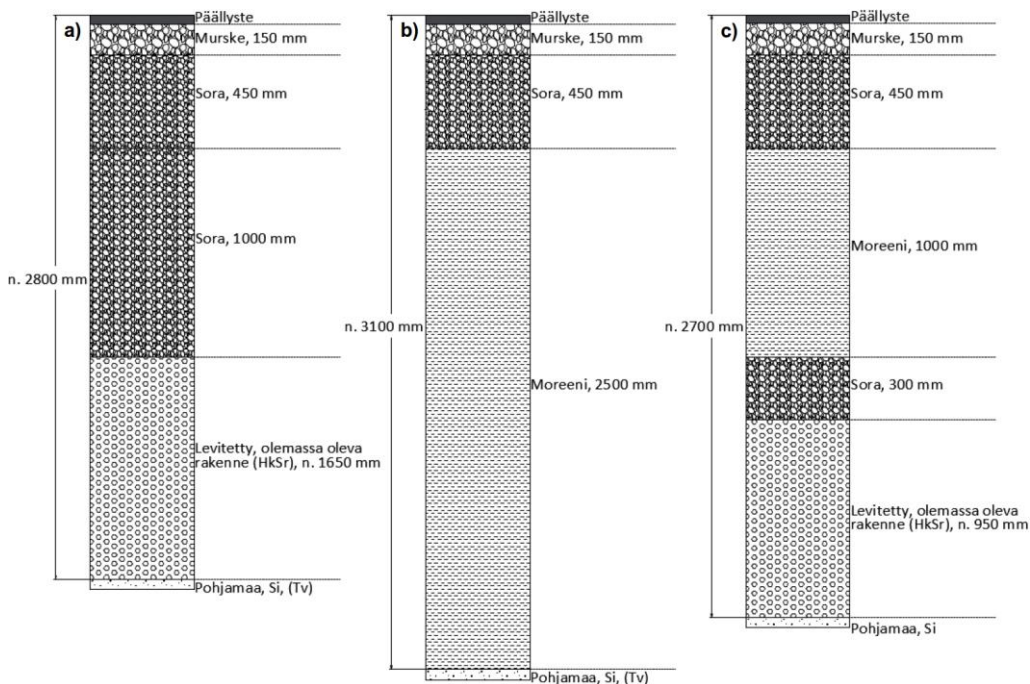
Kuva 54. Vt 7 Porvoo-Koskenkylä. Rengaskerroksen yläpinnan taso renkaiden asentamisen ja yläpuolisen maakerroksen asentamisen jälkeen painumaletkulla mitattuna (Palo 2000).

2.6 Maapenkereet

2.6.1 Liikennekuormitetut maapenkereet

2.6.1.1 Vt 21 moreenipenger (Peera, 1986)

Kilpisjärven Peeraan Vt 21:lle vuonna 1986 rakennetussa kohteessa tavoitteena oli selvittää paikallisesti sekä tielinjalta saatavilla olevien moreenin ja turpeen käyttöä tien routasuojusrakenteessa. Vt 21 rakenteessa käytettiin sora- ja moreenimaalaitikkoja kuvassa 55 esitettyjen periaatteiden mukaisesti.



Kuva 55. Vt 21 Peera. Rakenteiden periaatekuvat (Korkiala-Tanttu et al. 2008, Saarelainen 2002, muokattu).

Olemassa olevan tierakenteen oli havaittu painuneen vuosina 1962-1987 yhteensä noin 1,8 metriä, mikä ilmeni leikkaustöiden yhteydessä havaittuna 1,8 metriä paksuna öljysorapäällystekerroksena. Tien sulamispainumaa oli siis taattu lisäämällä päällystemassaa.

Tavoitteena oli toteuttaa kohteen olosuhteisiin rakenteet, jotka toimisivat ilman merkittävää kunnossapitotarvetta. Suunnitteluratkaisut pyrittiin valitsemaan sellaisiksi, että ne olisi mahdollista soveltaa myös muualla. Rakenteiden mitoituksessa hyödynnettiin olemassa olevasta rakenteesta mitattua roudan syvyyttä ja routanousua. Rakenteiden suunnittelussa haettiin lievästi routivan materiaalin käytön lisäksi ratkaisuja myös kohteessa havaittuihin ongelmiin, joita olivat olemassa olevan tierakenteen routanousuvauriot, ikiroudan sulamisesta aiheutuvat painumavauriot, paantaminen sekä kinostuminen avoimessa maastossa (Saarelainen 2002).

Keskeisin tekniseen soveltuvuuteen vaikuttava eroavaisuus tutkituissa moreenirakenteissa (kuva 55 b ja c) on rakenteen c erottaminen pohjamaasta/ alusrakenteesta 300 mm paksulla sorakerroksella. Rakenteen b osuuden moreenipenger on sen sijaan rakennettu suoraan routivan pohjamaan varaan (Saarelainen 1993). Ennen rakenteen parantamista mitatut routanousut olivat a-osuudella noin 100-150 mm, b-osuudella 100-140 mm ja c-osuudella 200-260 mm.

Rakentaminen

Rakenteen parantaminen toteutettiin vaiheittain siten, että maapohjan leikkaus toteutettiin syksyllä 1986 ja pinta jätettiin routaantumaan talveksi 1986-1987. Tien rakennekerrokset toteutettiin keväällä 1987 ja tie päällystettiin syksyllä/kesällä 1987. Rakentamisjärjestyksellä pyrittiin vaikuttamaan siihen, että rakentamistöillä ei kiihdytettäisi ikiroudan sulamista.

Seurantatutkimukset

Seurantatutkimuksissa havaittiin, että 1987 tehty päällyste oli ollut epätasainen koko 1990 luvun ajan. Syyskuu arvioitiin talvityönä tiivistettyjen päällysrakennekerrosten epähomogeenisuus. Routan syvyys- ja routanousumittauksissa havaittiin, että rakenteet routivat mitoitusvaiheessa ennakoidulla tavalla, routanousujen ollessa moreenirakenteilla 40-80 mm (Korkiala-Tanttu et al. 2008).

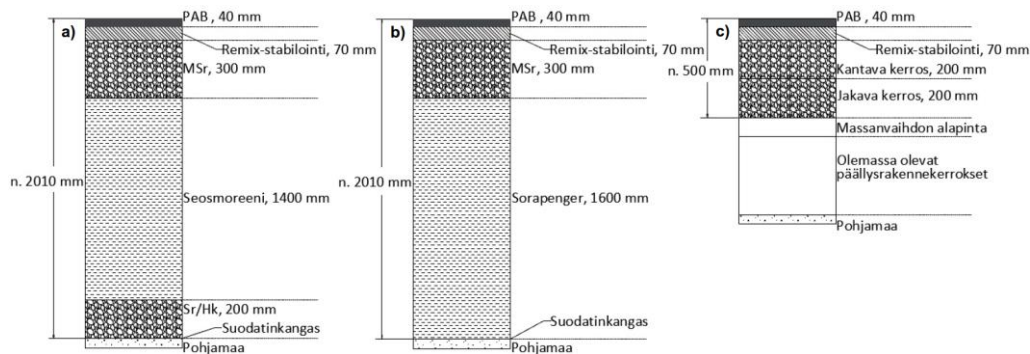
Ensimmäinen uudelleenpäällystys tehtiin vuonna 2000. Uudelleenpäällystämisen jälkeen syyskuussa 2001 tehdyn kohdekäynnin yhteydessä päällysteessä havaittiin lievää epätasaisuutta (Saarelainen 2002). Epätasaisuutta kuvaavat IRI-arvot olivat kesällä 2007 tehdyissä mittauksissa moreeniosuuksilla keskimäärin 2,3 mm/m, minkä perusteella tien kuntoluokka on ollut hyvä (Korkiala-Tanttu et al. 2008). PTM-mittaustuloksia ei ole mahdollista tarkastella tämän selvityksen yhteydessä, koska rakennusosuuden sijaintia ei voida käytettävissä olevan aineiston perusteella paikantaa luotettavasti nykyisen tierekisterin mukaiseen sijaintiin.

Johtopäätöksinä on todettu, että routasuojauksessa voidaan käyttää lievästi routivaa moreenia. Rakenteen c-osuudelle rakennetun kuivatuskerroksen vaikutusta moreenipenkereen routimiseen ei ole voitu osoittaa tehdyissä tutkimuksissa.

Rakentamisen jälkeen tehtyjen painumamittausten avulla voitiin havaita, että ikiroudan sulamisesta aiheutuvan sulamispainuman nopeus oli hidastunut ennen rakenteen parantamista mitatusta 70-100 mm/a tasolle 30-50 mm/a.

2.6.1.2 Mt 941 Männikkövaara, moreenipenger (Posio, 1996)

Mt 941 Männikkövaaran rakennuskohde on kuvattu yksityiskohtaisesti tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelman (1994–2001) kohderaportissa 42 (Ahonen et al. 2001). Moreenipengerrakenteen tavoitteena oli riittävän routakestävyyden saavuttaminen. Rakenteen parantamisen yhteydessä kohteen kuivatusta parannettiin salaojituksella sekä moreenipenkereen alapuolisella sorakerroksella, joka toimii salaojakerroksena ja kapillaarikatkona (kuva 56). Rakenteen a osuudelle toteutetusta moreenipengermateriaalista käytettiin myös nimitystä "seosmoreeni". Seosmoreeni valmistettiin kohteen olemassa olevasta tierakenteesta sekä pohjamaasta, sekoittamalla tierakenne sekä pohjamaa noin 2 metrin syvyydelle tasausviivasta. Mt 941 rakenteet sijoittuvat taulukossa 41 esitetyille tieosoiteväleille. Tierekisterin mukaan kyseinen tieosa ja sen paalutus on säilynyt muuttumattomana.



Kuva 56. Mt 941. Rakenteiden periaatekuva. a) tutkittu moreenipengerrakenne, b) vertailurakenteeksi toteutettu sorapengerrakenne ja c) vaihtoehtoinen rakenne (Ahonen et al. 2001, muokattu).

Taulukko 37. Mt 941. Kuvassa 56 esitettyjen rakenteiden sijoittuminen tierekisterin osoitejärjestelmään.

Rakenne	Tieosoite
Rakenne a (moreenipenger)	941/8/3700-3900
Rakenne b (vertailurakenne)	941/8/4080-4260
Rakenne c (vaihtoehtorakenne)	941/8/3920-4060

Rakentaminen

Moreenirakenteen osuudelle rakennettiin kiertotie, sillä alkuperäisenä tarkoituksena oli rakentaa uudet päällysrakennekerrokset kerralla koko tien leveydeltä. Sähkölinit olivat kuitenkin lähellä tietä, jolloin kaikkia leikkausmassoja ei saatu mahtumaan tien sivuun. Leikkaustyö toteutettiin siten, että poikkileikkauksesta kaivettiin ensin 2/3, mikä nostettiin jäljelle jääneen kaistan päälle. Leikkauspohjalle asennettiin suodatinkangas ja rakennettiin suodatinkerros. Ensimmäisessä vaiheessa kaivetut massat siirrettiin suodatinrakenteiden päälle ja homogenisoitiin kahdessa vaiheessa. Jäljelle jäänyt leikkaamaton 1/3 rakenteesta toteutettiin vastaavalla tavalla. Seosmoreenirakenteen yläpuoliset päällysrakennekerrokset rakennettiin normaalilla tavalla. (Korkiala-Tanttu et al. 2008)

Seurantatutkimukset

Kohteelle asennettiin routaputkia, pohjavesiputkia, kosteusmittarit ja lumenmittauslaudat. Vuosien 1997-2003 seurantalvien aikana mitatut routanousut (90...125 mm) olivat selvästi suurempia kuin perinteisessä massanvaihtorakenteessa. Havaitusta routanoususta 50-90 % arvioitiin olevan seurausta seosmoreenin routimisesta. Routanousut aiheuttivat rakenteessa päällysteen reunan pituussuuntaisia halkeamia. Päällystevauriot eivät olleet kuitenkaan seurannan aikana merkittäviä ja tien tasaisuus oli vuoden 2001 mittauksissa keväällä tyydyttävä ja kesällä hyvä. Tämä johtui siitä, että routanousu oli tasaista koko rakenteella.

Vuoden 2007 mittauksissa tien tasaisuus oli seosmoreenirakenteen sekä vertailurakenteen osuudella hyvän ja tyydyttävän välillä. Vuonna 2007 päällysteessä esiintyi vain muutamia pituushalkeamia ja tien vaurioituminen oli muutenkin vähäistä. Mt 941 rakenteet olivat toimineet hyvin 11 vuoden seurannan aikana.

2.6.1.3 Vt19 ja Vt 3/Vt 8, sillan tulopenkereet (Seinäjoki 2014 ja Laihia 2017)

Vt19 ja Vt3/Vt8 -ST-urakoissa hyödynnettiin lentotuhkaa siltojen tulopenkereissä. Vt19 lentotuhkarakenteet toteutettiin 22.9.-18.11.2014 kahden eri sillan tulopenkereisiin. Vt3/Vt8 sillan tulopenkereet rakennettiin 15.6.-21.9.2017. Seinäjoen hankkeelta vuonna 2014 saatujen kokemusten on arvioitu vaikuttavan osaltaan siihen, että lupaa tuhkan hyödyntämiselle haettiin myös Laihian hankkeelle (Nygård 2017).

Seinäjoella käytetyt tuhkat olivat Kristiinankylän ja Vaasan voimalaitosten kivihienpoltton lentotuhkaa sekä Seinäjoen voimalaitoksen turpeenpoltton lentotuhkaa. Vt3/Vt8 -hankkeessa käytetty tuhka toimitettiin Vaasan Vaskiluodon voimalaitokselta. Seinäjoen hankkeessa tuhkaa hyödynnettiin tulopenkereiden rakentamisessa yhteensä 65 000 tonnia ja Laihian hankkeessa noin 19 000 tonnia.

Kuvassa 57 on esitetty siltojen tulopenkereiden rakentamista Seinäjoen ja Laihian hankkeilla.



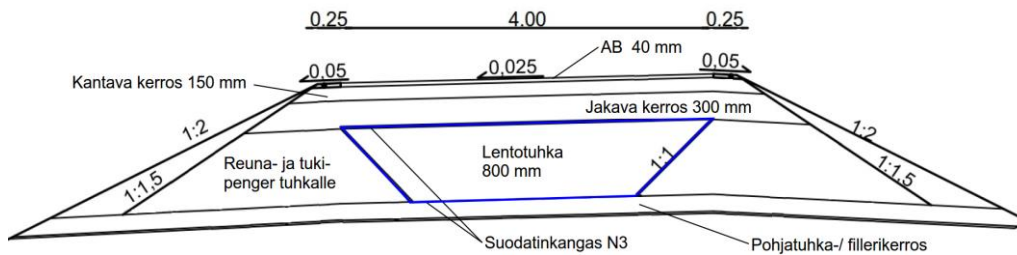
Kuva 57. Sillan tulopenkereen rakentaminen tuhkasta a) Vt19, tuhkapenkereen rakentamista ja siinä käytettyä kalustoa (Mäkinen 2014) ja b) tuhkakuljetuksen purku rakenteilla olevaan pengerrakenteeseen Vt3/Vt8 (Nygård 2017).

Rakentamista varten tuhkien vesipitoisuus säädettiin materiaalitoimittajien toimesta tiivistystyön kannalta optimaaliseksi. Seinäjoen lentotuhkapenkereen rakentamisessa ei esiintynyt ongelmia lukuun ottamatta muutamia sadepäiviä, jolloin tuhkarakenne pehmeni ja penkereiden työmaateitä jouduttiin vahvistamaan murskeella/moreenilla. Tuhkarakenteet täyttivät valmiin maapenkereen vaatimukset. (Immonen 2017)

Laihian hankkeen tuhkarakentamisen työn toteutusta edesauttoi aikaisempi kokemus tuhkarakentamisesta. Tuhkarakentaminen sujui Laihian hankkeella odotuksien mukaisesti, eikä rakentamistyötä jouduttu keskeyttämään kuin ainoastaan kerran (sade). Laihian hankkeelle toteutetun tuhkarakenteen tiiveys ja kantavuus täytti pengerrakentamiselle asetetut vaatimukset. (Nygård 2017)

2.6.1.1 Mt 741 Lövö–Sandsund, KLV (Pietarsaari, 2015)

Pietarsaaren kunnan alueelle sijoittuvan Mt 741 uuden kevyen liikenteen väylän rakentamisessa suunniteltiin hyödynnettäväksi lähialueella sijaitsevalla voimalaitoksella muodostuvia lento- ja pohjatuhkia. Lentotuhkarakentamista varten haettiin ympäristölupa, joka myönnettiin 20.4.2012. Luvassa esitettyjen määräysten mukainen rakenne on esitetty kuvassa 58.

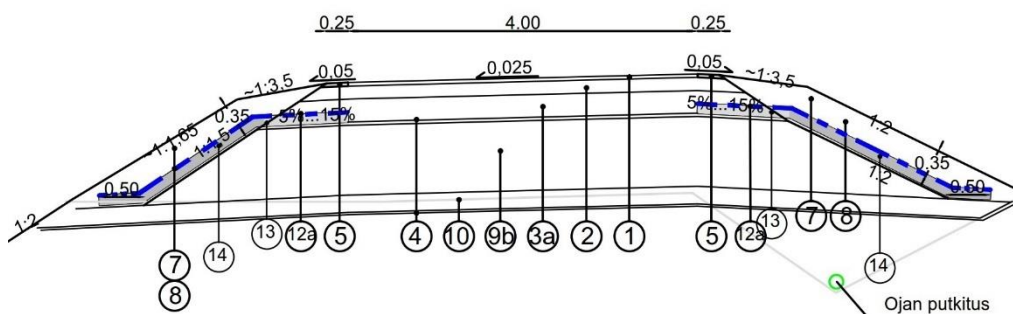


Kuva 58. Mt 741 Lövo-Sandsund. Alkuperäisen ympäristöluvan mukaisen tuhkarakenteen poikkileikkaus (LSSAVI 2014, muokattu).

Ympäristöluvan haettiin muutosta tuhkan hyödyntämiselle myös kevyen liikenteen väylän rakenteen luiskaosuksiin, jotka ovat päällystetyn osuuden ulkopuolella. Tällä tavoiteltiin hyödynnettävän tuhkamäärän kasvattamista.

Ympäristöluvan muutoshakemuksessa esitettiin päällysteen ulkopuolella (luiskat) olevan tuhkan suojaamista bentoniittimatolla tai ohutmuovikalvolla, jotta pinta- ja vajovedet eivät pääse tuhkarakenteeseen. Kuvassa 59 on esitetty 11.7.2014 annetun luvan (LSSAVI/181.04.08/2013) määräysten mukainen rakenne, jota käytettiin kohteen rakentamisessa.

Lentotuhkapenkereen tiivistämistä varten tehtiin laboratoriotutkimuksiin perustuva työtapaohjeistus, jonka perusteella rakennettiin tiivistyskoekenttä joulukuussa 2014. Tiivistyskokeiden jälkeen käynnistettiin kohteen tuhkarakentaminen, mikä ajoittui 12/2014 – 3/2015 väliselle ajalle. Kohteen rakentamisvaiheen valokuvia on esitetty liitteen 5 kuvassa 106. Rakenteissa hyödynnettiin lentotuhkaa yhteensä 19 716 tonnia. (Lummi et al. 2015)



Nro	Päällysrakenteen osa	Materiaali	Paksuus mm	E-moduuli MPa
1	Päällystekerros	AB 11	40	2500
2	Kantava kerros 1)	KaM # 0/32 mm	150	280
3a	Jakava kerros 1)	M # 0/45 mm	300	200
4	Suodatinkangas	N3		
5	Piennar	M # 0/16	40	
6	Penger	-	-	-
7	Nurmetus	Maisemanurmi II	-	-
8	Luiskatäyttö	-	-	-
9b	Jakava kerros lentotuhkalla	Lentotuhka	800	70
10	Suodatin- / kuivatuskerros	Hk/ M	200	-
11	Reuna- / tukipenger tuhalle	M # 0/90...200	800	-
12a	Bentoniittimatto 2)			
13	Eristekerros	M # 0/16	150	-
14	Eristekerros	Hk	150	-

Kuva 59. Mt 741 KLV. Päällysrakenteen periaatekuva (LSSAVI 2014 ja Ram-boll, 2014, muokattu).

2.6.2 Liikennekuormittamattomat maapenkereet

2.6.2.1 Kehä I, Sepänmäki, meluvalli (Helsinki, 2016-2018)

Meluvalli sijoittuu Mt 101 (Kehä I) ja Vt 4 eritasoliittymään Tattarinharjun alueelle. Kohteessa on tutkittu stabiloitujen ruoppausmassojen hyötykäyttöä meluvallirakenteessa. Lisäksi kohteessa on arvioitu kuljetuksen vaikutusta stabiloitujen massojen rakentamisominaisuuksiin sekä rakenteessa saavutettavaa lujuutta ja jäykkyyttä (kuljetusmatka Jätkäsaaresta Sepänmäkeen n. 25 km).

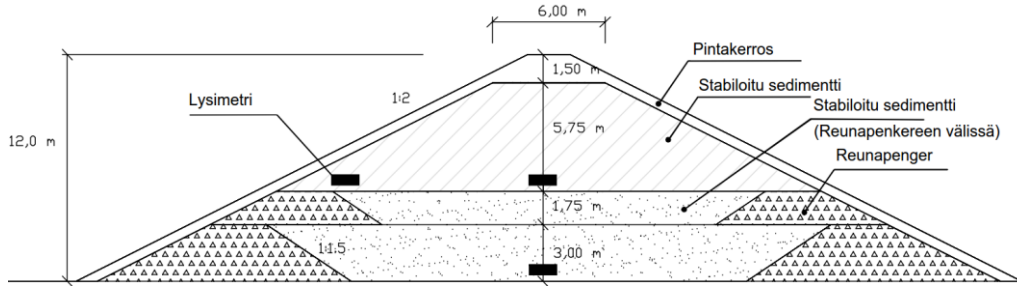
Helsingin edustalta ruopattuja, osin pilaantuneita sedimenttejä on massastabiloitu Jätkäsaaresta tuhkasideaineita käyttäen talvella 2014. Stabilointia on tehty kuudella erilaisella sideaineresptillä (taulukko 42). Sedimenttien teknisiä ominaisuuksia ja ympäristökelpoisuutta on tutkittu stabilointialtaassa ennen massastabilointia ja massastabiloinnin jälkeen sekä stabilointialtaassa että meluvallissa. Stabiloidut massat ovat peräisin Jätkäsaaren sedimenttialtaasta, josta ne on kuljetettu Sepänmäkeen (kuva 60) hyödynnettäväksi meluvallin rakennusmateriaalina. (Forsman et al. 2018)



Kuva 60. Kehä I Sepänmäki. Stabiloidusta sedimentistä rakennettu meluvalli. (Forsman et al. 2018)

Sedimentin stabilointia koskevien teknisten tutkimusten lisäksi, rakentamisen ympäristölupa edellytti stabiloitujen sedimenttien hyötykäyttökelpoisuutta koskevia tutkimuksia, joita olivat stabiloidun materiaalin sisältämien haitta-ainesten kokonaispitoisuuksien ja -liukoisuuksien määrittäminen (Pyykkö & Lindroos 2015).

Stabiliteettilaskelman perusteella stabiloidun sedimentin leikkauslujuuden tuli olla vähintään 20 kPa reunapenkereiden väliin sijoitettavalle stabiloidulle sedimentille ja 67 kPa reunapenkereiden yläpuolella (Dettenborn & Forsman 2016). Kuvassa 61 on esitetty esimerkki meluvallin poikkileikkausgeometriasta, rakenteet sekä meluvalliin asennettujen lysimetrien sijainnit.



Kuva 61. Sepänmäen meluvallin periaatekuva (Dettenborn & Forsman 2016 ja Forsman et al. 2018, muokattu).

Taulukko 38. Kehä I Sepänmäki. Ruopatun sedimentin stabiloinnissa käytetyt sideaineseokset (Forsman et al. 2015, muokattu)

Materiaaliseoksen tunnus	Sideaine 1 / (kg/m ³)	Sideaine 2 / (kg/m ³)	Sideaine 3 / (kg/m ³)
SA1	LT / 150	KC / 50	-
SA2	LT / 75	KC / 50	RPT / 75
SA3	LT / 150	PlusSe / 50	-
SA3S	LT / 150	PlusSe / 50	-
SA4	LT / 75	PlusSe / 50	RPT / 75
SA5a	PKT B8 / 150	-	-
SA5b	PKT B5 / 150	-	-

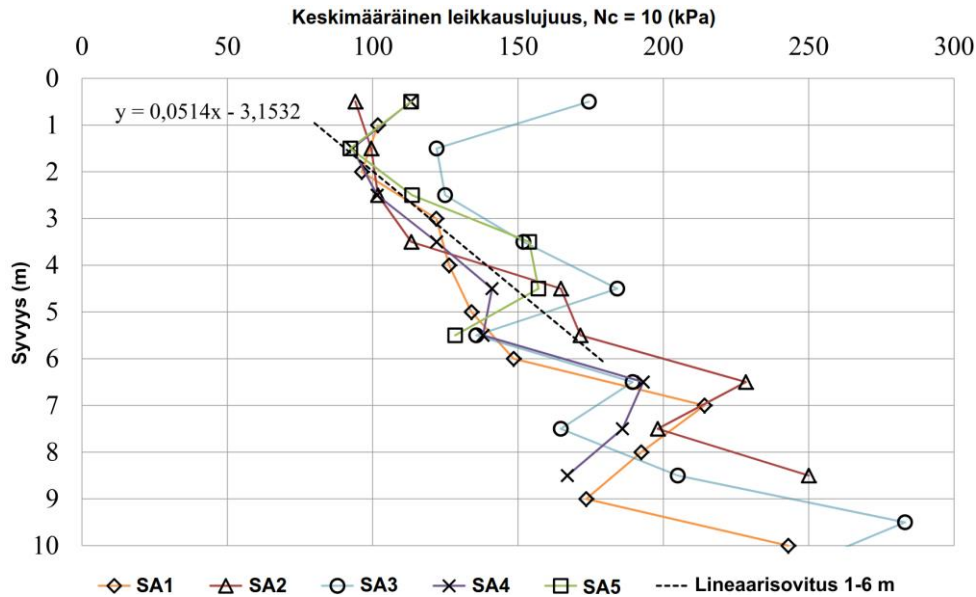
LT = lentotuhka (Helen Hanasaari), KC= kalkkisementti (Nordkalk Terra KC 50), RPT= rikinpoistotuote (Helen Hanasaari), PlusSe= PlusSementti (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N) ja PKT B8/B5= Palavan kiven polton lentotuhka blokki 8/5 (Eesti Energia)

Rakentaminen

Stabiloitujen sedimenttien kuljetukset Sepänmäen meluvalliin toteutettiin huhti-lokakuun 2016 välisenä aikana. Meluvallissa hyödynnettiin yhteensä noin 30 000 m³ rtd stabiloitua sedimenttiä, 1222 kuormaa louhetta, 494 kuormaa betonimursketta sekä 21 kuormaa ns. Helsinki-moreenia. (Forsman et al. 2018)

Seurantatutkimukset

Sepänmäen meluvalliin rakennettujen stabiloitujen sedimenttikerrosten lujuutta tutkittiin rakentamisen jälkeen pilarikairauksilla (kuva 62). Kaikki mittaus tulokset ylittivät selvästi stabiliteettitarkastelussa leikkauslujuuden alhaisimpana arvona käytetyn 60 kPa lujuuden. Tulosten perusteella stabiloidun sedimentin leikkauslujuus ei ole heikentynyt kaivu-, kuljetus- ja rakentamistöiden aikana. (Forsman et al. 2018)

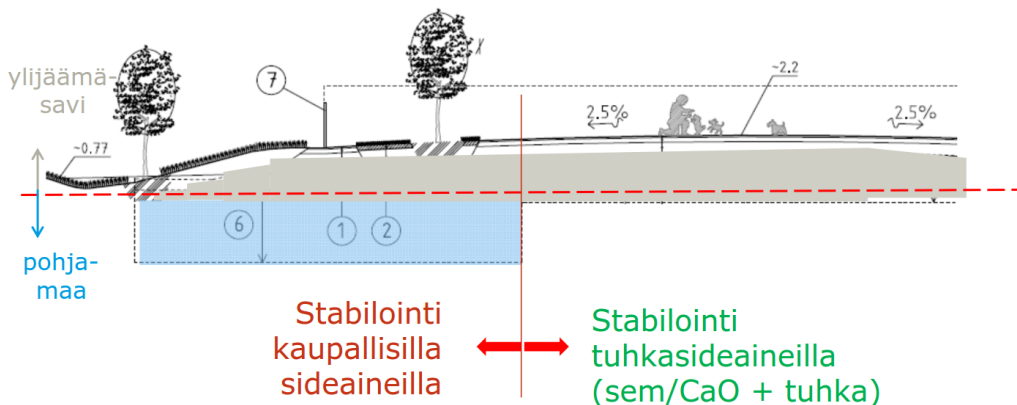


Kuva 62. Kehä I, Sepänmäki. Stabiloitujen sedimenttien keskimääräinen pilarikairalla määritetty leikkauslujuus syvyyden suhteen. Sideainetyypit (esim. SA1) on esitetty taulukossa 42. (Forsman et al. 2018, muokattu).

2.6.2.2 Koirapuisto, Perkkää (Espoo 2012-2013)

Hankkeessa oli tavoitteena nostaa rakennettavan koirapuiston tasausta tulvarajan yläpuolelle, rajoittaa painumia, parantaa stabiliteettia sekä hyötykäyttää alueella muodostuvat ylijäämäsavet. Perkkään koirapuisto sijaitsee savikolla, jonka Espoon kaupunki luokittelee rakennettavuusluokkaan 5A (=erittäin vaikeasti rakennettava 11-14 m syvä pehmeikkö). (Forsman et al. 2014)

Penkereessä hyödynnetyn viereisen työmaan ylijäämäsavien ja pohjamaan pintaosan massastabiloinnissa hyödynnettiin sementtiä, lentotuhkaa ja rikinpoiston lopputuotetta (kuva 63). Kohteen ympäristölupa mahdollisti ainoastaan ylijäämämaiden eli paikalla olevan savikerroksen yläpuolelle pengerrytetyn savien massastabiloinnin tuhkasideaineilla. Massastabiloinnin tilavuus oli n. 13 000 m³, josta ylijäämäsavien osuus n. 6000 m³. Ylijäämäsaveä oli peräisin viereisellä katu-työmaalla samanaikaisesti tehdystä massanvaihdosta. Ylijäämäsaveä kuljetusmatka oli n. 300 m. (Forsman et al. 2013 ja 2014)



Kuva 63. Perkkään koirapuistossa toteutetut rakenteet (Forsman et al. 2014).

Kohteessa tehtiin kattavat laboratorio- ja kenttätutkimukset mm. paino- ja siipikairausten, näytteenoton, lysimetriseurannan, stabiloinnin laadunvalvonnan ja painumamittausten avulla. Tehtyjen tutkimuksien perusteella ylijäämänsaven ja pohjamaan massastabilointi onnistui hyvin. Lisäksi uusiomateriaalien hyötykäyttö massastabiloinnin sideaineena vähensi CO₂ -päästöjä (Forsman et al. 2014; Niemelin et al. 2015).

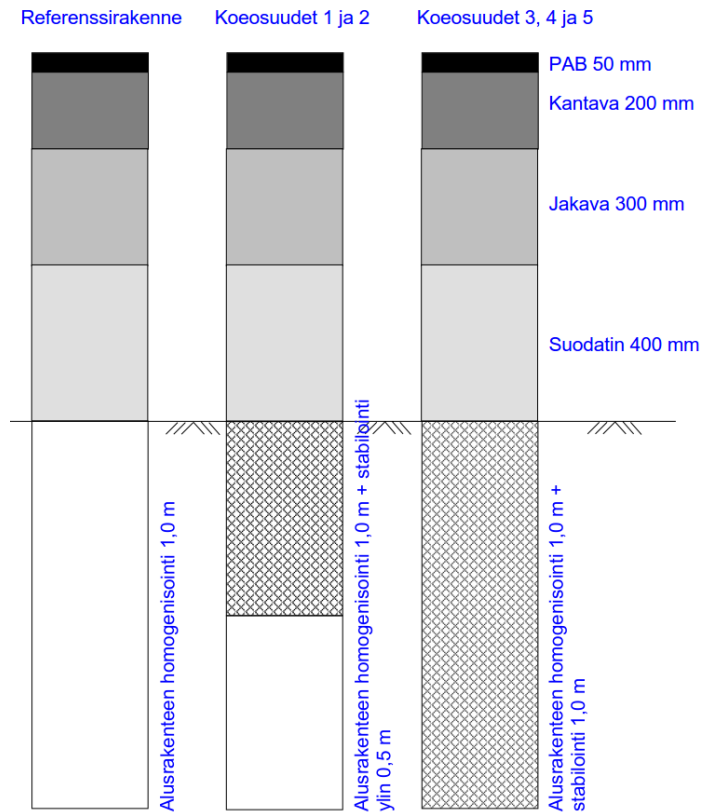
2.7 Pohjamaan pinnan stabilointi

2.7.1 Mt 595, routivan moreenipohjamaan stabilointi (Kiuruvesi, 1996)

Vuonna 1996 rakennettu kohde sijaitsee Savo-Karjalan tiepiirin alueella Kiuruveden ja Salahmin välillä. Rakentamisen tavoitteena oli saavuttaa riittävä routakestävyys estämällä päällysteen halkeilu ja sulamisvaiheen liiallinen kantavuuden aleneminen sekä epätasaisten tai haitallisten routanousujen syntyminen. Routakestävyuden parantamismenetelminä käytettiin alusrakenteen mekaanista homogenisointia ja homogenisoidun materiaalin hienoaineksen käsittelyä sementtistabiloinnin avulla.

Rakenteiden rakennusosat (kuva 64) olivat pinnasta lukien PAB 50 mm, kantavan kerroksen murske 200 mm, jakavan kerroksen sora 300 mm, suodatinkerros 400 mm sekä päällysrakenteen alla homogenisoinnin ja stabiloinnin yhdistelmä (kuva 64, koeosuudet 1-5) käyttäen sideaineena sementtiä 20, 40 tai 60 kg/m². Vertailurakenteena (kuva 64 referenssirakenne) toimi perinteisesti tehty alusrakenteen homogenisointi, joka tehtiin 2,0 m syvyyteen tien tasausviivasta. (Ahonen et al. 2004)

Kohteen keskimääräinen vuorokausiliikenne (KVL) on 400 ajoneuvoa/vrk, josta raskaan liikenteen osuus on 25 %.



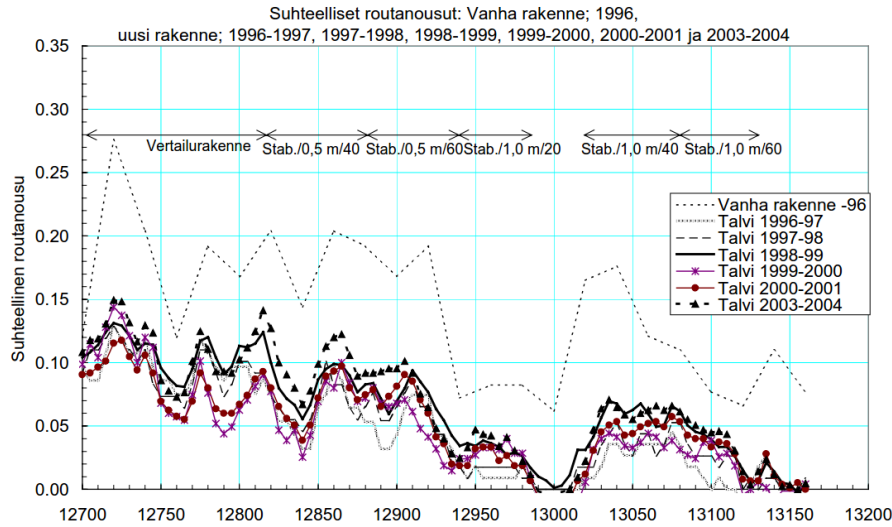
Kuva 64. Mt 595.Rakennekerrokset ja alusrakenteelle tehdyt toimenpiteet. (Ahonen et al. 2004)

Seurantatutkimukset

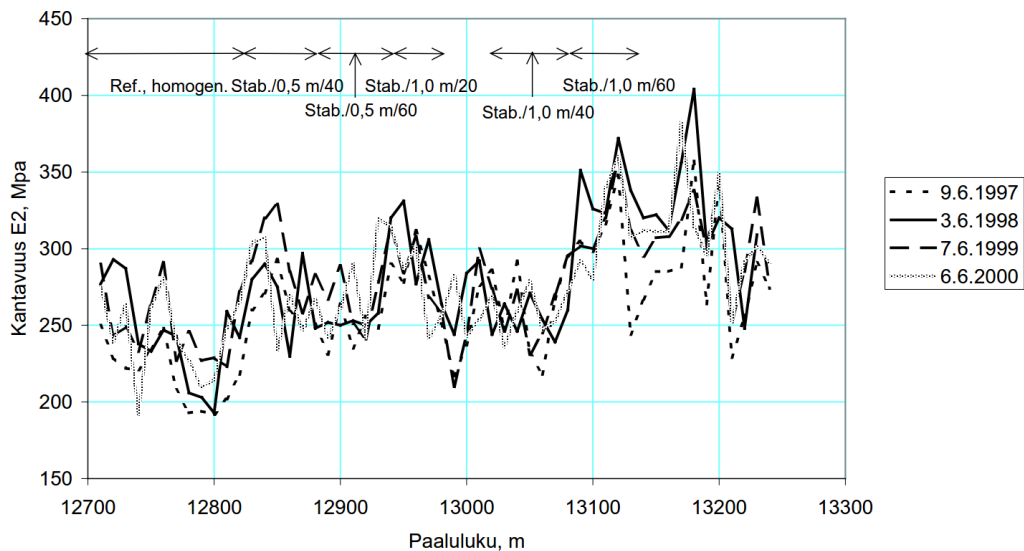
Instrumentointi toteutettiin asentamalla kohteeseen routaputket, pohjavesiputket ja lumenmittauslaudat. Lisäksi rakenteista mitattiin rakentamisen jälkeen kantavuuksia.

Tien keskilinjan suhteellinen routanousu on esitetty kuvassa 65. Uusien päällysrakenteiden rakentaminen ja pelkkä alusrakenteen homogenisointi pienensivät suhteellisen routanousun jo noin puoleen verrattuna vanhaan rakenteeseen. Stabiloitujen koerakenteiden suhteellisten routanousujen keskiarvo oli seurannan aikana noin 33-38 % vanhan rakenteen suhteellisesta routanoususta. Ensimmäisen talven aikana stabiloiduilla osuuksilla routanousua alkoi muodostua vasta routarajan tunkeuduttua stabiloidun kerroksen läpi. Myöhempinä talvina havaittiin myös stabiloidun kerroksen routimista.

Kuvassa 66 on esitetty koerakenteiden kantavuusmittausten tulokset. Alusrakenteen sementtistabilointi on parantanut koko päällysrakenteen kantavuutta.



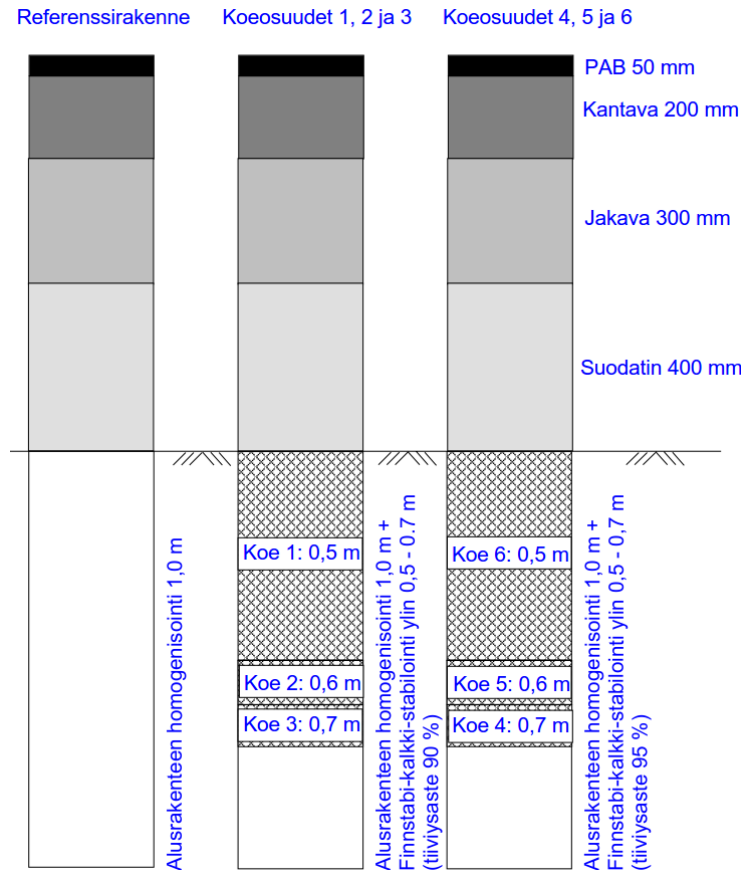
Kuva 65. Mt 595. Tien keskilinjän suhteellinen routanousu keväänä 1997-2001 ja 2004 sekä vanhan tierakenteen suhteellinen routanousu keväällä 1996. (Ahonen et al. 2004)



Kuva 66. Kantavuusmittausten tulokset 1997-2000. (Ahonen et al. 2004)

2.7.2 Mt 5950, routivan alusrakenteen stabilointi (Salahmi 1997)

Vuonna 1997 rakennettu kohde sijaitsee Savo-Karjalan tiepiirin alueella Kiuruveden ja Salahmin välillä. Tavoitteena oli saavuttaa riittävä routakestävyys estämällä päällysteen halkeilu ja sulamisvaiheen liiallinen kantavuuden aleneminen sekä epätasaisten tai haitallisten routanousujen syntyminen. Menetelmänä käytettiin alusrakenteen homogenisointia mekaanisella menetelmällä ja lisänä homogenisoidun materiaalin hienoaineksen käsittelyä stabiloinnin avulla. Lisäksi koerakenteissa vertailtiin stabiloidun alusrakenteen tiiviysasteen vaikutusta routivuuteen (90% ja 95%). Koeosuuksien rakenteet on esitetty kuvassa 67. (Kivikoski 2004).



Kuva 67. Mt 5950. Rakennekerrokset ja alusrakenteelle tehdyt toimenpiteet. (Kivikoski 2004)

Rakentaminen

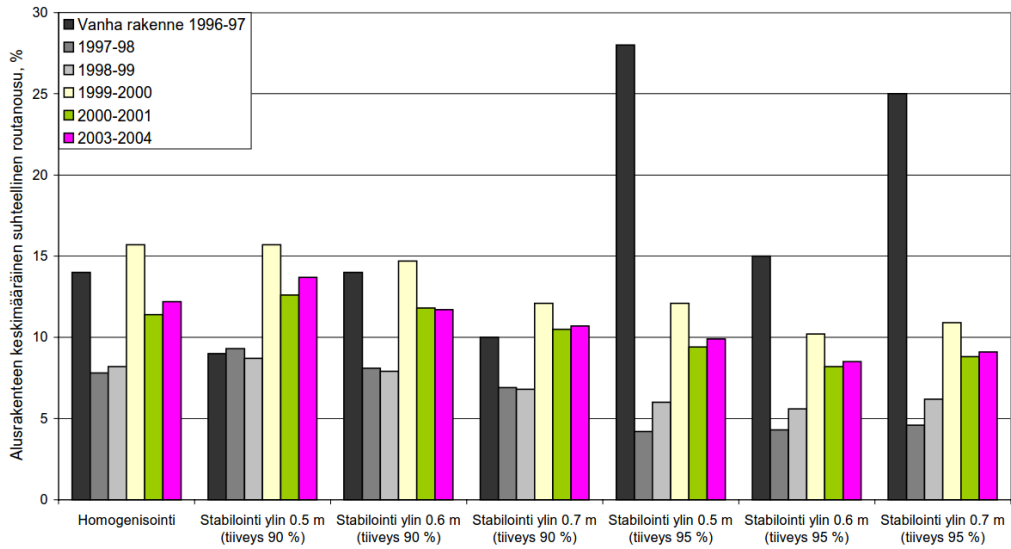
Pohjamaan homogenisointi tehtiin kaivinkoneella, jossa kauhana oli normaali tasakärkinen kuokkakauha. Homogenisointisyvyys oli -2,0 m tien tasausviivasta. Homogenisointi pyrittiin tekemään siten, että alusrakenne sekoittui mahdollisimman hyvin ja että kaikki epätasaista routimista aiheuttavat epäjatkuuskohtat saataisiin poistettua. (Kivikoski 2004)

Stabiloinnissa käytetty sideaine levitettiin alusrakenteen päälle pyöräkuormajalla. Levityksen jälkeen sideaine sekoitettiin alusrakenteeseen "Maamyyrä" rumpusekoittimella. Stabilointisyvyys vaihteli koeosuuksilla välillä 0,5-0,7 m. (Kivikoski 2004)

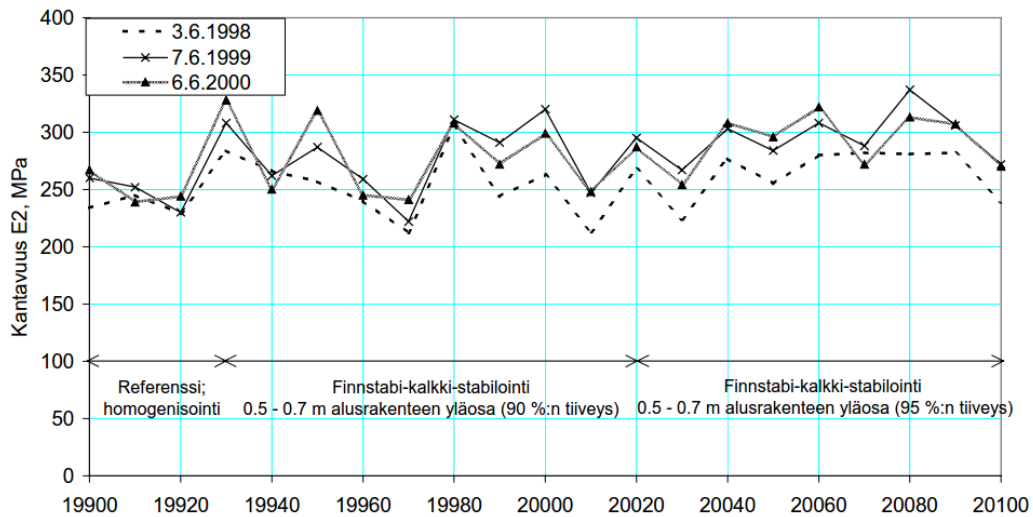
Seurantatutkimukset

Kuvassa 68 on esitetty vanhan ja uuden rakenteen alusrakenteen keskimääräiset suhteelliset routanousut. Koeosuuksilla, joissa alusrakennetta stabiloitiin Finnstabi-kalkkiseoksella 0,5-0,7 m tiivysastetavoitteella 95 %, routanousut olivat ensimmäisen seurantalven aikana selvästi pienempiä kuin muilla koeosuuksilla. Samoin routanousutaso oli pienentynyt vanhaan rakenteeseen verrattuna selvästi eniten. Keskimääräiset suhteelliset routanousut vaihtelivat tällöin välillä 4,2-4,6 %. Kolmen viimeisen seurantalven aikana suhteelliset routanousut kasvoivat kuitenkin näissä koerakenteissa eniten. Alusrakenteen Finnstabi-kalkkiseosstabiloinnilla ei saavutettu merkittävää etua routakestävyudessa suhteessa osuuteen, jossa alusrakenne vain homogenisoitiin. (Kivikoski 2004)

Kuvassa 69 on esitetty mitatut kantavuudet. Kantavuusmittauksissa ei ole merkittävää eroa rakenteiden välillä.



Kuva 68. Mt5950. Vanhan ja uuden rakenteen alusrakenteen keskimääräiset suhteelliset routanousut (routanousun suhde pohjamaan/stabiloinnin jäätymissyvyyteen) eri koeosuuksilla seurantamittauksien aikana. (Kivikoski 2004)



Kuva 69. Mt5950. Kantavuusmittausten tulokset kesäkuussa 1998, 1999 ja 2000. (Kivikoski 2004)

3 Yhteenveto

Tässä raportissa on käsitelty 38 kohdetta, joista 23:ssa on hyödynnetty uusiomateriaalia kantavassa ja/tai jakavassa kerroksessa. Tarkastellut kohteet valittiin useiden kymmenien kohteiden joukosta. Kohteissa hyödynnetyt uusiomateriaalit on esitetty taulukossa 1 tai ne ovat luettavissa luvusta 2. Taulukossa 43 on esitetty listaus käsitellyistä kohteista. Listauksessa jaotteluperusteena on rakennusosa ja siinä on mainittu kohteen nimi ja sijainti, mutta ei mitään uusiomateriaalia kohteessa on hyödynnetty. Muutamassa kohteessa uusiomateriaaleja on hyödynnetty saman rakenteen useammassa rakennusosassa, joten ko. kohteet on esitetty listauksessa useampaan kertaan.

Taulukossa 43 kohteet on numeroitu sen rakennusosan mukaisesti, mitä on ensisijaisesti ko. kohteessa tarkasteltu. Esimerkiksi kohteessa Yt 11591 (nro 1.) on kantavan kerroksen betonimurske ollut ensisijainen kiinnostuksen kohde, vaikka ko. rakenteessa betonimursketta on käytetty myös jakavassa kerroksessa tai kohteessa Parivaljakontie (nro. 27) ensisijainen mielenkiinto oli rengasrouheen käyttämisessä kadun kevennysrakenteena, vaikka kohteessa käytettiin myös masuunihiekkää jakavassa kerroksessa ja betonimursketta kantavassa kerroksessa.

Taulukko 39. Raportissa käsitellyt uusiomateriaalikohteet rakennusosittain jaoteltuna. a) Päällystetyn päällysrakenteen rakennusosat ja b) Muiden rakenteiden rakennusosat.

a)	<p>Sitomattomat kantavat kerrokset</p> <p>1. Yt 11591 Rusutjärvi-Paijala (Tuusula)</p> <p>2. Vt 3 Sasi-Metsäkylä (Hämeenkyrö-Ylöjärvi)</p> <p>3. Vt 4 Järvenpää-Mäntsälä (Järvenpää)</p> <p>4. Haikala, Vuorenhaltijantie välillä Kirkkotie-Velhotie (Nurmijärvi)</p> <p>5. Haaransilta Kiertotie ja Vt4 / Vt8 kiertoliittymä (Liminka)</p> <p>27. Parivaljakontie, katu (Helsinki)</p>
	<p>Sidotut kantavat kerrokset (stabiloitu uusiomateriaali)</p> <p>6. Yt 14795 Vihtola-Jäkkö (Lappeenranta)</p> <p>7. Yt 19552 Yli-Liakka-Kourilehto (Tornio)</p> <p>8. Yt 11146 Degerby-Tyris (Inkoo)</p> <p>9. Mt 272 Ämttöö-Poikeljärvi (Pori)</p>

Stabiloidut kantavat kerrokset (stabiloitu murske)

- 8. Yt 11146 Degerby-Tyris (Inkoo)
- 10. Kt 87 (Rautavaara)
- 11. Yt 14547 Teuroinen (Elimäki)
- 12. Yt 14800 Hanhikemppi (Lappeenranta)
- 13. Yt 16563 Seppola-Kaipola (Jämsä)
- 14. Yt 16573 Hiidenmäki-Vaheri (Jämsä)
- 15. Satamakenttä, Vuosaaren satama (Helsinki)

Jakavat kerroksetSitomattomat:

- 1. Yt 11591 Rusutjärvi-Paijala (Tuusula)
- 2. Vt 3 Sasi-Metsäkylä (Ylöjärvi)
- 16. Lasikaari välillä Lentoasemantie-Sorkkalantie (Pirkkala)
- 17. Lahdenperänkatu välillä Viinikankatu-Jokipohjantie (Tampere)
- 18. Vt4 Tervola, massanvaihto (Keminmaa)

Sidotut

- 6. 14795 Vihtola-Jäkkö (Lappeenranta)
- 9. Mt 272 Ämttöö-Poikeljärvi (Pori)
- 19. Vt19 Seinäjoen itäinen ohikulkutie (Seinäjoki)
- 20. Tilanhoitajankaari, Viikin savikatu (Helsinki)
- 27. Parivaljakontie, katu (Helsinki)
- 5. Haaransilta Kiertotie ja Vt4 / Vt8 kiertoliittymä (Liminka)

Suodatinkerrokset

- 21. Vt4 Tervola, massanvaihto (Keminmaa)
- 9. Mt 272 Ämttöö-Poikeljärvi (Pori)

b) Soratiet
21. Yt 14567 Metsäkulmantie (Koria)
22. Mt 5341 Mustinsalo Sarkalahti (Leppävirta)
23. Yt 13791 välillä Vt 11 - Ala-Pinsiö (Nokia)
24. Kukkia -Cirlet (Pälkäne)
25. Tuhkatie -hanke (Karstula)
26. Yt 11636 Knuters-Östersundom (Sipoo)
Kevennetyt penkereet
27. Parivaljakontie, katu (Helsinki)
28. Kehä I, Meluvalli (Helsinki)
29. Vt 7 Porvoo-Koskenkylä, meluvalli (Porvoo)
Liikennekuormitetut maapenkereet
30. Vt 21 moreenipenger (Peera)
31. Mt 941 Männikkövaara, moreenipenger (Posio)
32. Vt19 sillan tulopenkereet (Seinäjoki)
33. Vt 3/Vt 8 sillan tulopenkereet (Laihia)
34. Mt 741 Lövö-Sandsund, KLV (Pietarsaari)
Ei liikennekuormitetut maapenkereet
35. Kehä I, Sepänmäen meluvalli (Helsinki)
36. Koirapuisto, Perkkää (Espoo)
Pohjamaan pinnan stabilointi
37. Mt 595, routivan moreenipohjamaan stabilointi (Kiuruvesi)
38. Mt 5950, routivan alusrakenteen stabilointi (Salahmi)

Taulukoihin 45-62 on koottu tässä raportissa käsiteltyjen uusiomateriaalirakenteiden teknisen toimivuuden ja pitkäaikaiskestävyyden kannalta oleelliset tekijät, jotka on luokiteltu taulukossa 44 esitettyjen perusteiden mukaisesti.

Luokitusperusteena "-" merkki ilmaisee ko. tekijällä olevan negatiivinen vaikutus rakenteen toimintaan ja "+" merkki puolestaan tarkoittaa sitä, että tekijällä on heikentävä vaikutus rakenteen toimintaan.

Taulukko 40. Rakenteiden toimivuuden arvioinnissa käytetyt luokitusperusteet. (sama kuin taulukko 3)

Luokitus	Selite
+++	Erinomainen
++	Hyvä
+	Tyydyttävä
-	Huono
--	Erittäin huono
ei mit.	Ei mitattu / arvioitu

3.1 Sitomattomat kantavat kerrokset

Tässä tarkastellut sitomattomat kantavat kerrokset on rakennettu betonimurskeesta, joka on lujittunut rakenteessa. InfraRYL:ssä kantavan kerroksen rakentaminen betonimurskeella on käsitelty kohdassa "21300 Sitomattomat kantavat kerrokset".

Betonimurskerakenteilla voidaan saavuttaa pitkän ajan (yli 10 vuotta) kuluessa 15-25 % suurempia päällysteen päältä mitattuja kantavuuksia verrattuna tavanomaisella luonnonkiviaineksella tehtyyn rakenteeseen. Kantavuuden kehittymiseen vaikuttaa betonimurskeen lujittuminen, mikä perustuu betonimurskeen sisältämän sitoutumattoman sementin lujittumisreaktioon (Dettenborn 2013).

Taulukosta 45 havaitaan, että 10 AB-kuormitusluokan mukaiset kantavuustavoitteet on kaikissa kohteissa ylittyneet. Näissä rakennuskohteissa tien päällysrakenne on toiminut hyvin, ja tavanomaisesta poikkeavaa vaurioitumista ei ole havaittu.

Taulukko 41. Betonimurske kantavassa kerroksessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde	Yt 11591 Rusutjärvi - Paijala, (Tuusula,1995)	Vt3 Sasi - Metsäkylä, (Nokia,1996)	Vt4 Järvenpää - Mäntsälä, (Järven- pää, 1998)	
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy	Uusi tie ja vanhan tien pe- rusparannus	Tien levennys	Uusi moottoritie	
Toimivuuden kokonaisarvio	Hyvä , rakenne on toiminut suunnitellulla tavalla	Hyvä , rakenne toimi- nut suunnitellulla ta- valla	Hyvä , rakenne toimi- nut suunnitellulla ta- valla	
KVL (ajon./vrk)	9 000	15 000	22 500	
Kantavuustavoite (MPa)	420 (10,0 AB)*	420 (10,0 AB)*	420 (10,0 AB)*	
Rakenne	Päällyste	90-130 mm	AB/130 mm	210 mm
	Kantava	BeM I / 200 mm	BeM I / 330 ja 400 mm	BeM I / 150 mm
	Jakava	BeM I / 200 mm	Sr, Hk / 450 mm	Louhe / 1100 mm
	Suodatinkerros	Hk / 600-650 mm	Hk / 100 mm	-
	Pengertäyttö	-	-	-
	Pohjamaa/alusrakenne	Hk	Sr	Sa
	Päällystehalkeamat	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu
Toimivuus	Urautuminen	Ei poikkea tavanomaisesta		
	Kantavuus (MPa)	500 - 750	500 - 600	900
	Tasaisuus	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu
	Kuivatus	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu
	Takaisinlask. BeM E-moduuli	430 - 900 MPa	515 - 650 MPa	250 - 650 MPa
	Lujittuminen	++ BeM I	++ BeM	++ BeM
	Seurantatutkimukset	Dettenborn 2013		
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus	Päällyste riittävän paksu, Alapuolisen rakenteen kantavuus riittävä			
Tehdyt korjaustoimenpi- teet	Ei poikkea tavanomaisesta			
Huomiot:	* Rakenne on suunniteltu ja rakennettu ennen Tierakenteen suunnitteluoh- jetta (2004). Toteutunut kantavuus on 10 AB laatuvaatimuksen mukainen.			

BeM = Betonimurske

Kantavan kerroksen betonimurskekerroksen rakentamisen ja käyttöönoton onnistuminen ei ole kuitenkaan aina itsestäänselvyys. Liitteessä 6 on esitelty kohde, jossa betonimurskeesta masuunihiikkakerroksen päälle rakennettu kantava kerros vaurioitui liikenteelle otton jälkeen. Syitä vaurioitumisille olivat mm. alimitoitettu rakenne, lujittuvana mitoitettun rakenteen rakentaminen myöhään syksyllä ja liikenteelle avaaminen ennen riittävää lujittumista, työmaan laadunvalvonnan puutteet, yms. Kohteen kokemusten perusteella erityisesti kantavan kerroksen suunnittelussa, rakentamisessa, laadunvalvonnassa ja käyttöönotossa on ohjeiden noudattaminen tärkeää.

3.2 Sidotut kantavat kerrokset

Sidottu kantava kerros voi tässä tarkoittaa sidottua uusiomateriaalia tai stabiloitua kiviainesta. Molemmassa tapauksissa sideaineena voi toimia esim. sementti tai uusiomateriaali. Tässä raportissa on käsitelty:

- sementillä tai sementin ja uusiomateriaalin seoksella stabiiloituja uusiomateriaaleja (*Sidottu uusiomateriaali*) tai

- uusiomateriaalilla stabiloituja luonnon kiviaineksia (*Stabiloitu kantava kerros*).

Kummallekaan ratkaisulle ei löydy suoraan ohjeistusta ja litteraa InfraRYL:stä. Ko. ratkaisuille löytyy vain ylemmän tason littera ja otsikko "21320 Sidotut kantavat kerrokset". Uusiomateriaalilla stabiloitavalle kantavalle kerrokselle voidaan soveltuvin osin noudattaa litterassa "213212 Sementtistabilointi (SST)" esitettyjä ohjeita.

3.2.1 Sidottu uusiomateriaali

Taulukossa 46 on esitetty yhteenveto rakennuskohteista, joissa sidottua uusiomateriaalia on käytetty kantavassa kerroksessa. Taulukossa 47 on esitetty kohde Yt 19552, jossa tutkittiin lujittuvan lentotuhkan soveltuvuutta kantavaan kerrokseen ilman sideaineaktivointia. Kohteessa tutkittiin myös sideaineella stabiloitua tuhkaa ja tuhka+sementti -seoksella stabiloitua teräskuonaa.

Kun uusiomateriaalia käytetään runko- tai sideaineena sidotussa kantavassa kerroksessa runko- tai sideaineena, tulee materiaaliseos suhteittaa kokeellisesti, jotta voidaan varmistua siitä, että materiaaliseos saavuttaa riittävät tekniset ominaisuudet (lujuus, routimattomuus, rasituskestävyys). Tarkasteltujen kohteiden ksideaineseoksissa on käytetty erilaisia määriä sementtiä riittävän lujuuden ja rasituskestävyyden saavuttamiseksi tai itselujittuvien uusiomateriaalien lujittumisreaktioiden käynnistämiseksi. Lujittuvien uusiomateriaalien sitoutumisreaktiot on havaittu kantavuuden kehittymisenä ja pitkäaikaistutkimuksissa porattujen näytteiden puristuslujuuden kasvuna. Sideainetta on lisätty 2-7 % (esim. lentotuhkilla riippuen tuhkan laadusta) stabiloitavan uusiomateriaalin kuivamassasta laskettuna. Sideaineen %-määrää tarkasteltaessa ja verrattaessa luonnon kiviaineksen stabiloinnissa käytettävään sideainemäärään on huomattava, että stabiloitavan uusiomateriaalien kuivatilavuuspaino on yleensä selvästi alhaisempi kuin luonnon kiviaineksella, jolloin sideaineen %-osuus runkoaineen kuivamassasta muodostuu suureksi.

Sidotun kantavan kerroksen suunnittelussa ja rakentamisessa tulee huomioida päällysrakenteen stabilointia koskeva ohjeistus (*Päällysrakenteen stabilointi 2007*) sekä materiaaliseoksen tiivistettävyyttä koskevat havainnot, jotka on kuvattu yksityiskohtaisemmin kappaleessa 3.4.2.

Kun luonnonkiviaines stabiloidaan pienellä sideainemäärällä, ei seoksen lämmönjohtavuus juurikaan muutu. Tuhkilla lämmönjohtavuus on alhaisempi kuin luonnonkiviaineksilla, jolloin niitä voidaan oikein käytettynä hyödyntää päällystai pengerrakenteessa eristävänä kerroksena. Eristävä kerros saattaa kasvattaa jonkin verran päällysteen kuuraliukkausriskiä, kuten on havaittu mm. kohteissa Yt 14795 ja Yt 11146 (taulukko 46), joissa lämpöä eristävän kerroksen yläpuolisten murske- ja asfalttikerrosten yhteispaksuus on ollut ≤ 300 mm.

Taulukossa 47 esitettyjen seurantatutkimusten perusteella voidaan todeta, että ko. kohteessa kaupallisen sideaineen avulla ei ole saavutettu merkittävää teknistä etua lentotuhkarakenteen käyttäytymiseen. Tässä esitellyistä materiaaleista stabiloitu teräskuona on urautumiseen perustuvan arvion perusteella toiminut kohteella parhaiten.

Taulukko 42. Stabiloitu rikastushiekka, lentotuhka, lentotuhka + kuitusavi tai lentotuhka + pohjatuhka kantavassa kerroksessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde	Yt 14795 Vihtola - Jäkkö (Lappeenranta, 2007)	Yt 11146 Degerby - Tyris (Inkoo, 2000)	Mt 272 Ämttöö - Poikeljärvi (Pori, 1997)	
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy	Leventäminen, perusparantaminen	Perusparantaminen	Uudisrakentaminen	
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio	Välttävä , Jäykkä, laattamainen rakenne halkeillut pohjamaan routanousujen seurauksena.	Välttävä , Jäykkä, laattamainen kerros halkeillut pohjamaan routanousujen seurauksena. Liian kostea Stab. LT+KSa häiriintyi rakentamisen aikana.	Välttävä , Rakentamisessa käytetty routiva lentotuhka on ollut laadultaan erilainen kuin laboratoriotutkimuksissa käytetty routimaton tuhka.	
KVL (ajon./vrk)	436	509	1026	
Kantavuustavoite (MPa)	170 (5 AB)	ei tiedossa	265	
Rakenne	Päällystetyyppi	AB 20/120	PAB-V 16/100	AB 16/120
	Laakerikerros	Kyllä / 50 mm	Kyllä / 70 mm	Ei
	Kantava	Stab. RiHk+LT / 250 mm	Stab. LT / [Stab. LT+KSa] (/ 200 mm)	Stab. LT+PT / 200 mm
	Jakava	Sr / 250 mm	Olemassa olevan tien rakennekerrokset 700 - 1000 mm	Stab. LT+PT / 500 mm
	Suodatinkerros	Hk / 300 mm		PT / 300 mm
	Pengertäyttö	-		Leikkausosuuksien Mr
	Pohjamaa/alusrakenne	saSi/laSa	Sa	srMr-hkMr ja Kallio
	Stabiloinnin runkoaine	RiHk+LT (80:20)	LT tai LT+KSa (12:4)	LT+PT (40/60)
Stabiloinnin sideaine	YSe 4%	[RPT+Kalkki/ YSe (15+5 %)]/ [YSe+RPT (4,2:5, 17 %)]	YSe 6%	
Toimivuus	Päällystehalkeamat	-	--	-
	Urautuminen	-	ei tutkittu	ei tutkittu
	Kantavuus (MPa)	270-400	200-250	200-400
	Tasaisuus	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu.
	Kuivatus	ei tutkittu	--	+
	Takaisinlask. E-moduuli	ei määritetty	LT 130-300 MPa LT+KSa ei määritetty	800-1000 MPa
	Lujittuminen	-		-
Seurantatutkimukset	Ramboll 2008 b	Tarkkio 2014	Juvankoski & Kivikoski 2001	
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus	Pehmeä, routiva ja heikosti kantava pohjamaa	Olemassa olevat tierakennekerrokset toimineet hyvänä penkeenä sidottujen rakenteiden tiivistämiselle. Penger ja/tai pohjamaa routinut ja aiheuttanut sidotun tuhkarakenteen vaurioitumista	Pohjatuhkakerroksen päältä mitattu kantavuus ei ole riittävä sidottujen tuhkarakenteiden tiivistämisen kannalta, jolloin tiiveysasteet jääneet alhaisiksi	
Tehdyt korjaustoimenpiteet	Ei	Päällystys 2006	Päällystys 2006	
Huomiot:	Eristävällä kerroksella ei voitu ehkäistä routavaurioita, eristävyys vaikuttanut tien pinnan kuuraliukkauteen	Uusiomateriaalirakenteen lämmöneristyskyky vaikuttanut tien pinnan kuuraliukkauteen	Rakenteeseen tiivistetyn tuhkan tiheys suunniteltua alhaisempi. Lentotuhkakerrosten yhteispaksuus 700 mm	

RiHk = Kalkkikiven louhinnan sivukivestä murskattu hiekka

LT = Lentotuhka

KSa = Kuitusavi PT = Pohjatuhka

Taulukko 43. Stabiloitu lentotuhka ja teräskuona kantavassa kerroksessa. Yt 19552, toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Yt 19552 Yli-Liakka - Kourilehto (Tornio, 1999)		
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Kantavuuspuute, routiminen		
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Tyydyttävä, Routanousujen seurauksena halkeilleen stabiloidun rakenteen halkeamat heijastuneet päällysteeseen		Tyydyttävä, Päällysteessä deformaatio- ja vaurioita, jotka ovat todennäköisesti seurausta lentotuhkan lujuusominaisuuksien heikentymisestä
KVL (ajon. / vrk)		293		
Kantavuustavoite (MPa)		ei tiedossa		
Rakenne	Päällystetyyppi	PAB-V 16/100		
	Laakerikerros	Kyllä / 50 mm		
	Kantava	Stab. LT / 200 mm	Stab. TeKu / 200 mm	LT / 200 mm
	Jakava	Olemassa olevan tien rakennekerrokset 500 mm		
	Suodatinkerros			
	Pengertäyttö			
	Pohjamaa/alus-rakenne	Sa	Sa	Sa
	Stabiloinnin runkoaine	Lentotuhka	Teräskuona	Lentotuhka
	Stabiloinnin sideaine	YSe 4%	Rapidsementti + masuuni-kuonajauhe 1:2 (6%)	Ei erillistä sideainetta
Toimivuus	Päällystehalkeamat	-	-	+
	Urautuminen	+	+	+
	Kantavuus (MPa)	+	+	+
	Tasaisuus	ei mit.	ei mit.	ei mit.
	Kuivatus	-	-	-
	Takaisinlask. E-moduuli	ei mit.	ei mit.	ei mit.
	Lujittuminen	+	+	ei mit.
Seurantatutkimukset	Ramboll 2008 a			
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus	Alapuoliset rakenteet ovat olemassa olevia tien rakennekerroksia, joiden kantavuus on edesauttanut kantavan kerroksen tiivistämistä. Pohjamaan routiminen on aiheuttanut vaurioita päällysrakenteeseen.			
Tehdyt korjaustoimenpiteet	Ei			
Huomiot:				

LT = Lentotuhka

TeKu = Teräskuona

2000-luvun alussa tehtiin tutkimustyötä kuitusaven käytöstä tuhalla seostettuna ja stabiloituna materiaalina päällystetyn ja päällystämättömän tien päällysrakenteessa. Kokemukset ovat vaihdelleet ja tässä selvityksessä tehtyjen havaintojen perusteella kuitusavea ei suositella käytettäväksi tien päällysrakenteessa. Kokemukset ovat kuitenkin hyödynnettävissä tulevaisuuden kehitystyössä, kun selvitetään heikkolaatuisten uusiomateriaalien jalostusmahdollisuuksia maarakennuskäyttöön.

3.2.2 Stabiloitu kantava kerros

Taulukoissa 48, 49 ja 50 on esitetty yhteenvedot rakennuskohteista, joissa kantavan kiviaineskerroksen stabilointi on tehty uusiomateriaalilla.

InfraRYL:ssä on esitetty yksityiskohtaiset vaatimukset tierakenteen stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineen (kiviaines) rakeisuudelle ("213212 Sementtistabilointi"). InfraRYL:ssä esitetystä rakeisuuden ohjealueesta poikkeavien runkoaineiden ja erityisesti runsaasti hienoainesta sisältävien runkoaineiden stabiloinnissa voidaan joutua käyttämään paljon side- ja seosaineita, jotta materiaaliseos saavuttaa riittävät tekniset ominaisuudet (lujuus, routimattomuus, rasituskestävyys). Stabiloidun kantavan kerroksen (stabiloitu murske) rakentamista varten pohjamaan/alusrakenteen kantavuus tulee olla riittävän suuri toimiakseen stabiloidun kerroksen asianmukaisena tiivistämisalustana. Kohteessa Yt 11146 alusrakenteen kantavuus oli riittämätön, joten stabiloitu kerros jäi tavoitetta löyhemmäksi ja rikkonaiseksi, jolloin se ei lujittunut suunnitellusti. Tämä havaittiin rakennenäytteenotossa.

Tiivistämisen jälkeen tulee alusrakenteen olla riittävän jäykkä tukemaan hydraulisella sideaineella stabiloitua jäykkää kerrosta käytön aikana. Esimerkiksi kohteen Yt 14547 kevään kantavuusmittauksista on laskettu alusrakenteen jäykkyyttä kuvaavalle BCI-indeksille heikko arvo eli alusrakenne on liian joustava. Alusrakenteen joustavuus kasvattaa jäykäksi stabiloituun kantavaan kerrokseen kohdistuvia vetojännityksiä, jotka voivat vaurioittaa stabiloitua kerrosta.

Hydraulisesti sidotuilta päällysrakenteilta mitatut kantavuudet ovat olleet suurempia, kuin vertailurakenteina toimivilla luonnon maa- ja kiviainesrakenteilla. Kantavuusmittaustuloksissa esiintyy kuitenkin usein huomattavaa vaihtelua saman rakenteen eri mittauspisteiden välillä. Tämän voidaan arvioida johtuvan stabiloidun materiaalin vaihtelevasta lujittumisesta. Kantavuusmittaustuloksissa esiintyvä suuri vaihtelu ei ole tässä selvityksessä tarkasteltujen stabiloitujen murskerakenteiden toimintaan tai vaurioitumiseen vaikuttavista tekijöistä kriittisin, sillä suuresta vaihtelusta huolimatta ko. rakenteiden kantavuus ylittää vaatimukset selvästi.

Sementillä stabiloitu kerros kuivumiskutistuu lujittuessaan. Tämä aiheuttaa halkeamia sementillä sidotussa ja yläpuolisessa kerroksessa, mikäli rakenteeseen ei tehdä kuivumiskutistumahalkeamia keskittäviä liikuntasauvoja. Kaikissa tässä selvityksessä tutkituissa stabilointikohteissa havaittiin pituus- ja poikisuuntaisia halkeamia, jotka ovat sekä pohjamaan routanousujen että stabiloidussa kerroksessa tapahtuneiden muodonmuutosten aiheuttamia. Harjun (2017) mukaan kuivumiskutistumahalkeamien esiintymistiheys on verrannollinen murskeen stabiloinnissa käytetyn sideaineseoksen sementtipitoisuuden kanssa. Taulukossa 48 esitetyllä kohteella Yt 14547 havaittiin eniten kuivumiskutistumista aiheutuneita vaurioita.

Paksu ja luja stabiloitu kantava kerros ei ole tämän selvityksen perusteella ainoana rakenteen parantamistoimenpiteenä riittävä ehkäisemään pohjamaan/alusrakenteen epätasaisten routanousujen aiheuttamista vetojännityksistä syntyviä päällystevaurioita. Tämä havaittiin kohteiden Yt 14547 (taulukko 48) ja Yt 14800 (taulukko 49) routivan pohjamaan aiheuttamina pituussuuntaisina halkeamavaurioina.

Hydraulisilla sideaineilla stabiloitujen kantavien kerrosten suunnitellun laadun toteutumiseksi on oleellista huolehtia lujittumisen ja tiivistämisen kannalta optimaalisen vesipitoisuuden lisäksi rakentamisajankohdan ja sitä seuraavan ajanjakson riittävän suuresta lämpösummasta. Riittävä suuri lämpösumma voidaan arvioida toteutuvan, kun vuorokauden keskilämpötila on alkulujittumisen aikana alimmillaan +5 °C (Kiviniemi et al. 2012). Hydraulisesti sitoutuvien rakenteiden tulee saavuttaa riittävän suuri lujuustaso (rasituskestävyys) ennen rakentamista seuraavan syksyn ja talven jäätymis-sulamissyklejä.

Vuosaaren sataman stabiloidun kenttärakenteen kantavuus on säilynyt seurantatutkimuksissa hyvällä tasolla, ollen suurilta osin huomattavasti tavoitekantavuutta suurempi. Ko. rakenteessa stabiloidun kantavan kerroksen alla on riittävän paksut ja laadukkaat rakennekerrokset.

Taulukko 44. Stabiloitu kantava kerros, uusiomateriaaliseideainseoksella stabiloitu murske. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio. (Harju 2017, muokattu)

Kohde	Yt 11146 Degerby – Tyrís (Inkoo, 2000)	Kt 87 Rautavaara (Rautavaara, 2004)	Yt 14547 Teuroinen (2007, Elimäki)	
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy	Päällystevauriot, kantavuuspuute, reunapainumat	Kantavuuspuute, painumat, urautuminen, verkkohalkeilu	Painumat, urautuminen, päällystevauriot, kantavuuspuute	
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio	Välttävä , Heikko alusrakenteen kantavuus vaikeuttanut rakenteen tiivistämistä. Routivan pohjamaan routanousut vaurioittaneet jäykkää kantavaa kerrosta	Tyydyttävä , Stabiloinnin lujuus kehittynyt ajan myötä. Heikosti kuivatettu tierakenne routinut ja aiheuttanut vaurioita stabiloituun kerrokseen ja päällysteeseen.	Tyydyttävä , Stabiloinnin lujuus kehittynyt ajan myötä. Routiva alusrakenne aiheuttanut vaurioita stabiloituun kantavaan kerrokseen ja päällysteeseen.	
KVL (ajon. / vrk)	509	442	170	
Kantavuustavoite	125 MPa	290 MPa	204 / 243 MPa	
Rakenne	Päällystetyyppi	PAB-V 16/100	PAB 16/100	PAB 16/100 (AB plv. 7100-8100)
	Laakerikerros	Kyllä / 50 mm	Kyllä / 50 mm (vain. plv. 9550-9750)	Kyllä / 50 mm (vain. plv. 7100-8100)
	Kantava kerros	Stabiloitu 250 mm	Stabiloitu 250 / 300 mm	Stabiloitu 250 / 300 mm
	Kantavan kerroksen alapuoliset rakenteet	Olemassa olevan tien rakennekerrokset		
	Pohjamaa	Savi/Siltti	Moreeni	Savi
	Stabiloinnin sideaine	LT+RPT (kipsi) + YSe (1:1:1, 7 %)	Kipsi + LT + Masuunisem. (56:8,5:35,5, 12 %)	LT + YSe (80:20, 10,5 %)
	Stabiloinnin runkoaine	Heikkolaatuinen murske	Hyvälaatuinen murske	Hyvälaatuinen murske
	Tavoitelujuustaso	4,0 - 4,5 MPa	4,1 - 5,2 MPa	4 - 6 MPa
Toimivuus	Pituushalkeamat	-	-	-
	Poikkihalkeamat	-	-	+
	Pakkaskatkot	ei mit.	+	--
	Urautuminen	ei mit.	+	ei mit.
	Kantavuus	+++ 200-250 MPa	+++ 570 MPa	+++ 400 MPa
	Päällystevauriot	-	(+)	(-)
	Tasaisuus	-	-	++
	Painumat	-	+	+
	Päällysteen tartunta	-	-	--
	Kuivatus	-	--	-
	Lujuuskehitys	-	++	+++
Takaisinlaskettu E-moduuli	ei määritetty	2020 MPa	1230 MPa	
Seurantatutkimukset	Tarkio 2013, Harju 2017	Harju 2017	Harju 2017	
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus	Huonosti kantava routiva pohjamaa	Alemmat rakennekerroksen routivia ja puutteellisesti kuivatettu	Routiva pohjamaa aiheuttanut vaurioita	
Tehdyt korjaustoimenpiteet	Ei	Ei	Saumapaikkaukset	
Huomiot:		Puutteellinen kuivatus	Kutistumis- ja routahalkeamat	

LT = Lentotuhka

RPT = Rikinpoistolopputuote YSe = Ylissementti

Taulukko 45. Stabiloitu kantava kerros, uusiomateriaalisideainseoksella stabiloitu murske. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio. (Harju 2017, muokattu)

Kohde	Yt 14800 Hanhikemppi (2006, Lappeenranta)	Yt 16563 Seppola - Kaipola (Jämsä, 2010)	Yt 16573 Hiidenmäki - Vaheri (Jämsä, 2010)			
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy	Kantavuuspuute, päällystevauriot	Kantavuuspuute, routuminen, urautuminen	Kantavuuspuute, routuminen, urautuminen			
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio	Välttävä. Stabiloitun kerroksen lujuus jäänyt alhaiseksi. Heikosti kuivatettu ja ohut päällysrakenne vaurioitunut pohjamaan routimisen seurauksena	Hyvä. Stabiloitun kerroksen lujuus säilynyt hyvin. Päällysrakenteen toimiva kuivatus on tasannut routanousut ja stabiloituu kerrokseen kohdistuneet vetojännitykset. Jäykkä hydraulinen stabilointi estänyt päällysteen deformaatioauriot.	Hyvä. Stabiloitun kerroksen lujuus säilynyt hyvin. Päällysrakenteen toimiva kuivatus on tasannut routanousut ja stabiloituu kerrokseen kohdistuneet vetojännitykset. Jakavan kerroksen tuhkarakenne on toiminut suunnitellusti.			
KVL (ajon. / vrk)	236	1823	604			
Kantavuustavoite	170 MPa	420 MPa	Ei tiedossa			
Rakenne	Päällystetyyppi	AB 16/100	AB 22/120	AB 22/100		
	Laakerikerros	Ei	Ei	Ei		
	Kantava kerros	Stabiloitu 300 mm	Stabiloitu 250 mm	Stabiloitu 250 mm		
	Kantavan kerroksen alapuoliset rakenteet	Olemassa olevan tien rakennekerrokset	Olemassa olevan tien rakennekerrokset	Jakavan kerroksen LT / 300 mm		
	Pohjamaa	Moreeni, siltti/savi	Siltti	Siltti		
	Stabiloinnin sideaine	LT + YSe (7 % + 4 %)	LT + YSe (8 % + 3,5 %)	LT + YSe (7 % + 3 %)		
	Stabiloinnin runkoaine	Heikkolaatuinen murske	Hyvälaatuinen murske	Hyvälaatuinen murske		
	Tavoitelujuustaso	3 - 4 MPa	3,5 MPa	3,3 MPa		
Toimivuus	Pituushalkeamat	--	+	+		
	Poikkihalkeamat	+	+	+		
	Pakkaskatkot	--	-	-		
	Urautuminen	ei mit.	+++	+		
	Kantavuus	ei mit.	+++	600 MPa	+++	600 MPa
	Päällystevauriot					
	Tasaisuus	-	++	++		
	Painumat	-	++	+		
	Päällysteen tartunta	-	++	Bit.liimaus	-	
	Kuivatus	-	+	+		
	Lujuuskehitys	+	+	-		
Takaisinlaskettu E-moduuli	ei määritetty	1920 MPa	1440 MPa			
Seurantatutkimukset	Harju 2017	Harju 2017	Harju 2017			
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus	Routiva pohjamaa, ohuet rakennekerrokset aiheuttaneet vaurioita	Hyvin kuivatettu ja riittävän paksu alusrakenne mahdollistanut hyvän toimivuuden	Pääosin hyvin kuivatettu alusrakenne ja toimiva routaeristys			
Tehdyt korjaustoimenpiteet	Saumapaikkaukset	Ei	Ei			
Huomiot:	Stabiloinnin heikkolaatuinen runkoaine heikentänyt saavutettua lujuutta.	-	-			

LT = Lentotuhka

YSe = Yleissementti

Taulukko 46. Vuosaaren sataman stabiloidun kantavan kerroksen toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Vuosaaren satama (Helsinki, 2006)
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Uudisrakentaminen
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Hyvä , Rakenteen kantavuus yli tavoitteen. Kenttäalueelle rakennettu päällystepaksuus vain 50 mm (paikoin todettu vain 30 mm). Päällystevaurioita korjattu kolme vuotta rakentamisen jälkeen
Kantavuustavoite		470/550 MPa
Rakenne	Kulutuserkos	AB 20/125 (B50/70), 50 mm
	Kantava	Stabiloitu 200 / 250 mm
	Jakava	KaM 0/63, 100 mm
		KaM 0/150, 300 mm
	Alusrakenne	Merihiekka, 500 / 550 mm
	Stabiloinnin sideaine	(YSe 2% + KJ 2% + LT 4% + RPT 4%) 12 %
Toimivuus	Kantavuus (MPa)	244-900 MPa
		343-913 MPa
	Kuivatus	+
	Päällysteen tartunta	-
	Takaisinlaskettu E-moduuli	1300-3600 MPa
	Lujuuskehitys	-
Seurantatutkimukset		Tarkkio (2014)
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus		Kantava ja routimaton alusrakenne mahdollistanut stabiloidun kerroksen pitkäaikaiskestävyyden
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Päällystevaurioita korjattu 2009
Huomiot:		Rakennenäytekkappaleiden puristuslujuudet laskeneet seuranta-tutkimusten välisenä aikana. Stabiloidun kantavan kerroksen E-moduulin takaisinlaskennan (Tarkkio 2014) tuloksena saadut noin 7000 MPa:n moduuliarvot vaikuttavat epärealistisen suurilta. Rakennetutkimuksissa havaittu päällystepaksuus oli paikoin vain 30 mm (suunniteltu 50 mm).

YSe = Yleissementti

KJ = Masuunikuonajauhe

LT = Lentotuhka

RPT = Rikinpoistolopputuote

3.3 Jakavat kerrokset

3.3.1 Sitomaton jakava kerros

Sitomattomat jakavat kerrokset on esitetty InfraRYL:n kohdassa "21210 Jakavat kerrokset". Tässä selvityksessä tarkastellut sitomattomat jakavat kerrokset ovat taulukossa 51 esitettyjä kohteita, joissa on käytetty betonimurskettä ja OKTO-murskettä jakavassa kerroksessa. Betonimurskerakenteet ovat samoja kohteita kuin kantavan kerroksen betonimurskerakenteet. Kohteiden jakavan kerroksen betonimurske on myös toiminut moitteettomasti.

Kohteen Vt 4 routasyvyysmittaukset osoittivat teräskuonan (OKTO-kevytkiviaineksen) routaa eristävän vaikutuksen päällysrakenteen jakavassa kerroksessa. Rakenne on kestänyt dynaamista liikennekuormitusta vastaavalla tavalla kuin luonnon maa- ja kiviaineksestä koostuva päällysrakenne, mikä on arvioitu tässä selvityksessä PTM-mittausten IRI-tasaisuuden ja urasyvyyden perusteella.

Taulukko 47. Teräskuona ja betonimurske jakavassa kerroksessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde	Pirkkala, Lasikaari, 2000	Vt4 Tervolan massanvaihto (Keminmaa, 2005)	Tampere, Lahdenperäncatu, 1996	
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy	Uusi katu	Heikkolaatuisten mas-sojen vaihto, routiminen	Perusparannus	
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio	Hyvä, rakenne toiminut suunnitellulla tavalla	Hyvä, rakenne toiminut suunnitellulla tavalla	Hyvä, rakenne toiminut suunnitellulla tavalla	
KVL (ajon./vrk)	Ei tiedossa	3273	Ei tiedossa	
Kantavuustavoite	Ei tiedossa			
Rakenne	Päällyste	60 mm AB	AB 16 B100/150	AB 170 mm
	Kantava	KaM / 50	SrM 0/56 / 400 mm	KaM / 100 mm
	Jakava	BeM II / 800	TeKu 0/32 / 700 mm	BeM / 220 mm
	Suodatinkerros	Ei tiedossa	TeKu 0/6 / 500 mm	-
	Pengertäyttö	-	-	Ei tiedossa
	Pohjamaa/alusrakenne	Ei tiedossa	Mr	Ei tiedossa
Toimivuus	Päällystehalkeamat	-	+	Ei mitattu
	Urautuminen	-	+	Ei mitattu
	Kantavuus (MPa)	+	350	400 - 500
	Tasaisuus	+	+	Ei tiedossa
	Kuivatus	Ei tiedossa	+	Ei tiedossa
	Takaisinlask. E-moduuli	300 - 400 MPa	Ei laskettu	290 - 600 MPa
	Lujittuminen	+	Ei lujittuva	+
Seurantatutkimukset	Dettenborn 2013	Ei tiedossa	Dettenborn 2013	
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus				
Tehdyt korjaustoimenpiteet	Ei tiedossa	Urapaikkaukset 2014 Uudelleenpäällystys 2015	Ei tiedossa	
Huomiot:				

BeM = Betonimurske

TeKu = Teräskuona (OKTO)

SrM = Soramurske

3.3.2 Sidottu jakava kerros

Sidottuja jakavia kerroksia ei ole esitetty InfraRYL:ssä. Periaatteessa ne sisältyvät kohtaan "21210.3.1 Kerroksen rakentaminen uusiomateriaaleista".

Tässä selvityksessä tarkastelluissa kohteissa sidotun jakavan kerroksen rakennemateriaalit on suhteitettu kokeellisesti laboratoriossa. Suhteituskokeissa on mallinnettu rakentamista muun muassa tiivistystyömäärän, sekoitustavan ja materiaalien käsittelyajan suhteen. Olennaista kokeellisessa suhteituksessa on rakennusolosuhteiden yhdistäminen materiaaliseoksen rasituskestävyyskokeisiin. Kohteen Mt272 Ämttö- Poikeljärvi stabiloitujen lento- ja pohjatuhkarakenteiden suhteituskokeissa käytetty tuhkamateriaali poikkesi laadultaan rakentamisessa käytetystä tuhkaista. Tämä vaikutti merkittävästi materiaaliseosten lujittumis-, tiivistymis- ja rasituskestävyysominaisuuksiin (taulukko 52).

Rakennustietosäätiön julkaiseman ohjekortin perusteella, lentotuhka voidaan luokitella ominaisuuksiensa perusteella käyttöluokkiin LT I, II tai IV, minkä perusteella voidaan arvioida ko. tuhkan soveltuvuus eri rakennusosiin (Infra 062-710191 2018). Kohteen Mt 272 rakentamista koskevien raporttien perusteella kohteessa käytetty lentotuhka sijoittuu käyttöluokkaan LT IV ja ei siten soveltuisi

ko. luokitusten perusteella käytettäväksi tien kantavassa tai jakavassa kerroksessa. Kohteessa Yt 16573 jakavan kerroksen lentotuhka on toiminut stabiloitua kantavaa kerrosta tukevana kerroksena ja routaeristeenä ehkäisten stabiloidun kantavan kerroksen ja päällysteen halkeilua.

Taulukko 48. Stabiloitu lentotuhka jakavassa kerroksessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde	Mt 272 Ämttöö – Poikeljärvi (Pori, 1997)	Yt 16573 Hiidenmäki – Vaheri (Jämsä, 2010)	
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy	Uudisrakentaminen	Kantavuuspuute, routiminen, urautuminen	
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio	Välttävä , Rakentamisessa käytetty lentotuhka oli laadultaan erilainen kuin laboratoriotutkimuksissa käytetty tuhka. Rakentamisessa käytetty tuhka oli routivaa.	Hyvä , Stabiloidun kerroksen lujuus säilynyt hyvin. Päällysrakenteen toimiva kuivatus on tasannut routanousut ja stabiloituu kerrokseen kohdistuneet ve-tojännitykset. Jakavan kerroksen tuhkarakenne on toiminut suunnitellusti	
KVL (ajon./vrk)	1026	604	
Kantavuustavoite	265 MPa	Ei tiedossa	
Rakenne	Päällystetyyppi	AB 16/120	AB 12/100
	Kantava	BST / 150 mm	Stabiloitu kantava kerros / 250 mm
	Jakava	Stab. LT / 500 mm	LT / 300 mm
	Suodatinkerros	Hk / 300 mm	Olemassa olevan tien rakennekerrokset
	Pengertäyttö/Kevenys	Leikkausosuuksien Mr	-
	Pohjamaa/alusrakenne	srMr-hkMr ja Kallio	Mr / Si
	Stabiloinnin runkoaine	LT	-
	Stabiloinnin sideaine	YSe 6%	-
	Toimivuus	Päällystehalkeamat	--
Urautuminen		Ei tiedossa	+
Kantavuus (MPa)		200-400	+
Tasaisuus		Ei tiedossa	+
Kuivatus		+	+
Takaisinlask. E-moduuli		ei määritetty	ei määritetty
Lujittuminen		-	Ei tutkittu
Seurantatutkimukset	Juvankoski & Kivikoski 2001	Harju 2017, Tarkkio 2014, Kiviniemi 2010-12	
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus	Jyrkkäluiskaisella osuudella alusrakenne/penger ei kantanut riittävän hyvin tiivistystyön aikana, mikä vaikeutti tuhkarakenteen tiivistämistä. Tiepohja petti pl 700-780, jolloin tuhkan tiivistäminen jäi vajaaksi.	Pääosin hyvin kuivatettu alusrakenne. Kantava alusrakenne helpottanut tuhkan tiivistämistä	
Tehdyt korjaustoimenpiteet	Uudelleenpäällystys 2006	Ei	
Huomiot:	Jyrkät luiskat	Käytetty tuhka kasavarastoidun ja tuoreen tuhkan seos. Seoksella hyvä itselujittuminen.	

LT = Lentotuhka

BST = Bitumistabilointi

YSe = Ylissementti

Tuhkarakenteiden lisäksi sidotun jakavan kerroksen rakenteena on tutkittu stabiloitua savea, masuunihiekkaa ja stabiloitua kuitusavea. Taulukossa 53 esitetyn Helsingin Tilanhoitajakaarteessa (Viikin savikatu) stabiloidun saven käyttö kadun tukikerroksessa on lisännyt tietämystä heikkolaatuisten kaivuumassojen hyötykäytöstä eri rakennusosissa. Ko. rakenteen seurannan yhteydessä on todettu rakenteen toimivan hyvin, kun se on suunniteltu ja mitoitettu oikein. Oleellista stabiloitujen heikkolaatuisten kaivuumassojen hyödyntämisessä eri rakennusosissa on huolehtia rakenteiden kuivatuksesta. Tilanhoitajankaarten rakentamista edeltävissä routanousukokeissa, stabiloitu savi oli luokiteltu lievästi-, keskinkertaisesti- tai erittäin routivaksi materiaaliksi riippuen stabiloinnissa käytetystä sideainemäärästä.

Taulukko 49. Masuunihiekka ja stabiloitu savi sekä stabiloitu lentotuhka+ kuitusavi jakavassa kerroksessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde	Parivaljakontie (Helsinki, 2001)	Yt 14795 Vihtola - Jätkö (Lappeenranta, 2007)	Viikin savikatu (Helsinki, 1997)	
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy	Perusparannus painumien takia	Leventäminen, perusparannus	Uudisrakentaminen	
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio	Tyydyttävä , Rakenteen painuminen pysähtynyt ja kantavuus parantunut. Painumattomat vesihuoltorakenteet aiheuttaneet päällystevaurioita.	Tyydyttävä , Päällystehalkeamat ja vertailurakennetta suuremmat IRI-tasaisuuden arvot	Tyydyttävä/Hyvä , Päällystevauriot	
KVL (ajon./vrk)	Ei tiedossa	436	Ei tiedossa	
Kantavuustavoite	350 MPa 2 kk ikäisenä	5 AB	Ei tiedossa	
Rakenne	Päällystetyyppi	AB, 160 mm	AB 20/120	
	Kantava	KaM 50 mm + BeM 100 mm	KaM / 300 mm	
	Jakava	MaHk 300 - 1000 mm	Stab. KSa + LT / 550 mm	Stab. Savi / 550 mm
	Suodatinkerros	Suodatinkangas	Sr/ 100mm + PT / 300 mm	Hk / 200 mm
	Pengertäyttö/Kevennys	KS / 550-700 mm RR2 / 250-600 mm	-	Sa+Pilaristabilointi
	Pohjamaa/alusrakenne	Sa	saSi/laSa	
	Stabiloinnin runkoaine	-	KSa+LT	lihaven savi
	Stabiloinnin sideaine	-	YSe 5,5 %	Se+CaO ym. 12 %
Toimivuus	Päällystehalkeamat	+	--	-
	Urautuminen	ei mitattu	+	ei mitattu
	Kantavuus (MPa)	350-450	ei mitattu	600-1000
	Tasaisuus	ei mitattu	--	ei mitattu
	Kuivatus	+	ei tiedossa	++
	Takaisinlask. E-moduuli	Esitetty raportissa Haatainen & Forsman 2002	ei mitattu	150-220 MPa
	Lujittuminen	+	ei mitattu	++
	Seurantatutkimukset	Forsman & Koivisto 2002	Ramboll 2008 b	Mäkelä et al. 2000
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus	Kevennykset ja päällystörakenteet toimineet suunnitellusti	Pehmeä, routiva ja heikosti kantava pohjamaa	Alapuolinen rakenne kuivattaa stabiloidun kerroksen	
Tehdyt korjaustoimenpiteet	Saumapaikkaukset	Ei	Päällystepaikkaukset	
Huomiot:				

MaHk = Masuunihiekka
BST = Bitumistabilointi

LT = Lentotuhka

KSa = Kuitusavi

3.4 Suodatinkerrokset

Pohjatuhkan lämmönjohtavuus on pienempi kuin luonnonhiekkalla. Vuonna 1982 rakennetun Helsingin Karpalontien pohjatuhkakerroksesta otettujen näytteiden rakeiden havaittiin hienontuneen, kun seulontatuloksia verrattiin ennen rakentamista tehtyihin rakeisuusmäärittämiin. Syiksi Karpalontien rakennuskohteessa tapahtuneelle pohjatuhkan hienonemismelle arvioitiin dynaaminen liikennekuormitus ja/tai rakenteen tiivistystyön aikana tapahtunut hienoneminen (Tamminen et al. 2000).

Pohjatuhkan kapillaarinen nousukorkeus voi joillakin tuhkalajitteilla olla jopa 0,7 m. Tämä tulee huomioida kohdekohtaisesti kuivatuksen suunnittelussa (Tuhkaohjekortti 2018). Pohjatuhkan hienonemisherkyydestä johtuen tiivistystyössä on pyrittävä välttämään täryn tai muun iskevän kuormituksen käyttöä. Pohjatuhkien ja leijupetihiekkojen laatu voi vaihdella voimalaitoskohtaisesti. Selvityksessä tarkastellut suodatinkerrosrakenteet on esitelty taulukossa 54.

Taulukko 50. Pohjatuhka ja teräskuona suodatinkerroksessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Yt 14795 Vihtola – Jätkö (Lappeenranta, 2007)	Mt 272 Ämttö – Poikeljärvi (Pori, 1997)	Vt4 Tervolan massanvaihto (Keminmaa, 2005)
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Leventäminen, perusparannus	Uudisrakentaminen	Parantaminen
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Tyydyttävä , Päällystehalkeamat ja vertailurakennetta suuremmat IRI-tasaisuuden arvot	Välttävä , Kohteen päällysteessä ja kantavassa kerroksessa on havaittu vaurioita, jotka eivät ole aiheutuneet suodatinkerroksessa käytetystä pohjatuhkasta.	Hyvä , rakenne toiminut suunnitellulla tavalla
KVL (ajon./vrk)		436	1026	3273
Kantavuustavoite		5 AB	265 MPa	Ei tiedossa
Rakenne	Päällystetyyppi	AB 20/120	AB 16/120	AB 16 B100/150
	Kantava	KaM / 300 mm	BST / 150 mm	Soramurske 0/56 / 400 mm
	Jakava	Stab. KSa / 550 mm	Stab. LT / 500 mm	TeKu 0/32 / 700 mm
	Suodatinkerros	Sr / 100 mm + PT / 300 mm	PT / 300 mm	TeKu 0/6 / 500 mm
	Pengertäyttö	-	Leikkausosuuksien Mr	-
	Pohjamaa/alusrakenne	saSi / laSa	srMr-hkMr ja Kallio	Mr
	Stabiloinnin runkoaine	KSa+LT	LT	-
	Stabiloinnin sideaine	YSe 5,5 %	YSe 6%	-
Toimivuus	Päällystehalkeamat	--	--	+
	Tasaisuus	-	ei mit.	+
	Kuivatus	Ei tiedossa	+	+
	Takaisinlask. E-moduuli	Ei määritetty	Ei määritetty	Ei määritetty
Seurantatutkimukset		Ei tiedossa	Juvankoski & Kivikoski 2001	Ei tiedossa
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus			ei vaikutusta suodatinkerrokseen	
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Ei	Uudelleenpäällystys 2006	Urapaikkaukset 2014 Uudelleenpäällystys 2015
Huomiot:				

PT = Pohjatuhka

KSa = Kuitusavi

TeKu = Teräskuona

BST = Bitumistabilointi

LT = Lentotuhka

3.5 Soratiet

Tässä selvityksessä tarkasteltujen sorateiden uusiomateriaalirakenteet ovat kaikki sidottuja ja niiden materiaalit, lujuus ja kerrospaksuus vaihtelevat. Näiden soratiekohteiden kokemukset on koottu taulukoihin 55, 56, 57 ja 58.

Lentotuhkien hyödyntämistä soratien päällysrakenteen sidottuna kerroksena on tutkittu useassa kohteessa. Kohteen Yt 11636 (taulukko 55) havaintojen perusteella soratiellä lentotuhkakerroksen päälle rakennettu 100 mm murskekerros ei ole riittävä. Murskekerroksen tulee olla paksumpi, jotta vesi pääsee poistumaan lentotuhkakerroksen päältä sivuille. Tuhkarakenteiden pinnan pehmenemistä havaittiin keväällä erityisen haitallisesti sellaisilla osuuksilla, joissa tuhkerakenteiden päällä oli vain sorapinta sekä sorasirote+bitumiemulsio. Murskekerroksen suojaava vaikutus korostuu syksyn/talven jäätymis-sulamis-sykliden aikana, jolloin sidotun lehtotuhkakerroksen yläpinnassa tapahtuu toistuvaa jäätymistä ja sulamista. Sementillä stabiloidun lentotuhkakerroksen on havaittu toimineen kohteessa Yt 11636 stabiloimattomia LT+RPT-kerroksia paremmin.

Sorateilla liikenteen kuormituskertojen määrät ovat pienempiä kuin päällystetyillä teillä. Siksi laboratorioissa suhteitettuna stabiloidun uusiomateriaalikerroksen tavoitelujuus on em. kohteissa ollut usein alhaisempi. Sorateilla stabiloitujen kerrosten päällä ei ole asfalttikerrosta tasoittamassa pistemäistä rengas-kuormitusta. Sorateiden rakenteisiin kohdistuu myös voimakkaampi ilmastorasitus kuin päällystetyillä teillä, joissa sadeveden suotautuminen päällysteen läpi on vähäistä. Tämä on vaikuttanut stabiloituihin rakenteisiin käytön aikana kohdistuneisiin kuormituksiin ja aiheuttanut niiden lujuuden heikkenemistä. Ilmatorasitusten kestämisestä soratien yläosaan sijoitettavan sidotun materiaalin riittävä jäätymis-sulamiskestävyys on varmistettava kokeellisen suhteituksen perusteella.

Huonosti vettä läpäisevän kerroksen sijoittaminen soratien päällysrakenteen kulutuskerroksen alapuolelle edellyttää riittävää sivukaltevuutta pintakelirikon ehkäisemiseksi. Kohteessa Mt 5341 (taulukko 56) esiintyneen pintakelirikon arvioitiin olevan juuri tästä syystä voimakkaampi kuin vettä läpäisevän luonnonkiviaineksestä toteutetun päällysrakenteen tapauksessa. Kohteessa Mt 5341 käytetty biopolton lentotuhka lujittui erittäin voimakkaasti, mikä havaitaan seurantatutkimuksissa porattujen rakennäytteiden puristuslujuudesta (jopa yli 10 MPa).

Tarkkion (2014) selvityksen perusteella tuhkarakenteet kuivattavat sen päälle asennettua pintakerrosta. Kuivattava vaikutus voi olla peräisin lentotuhkakerroksen alhaisesta vedenläpäisevyydestä. Soratien päällysrakenteen yläosassa huonosti vettä läpäisevä kerros voi aiheuttaa sen, että sitomattomaan kulutuskerrokseen ei ole mahdollista kulkeutua riittävästi kosteutta sen alapuolisista rakenteista. Tämä voi aiheuttaa sorapinta-alueilla kulutuskerroksen pölyämisiongelmiä sekä liikennekuormituksen vaikutuksesta aiheutuvaa kulutuskerroksen kulkeutumista tien reunaan ja ojiin. Edellä mainittua ongelmaa voi korostaa sitomattoman kulutuskerroksen huono tartunta lujaan laattamaisen stabiloidun kerroksen pintaan.

Suotokakun käytön avulla voidaan kasvattaa sorateiden pintamurskekerroksen hienoainespitoisuutta ja sen sisältämä suola voi vähentää pölynsidontatarvetta. Mt 3201 kohteella suotokakkua sisältänyt kulutuskerros kuitenkin kuivui liikaa ja oli toisaalta keväällä aikaisempaa kuraisempi.

Tuhkamursketie -tutkimuksissa (taulukko 56) todettiin, että kaikilla tuhkamursketeillä kantavuustulokset olivat parempia kuin vastaavilla sorateilla. Tulosten perusteella paras kantavuus on sellaisilla tuhkamursketeillä, joissa on käytetty tuhkaa 15 painoprosenttia sekoitettuna rakeisuudeltaan 0/16 mm murskeeseen.

Taulukko 51. Yt 11636 soratiekohteen uusiomateriaalirakenteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Yt 11636 Knuters – Östersundom (Sipoo, 1997)					
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Tien linjauksen muuttaminen, perusparantaminen ja muuttaminen paikallistieksi					
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Välttävä, Tuhkakerroksen yläpinta pehmennyt liian ohuen kulutuskerroksen alla	Tyydyttävä, Stabi-loimattoman tuhkan lujuus jäänyt alhaiseksi ja heikentynyt ajan saatossa	Tyydyttävä, Lujuus alhainen, tuhkakerroksen yläpinta pehmennyt		Tyydyttävä, Tuhkakerros lujittunut alkuvaiheessa hyvin, lujuus laskenut ajan saatossa	Välttävä, Tuhkakerros pehmennyt liian ohuen kulutuskerroksen alla
KVL (ajon./vrk)		269 (ka.1997-1998)					
Kantavuustavoite		150 MPa					
Rakenne	Kulutuskerros	Sr 0-16 / 50 mm + Sr ja bitumiemulsio	Sr 0-16 / 50 mm + KaM 0/55 50 mm	Sr 0-16 / 50 mm		Sr 0-16 / 50 mm	Sr 0-16 / 50 mm + Sr ja bitumiemulsio
	Kantava	LT+RPT (75:25) / 600 mm		KaM / 100 mm		KaM / 100 mm	LT / 250 mm
	Jakava	KaM / 0-1900 mm		LT / 500 mm	LT / 800-1100 mm	LT / 150 mm	
	Suodatinkerros			KaM / 0-1400 mm		KaM / 500 mm	
	Pengertäytty			KaM / 0-600 mm			
	Pohjamaa/alusrakenne	Vaihtelee, kalliroleikkaus... > 5 m syvä savi					
	Stabiloinnin runkoaine	-		-		LT	
	Stabiloinnin sideaine	Ei erillistä sideainetta		Ei erillistä sideainetta		Sementti 5 %	
Toimivuus	Kantavuus (MPa)	164-254		105-142		151-201	
	Kuivatus	-		-		-	
	Takaisinlask. E-moduuli	400-700 MPa		350-450 MPa		280-320 MPa	
	Lujittuminen	-		-		-	
Seurantatutkimukset		Hautalahti et al. 2003					
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus		Kulutuskerroksen sekä kantavan kerroksen yläosan paksuus vaikuttanut pintakelirikon muodostumiseen. Suositus vähintään 150 mm:n paksuinen murskekerros tuhkan päällä					
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Lisämurskeen ajaminen keväällä 2001, Kohde päällystetty (AB) 2012					
Huomiot:							

LT = Lentotuhka

RPT = Rikinpoistolopputuote

Taulukko 52. Soratien uusiomateriaalirakenteet, tuhka+murske -kulutuskerros, tuhka-sementti -sideaineella stabiloitu kantava kerros sekä stabiloitu lentotuhka ja lentotuhka+rikinpoistotuote kantavassa kerroksessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Tuhkamursketie (2011, Karstula)	Mt 5341 Mustinsalo - Sar- kalahti, Leppävirta 2002		Yt 14567 Metsäkulmantie, Koria 1998		
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Peruskorjaus ja tutkimuskohde	Heikko kantavuus, routiminen ja urautuminen		Heikko kevät- ja reunakantavuus, rakennekerrosten sekoittuminen pohjamaahan		
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Hyvä, tuhkan käyttö parantanut kantavuutta	Hyvä, erityisesti tien kantavuus parantunut	Tyydyttävä, Tuhkerroksen mursketta alhaisempi vedellä läpäisevyys kasvattanut pintakelirikon esiintymistä	Hyvä, Tuhkarakenteet parantaneet tien kantavuutta		
KVL (ajon./vrk)		-	126 (KVLRAS 14)		Ei tiedossa	Ei tiedossa	
Kantavuustavoite (MPa)		60-70	Sr 80		Ei tiedossa	Ei tiedossa	
Rakenne	Kulutuskerros	KaM+LT / 200 mm	KaM / 100 mm	KaM / 100 mm	KaM / 100-150	KaM / 100 mm	
	Kantava	Ojien kaivuutöissä muodostuneet leikkausmassat	Stab. KaM / 200 mm	Stab. LT / 200 mm	Stab. LT+RPT	LT / 200 mm	
	Jakava		Olemassa olevat tien rakennekerrokset		Olemassa olevat tien rakennekerrokset		
	Suodatinkerros						
	Pengertäytty						
	Pohjamaa/alusrakenne	Ei tiedossa	hkMr - siMr		Ei tiedossa	Ei tiedossa	
	Stabiloinnin runkoaine	KaM: 0/16, 0/31,5 ja 0/63 mm	Olemassa olevan tien murske	LT	LT+RPT (85:15)	LT	
Stabiloinnin sideaine	LT 0, 15, 30 ja 50 p-%	LT+YSe (2:1) 9 %	YSe 3%	CaO+YSe (1:1) 5 %	Ei sideainetta (reakt. tuhka)		
Toimivuus	Kantavuus (MPa)	70-223	300-500	240-400	160-250		
	Kuivatus	-	+	+	Ei tiedossa		
	Takaisinlask. E-moduuli	Ei määritetty	500-2500	250-1500	Ei määritetty		
	Lujittuminen	+	-	-			
Seurantatutkimukset		Joensuu & Vahanan 2013	Tarkkio 2014		Tarkkio 2014		
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus		Alusrakenteen vaikutus oleellinen	+	+	Ei tiedossa		
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Ei	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa		
Huomiot:		Hyvin kantavan alustan päälle tehty stabiloitu kerros on tiivistynyt ja lujittunut hyvin					

LT = Lentotuhka

RPT = Rikinpoistolopputuote YSe = Ylissementti

Kuitusaven käyttöä on tutkittu sorateilla sidottuna rakennekerroksena (taulukko 57). Soratiekohteiden kuitutuhkarakennenyhteistä määritettyä lujuuden heikkenemistä on havaittu taulukossa 57 esitettyjen rakennuskohteiden lisäksi aiemmin myös kohteella Yt 16569 (Jämsä), jota ei ole käsitelty tässä selvityksessä. Yt 16596 kuitutuhkarakenteen päällä oleva murskekerros oli vain 100 mm.

Taulukko 53. Stabiloitu kuitusavi+lentotuhka soratien jakavassa kerroksessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde	Yt 13791 Vt11 – Ala-Pinsiö (Nokia, 2012)	Kukkia – Circler, Pt 13981 (Pälkäne 2003)	
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy	Perusparantaminen, kelirikko	Heikko kantavuus, routiminen	
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio	Välttävä , Kuitutuhkarakenteen lujuusjäätynyt suunniteltua alhaisemmaksi. Kulutuskerroksen murske pehminee sateella ja sotkee ajoneuvoja.	Välttävä , Kuitutuhkarakenteen lujuusjäätynyt suunniteltua alhaisemmaksi	
KVL (ajon./vrk)	179	80 (KVLRAS 2)	
Kantavuustavoite (MPa)	Sr 80	Sr 80	
Rakenne	Kulutuskerros	KaM / 100 mm	KaM + SJ / 100
	Kantava	KaM / 150 mm	Stab. KSa / 200 mm
	Jakava	Stab. KSa / 200-250 mm	Olemassa olevat tien rakennekerrokset
	Suodatinkerros	Olemassa olevat tien rakennekerrokset	
	Pengertäytty	Olemassa olevat tien rakennekerrokset	
	Pohjamaa/alusrakenne	Mr - Sa/Si	
	Stabiloinnin runkoaine	KSa + LT	KSa + LT
	Stabiloinnin sideaine	YSe 7 %	YSe 6 %
Toimivuus	Kantavuus (MPa)	Ei mitattu	50-90
	Kuivatus	-	-
	Takaisinlaskettu E-moduuli	Ei määritetty	< 100 MPa
	Lujittuminen	-	-
Seurantatutkimukset	Mäkinen 2012, 2013 ja 2016	SCC 2004, Hyvönen 2013	
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus	+	-	
Tehdyt korjaustoimenpiteet	Ei tiedossa	Ei tiedossa	
Huomiot:	Sidotun rakenteen lujuuden alenema	Sidotun rakenteen lujuuden alenema	

SJ = Suotojäte

KSa = Kuitusavi

LT = Lentotuhka

Taulukko 54. Mt 3201 soratiekohteen stabiloidun kantavan kerroksen toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Kukkia – Circlet, Mt 3201 (Pälkäne 2002)
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Routiminen, Sivutuoterakenteiden testaaminen soratien perusparantamisessa
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Tyydyttävä, Stabiloitu murske tiivistynyt hyvin kantavalla alusrakenteella.
KVL (ajon./vrk)		80
Kantavuustavoite		Sr 80
Rakenne	Kulutuskerros	KaM+SJ / 50 mm ja KaM / 50 mm
	Kantava	Stab. KaM / 200 mm
	Jakava	Olemassa olevat tien rakennekerrokset
	Suodatinkerros	
	Pengertäyttö	
	Pohjamaa/alusrakenne	hkMr
	Stabiloinnin runkoaine	Olemassa olevan tierakenteen murske
	Stabiloinnin sideaine	LT + RPT + YSe (10 %) LT + YSe (10 %) LT + Finnstabi -sideaine (10 %)
Toimivuus	Kantavuus (MPa)	200-300
	Kuivatus	+
	Takaisinlask. E-moduuli	500-1000 MPa
	Lujittuminen	+
Seurantatutkimukset		SCC 2004, Tarkkio 2014
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus		+
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Kulutuskerroksen lisääminen
Huomiot:		Hyvin kantavan alustan päälle tehty stabiloitu kerros on tiivistynyt ja lujittunut hyvin. Rakentamisen jälkeen kulutuskerros kulkeutui luis-kiin. Suotojäte/murske seos ei toiminut täysin toivotusti, joten suotojäte/murske seossuhteessa arvioitiin olevan kehitystarvetta.

LT = Lentotuhka

RPT = Rikinpoistolopputuote YSe = Ylissementti

SJ = Suotojäte

3.6 Kevennysrakenteet

Parivaljakontien rengasrouhekevennyskerroksen rakentamisessa havaittiin, että rouheen palakoko ja sen poikkeamat vaikuttavat kerroksen tiivistämiseen sekä käytön aikaiseen tiivistymiseen. Ko. kohteessa oli rouheen RR1 (100x300 mm) seassa jopa kokonaisia renkaita. Kokemus on vuosituhatien alusta ja tuotteen tasalaatuisuus lienee tuon jälkeen kehittynyt. Joka tapauksessa rengasrouheen laatua on aiheellista seurata työmaalla ja varmistua toimitetun materiaalin laadusta. Parivaljakontien rakennuskohteella kevytsorakevennys ja rengasrouhekevennys ovat toimineet kevennystarkoituksessa toistensa veroisesti, pohjamaan painuman ollessa molemmilla rakenteilla lähestulkoon samansuuruinen.

Taulukko 55. Parivaljakontien kevytsora- ja rengasrouhekevennysrakenteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Parivaljakontie (Helsinki, 2001)
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Painuminen
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Tyydyttävä , Vuosi rakentamisen jälkeen rakenteen painuminen pysähtynyt ja kantavuus parantunut. Painumattomat vesihuolto-rakenteet ovat aiheuttaneet päällystevaurioita
KVL (ajon./vrk)		Ei tiedossa
Kantavuustavoite		350 MPa 2 kk ikäisenä
Rakenne	Kulutuskerros	AB, 160 mm
	Kantava	KaM 50 mm + BeM 100 mm
	Jakava	MaHk 300-1000 mm
	Suodatinkerros	Suodatinkangas
	Kevennys	KS / 550-700 mm RR / 250-600 mm (RR1 300 mm x 100 mm)
	Pohjamaa/alusrakenne	Sa
Toimivuus	Kantavuus (MPa)	350-450
	Kuivatus	+
	Takaisinlask. E-moduuli	Ei määritetty
	Lujittuminen	MaHk ja BeM lujittuneet rakenteessa
Seurantatutkimukset		Forsman & Koivisto 2002
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus		Kevennykset toimineet suunnitellusti
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Saumapaikkaukset
Huomiot:		Painuminen pysähtynyt vuosi rakentamisen jälkeen, päällysrakenteen kantavuus hyvä

KS = Kevytsora

RR = Rengasrouhe

MaHk = Masuunihiekka

BeM = Betonimurske

3.7 Pengerrakenteet, liikennekuormitetut

Routivista materiaaleista rakennettujen liikennekuormitettujen penkereiden toimintaa on tarkasteltu taulukossa 60 esitetyissä kohteissa.

Pengerrakenteiden toimivuuskokemusten perusteella voidaan todeta, että kun rakenteen kuivatus on suunniteltu riittävän hyvin, niin rakentamisessa käytettävä lähtökohtaisesti routiva materiaali ei välttämättä roudi haitallisesti ja aiheuta rakenteen vaurioitumista. Pengerrakenteissa materiaaliarve on usein suuri, jolloin vaihtoehtoisen rakennusmateriaalin käyttäminen on hyvin perusteltua.

Taulukko 56. Lentotuhka ja moreeni liikennekuormitetussa pengerrakenteessa. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Vt21 Kilpisjärvi, 1986	Mt 941 Posio, 2002	Vt19 Seinäjoki / Vt3 Laihia
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Rakenteen painumat	Rakenteen routiminen	Uudisrakenne
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Hyvä , Tierakenteen painuminen hidastunut	Tyydyttävä , Seosmoreenirakenteen routanousut suurempia kuin tavanomaisella massanvaihtorakenteella	Hyvä , Rakentaminen onnistunut suunnitellusti. Toteutettu rakenne täyttänyt sille asetetut vaatimukset.
KVL (ajon./vrk)		Ei tiedossa	609	Ei tiedossa
Kantavuustavoite (MPa)		Ei tiedossa	Ei tiedossa	Ei tiedossa
Rakenne	Kulutuskerros	Asfaltti	PAB / 40 mm	Ei tiedossa / ABK+AB+SMA
	Kantava	KaM / 150 mm	RST / 70 mm	Ei tiedossa / 150 mm
	Jakava	Sr / 450 mm	Sr / 300 mm	Ei tiedossa / 1000 mm
	Suodatinkerros	1) Moreeni / 2500 mm	Moreeni / 1400 mm+ Sr/Hk / 200 mm	Ei tiedossa / Ei
	Pengertäyttö	2) Moreeni / 1000 mm + Sr / 300 mm		LT (Sillan tulopenger)
	Pohjamaa/alusrakenne	1) Si/Tv 2) Levitetty tierakenne / 950 mm + Si	hkMr	Ei tiedossa
Rakennettavuus	Rakentamistavat	+	+	+
	Rakentamisajan-kohta	-	+	-/+
	Materiaalien käsittely	+	+	+
	Työtavat	+	+	+
Seurantatutkimukset		Saarelainen 2002, Korkiala-Tanttu et al. 2008	Korkiala-Tanttu et al. 2008	Ei tiedossa tai saatavilla
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus		Painuva pohjamaa	Routiva pohjamaa	Päällysrakennekerrokset mitoitettu riittävän paksuiksi
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Uudelleenpäällystys	Ei tiedossa	Ei tiedossa
Huomiot:		Painuminen hidastunut	Päällystevauriot vähentyneet	Työmaalle toimitettujen lentotuhkien vesipitoisuus säädettiin materiaalin toimittajan toimesta, ennen tuhkien toimittamista työmaalle. Osa tuhkarakentamisesta ajoittunut myöhään syksyllä, mikä ei ole suositeltavaa sateista aiheutuvasta laaturiskistä johtuen

LT = Lentotuhka

3.8 Pengerrakenteet, liikenne- kuormittamattomat

Liikennekuormittamattomia pengerrakenteita, joissa on hyödynnetty stabiloituja heikkolaatuisia massoja sekä tuhkia ja kuonia tarkasteltiin taulukossa 61 esitellyissä kohteissa. Lisäksi on tarkasteltu kohteita, joissa käytettiin kokonaisia renkaita meluvalleissa.

Sepänmäen meluvallin täytössä käytetty tuhkasideaineseoksilla stabiloitu ruoppausmassa (sedimentti Sa + ljSa) on saavuttanut allasstabiloinnissa lujuuden, joka on kestänyt hyvin lastauksen, siirron (Jätkäsaari – Malmi), purun ja rakentamisen ongelmitta. Valmiin yli 10 metriä korkean vallin päältä on tehty valvontakairauksia stabiloituun sedimenttikerrokseen. Kerroksen lujuuden on todettu olevan suurempi kuin se oli altaassa n. 1-12 kk lujittumisajan jälkeen. Edellinen sedimenttien allasstabilointi toteutettiin käyttäen sideaineena pelkkää sementtiä, jolloin saavutettu lujuus oli alhainen.

Perkkaan koirapuiston massastabilointikohteessa stabiloitiin pohjamaan pintaosa, jonka päälle rakennettiin penger stabiloidusta savesta. Penkereeseen stabiloitu savi oli peräisin viereisen katutyömaan massanvaihdosta. Perkkaan koirapuiston stabilointi onnistui tehtyjen tutkimusten perusteella hyvin. Ylijäämäsavien lyhyt kuljetusetäisyys sekä uusiomateriaalien käyttäminen massastabiloinnin sideaineena vähensi rakentamisen CO₂ -päästöjä.

Taulukko 57. Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloitu sedimentti ja leikkausmassa sekä lentotuhka, pohjatuhka ja jätteenpolton pohjakuona liikennekuormittamattoman penkereen täyttörakenteena. Kohteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Sepänmäen meluvalli (Helsinki, 2016)	Perkkaan koirapuisto (Espoo, 2012-2013)
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Hyvä , Onnistunut rakentaminen	Hyvä , Onnistunut rakentaminen
Kohde	Pohjamaa	kallio - moreeni	ljSa - Sa
	Kuivatus	+	Pintavalunta
Rakenne	Rakennusosa	Meluvalli, täyttö	Matala pengeri, täyttö
	Kerros- ja materiaalmäärä	30 000 m ³ stab.sedimentti (kokonaistilavuus >100 000 m ³)	13 000 m ³
	Käytetyt materiaalit	Stabiloitu sedimentti Sideaineet: C tai KC+LT ja/tai RPT:n seos tai pelkkä PKT (150 kg/m ³)	Stabiloitu hienorakeinen leikkausmassa Sideaineet: C+LT ja/tai RPT
Rakennettavuus	Rakentamistavat	+	+
	Rakentamisajankohta	+	+
	Materiaalien käsittely	+	+
	Työtavat	+	+
	Tasalaatuisuus	+	+
Seurantatutkimukset		Napari 2017	ABSOLIS-hanke
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus		päällä pintamaa ja kasvualusta	päällä puiston rakennekerroksen ja kasvualusta
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Ei	
Huomiot:		Onnistunut rakentaminen ja rakenteiden toimivuus	

LT = Lentotuhka

RPT = Rikinpoistolopputuote C = Sementti

KC = Kalkkisementtisideaine PKT = Palavan kiven tuhka

Kokonaiset renkaat:

Käytettäessä kokonaisia renkaita meluvallin täyttönä tai keventeenä, on suunnitelmissa ja toteutuksessa huomioitava rengastäytön kokoonpuristuminen rengaskerroksen ennakkokorotuksena. InfraRYL:n mukaan kokonaisten renkaiden tiivistyminen 0,7-1,0 metrin maataytön alla on 30-50 % rengaskerroksen alkuperäisestä paksuudesta. Tämä vastaa Vt 7 Porvoo-Koskenkylä -kohteessa Palon (2000) raportoimia havaintoja rengaskerroksen 30 % kokoonpuristumasta. Kohteessa rengaskerroksen yläpuolisen moreenitäytön paksuus oli 0,7 m.

Kohteen Kehä I (Espoon raja – Vihdintie) rengasmeluvallien rakentamisen yhteydessä havaittu rengaskerroksen kokoonpuristuma oli suunnitteluvaiheessa arvioitua selvästi suurempi. Osalla kohteen meluvallirakenteista oli käytetty rengasmateriaalin päällä lisäksi räjäytyssuojamattoja urakoitsijan ehdotuksesta (Torniainen 2017), mikä lisäsi samalla rengaskerroksen tilavuuspainoa. Rengaskevennyksen keveys perustuu renkaiden väliin jäävään ilmaan, joten toisiaan vasten ladottujen räjäytysmattojen tilavuuspaino on merkittävästi suurempi kuin kokonaisista renkaista tehdyllä kevennyksellä. Kohteessa käytettiin myös

erittäin suuria trukin yms. renkaita, joista tehdyn täytön tilavuuspainon suunnitelmanmukaisuus on syytä tarkistaa ennalta.

Kohteessa Vt 19 Seinäjoen itäinen ohikulkutie toteutettiin meluvalli, jossa oli täyttönä kokonaisia renkaita 900 tonnia. Urakoitsijan mukaan henkilöauton renkaiden levittäminen rakenteeseen oli helppoa. Rengasrakenne arvioitiin urakoitsijan mukaan riskirakenteeksi kerroksen kokoonpuristumien vuoksi. Renkaiden käyttöä meluvallirakenteessa oli vastustettu peläten tuhoeläinten pesimistä täytössä (Immonen 2017).

Paloviranomaisen näkemys kokonaisten renkaiden hyödyntämisestä meluvallirakenteessa on vaihdellut. Kohteessa Kehä I – Hämeenlinnanväylä edellytettiin rakennettavaksi palokatkoja rengastäyttöön 100 metrin välein. Muilla rakennuskohteilla palokatkoja ei tiedetä rakennetun rengastäyttöön. *Tien meluesteiden suunnitteluohjeessa* on esitetty periaatteet meluesteen palokattojen suunnitteluun.

3.9 Pohjamaan ja heikkolaatuisten rakennekerrosten stabilointi

Kiuruveden (Mt 959) ja Salahmin (Mt 5950) kohteiden perusteella (taulukko 62) voidaan todeta, että pohjamaan stabilointi vähentää rakenteen routanousua. Tehdyissä koekohteissa routanousu kasvoi vuosien kuluessa ja epäillään, että pohjamaan pintaan stabiloidut kerrokset eivät ole kestäneet toistuvia jäätymis-sulamissyklejä. Menetelmässä käytettävät materiaalit ja työmenetelmät vaativat jatkokehitystä sekä pitkäaikaisseurantaa.

Taulukko 58. Kiuruveden ja Salahmin kerrostabiloitujen alusrakenteiden toimivuuden kokonaisarvio.

Kohde		Kiuruvesi (1996)	Salahmi (1997)
Rakenteen parantamisen / rakentamisen syy		Routakorjaus, tien leventäminen	Routakorjaus, tien leventäminen
Toteutetun rakenteen toimivuuden kokonaisarvio		Välttävä , Stabiloidun kerroksen routanousu kasvanut seurantatutkimuksissa	Välttävä , Stabiloidun kerroksen routanousu kasvanut seurantatutkimuksissa
KVL (ajon./vrk)		400	400
Kantavuustavoite (MPa)		-	-
Rakenne	Kulutuskerros	PAB / 50 mm	PAB / 50 mm
	Kantava	KaM / 200 mm	KaM / 200 mm
	Jakava	Sr / 300 mm	Sr / 300 mm
	Suodatinkerros	400 mm	400 mm
	Pengertäyttö	-	-
	Pohjamaa/alusrakenne	Routivan alusrakenteen stabilointi / 500 ja 1000 mm	Routivan alusrakenteen stabilointi / 500-700 mm
	Stabiloinnin runkoaine	HkMr (27,8 % < 0,063 mm)	si – saSiMr
	Stabiloinnin sideaine	Sementti / 20, 40 ja 60 kg/m ²	Finnstabi-sideaine / 40,48 ja 56 kg/m ²
Seurantatutkimukset		Ahonen et al. 2004	Kivikoski 2004
Ylä- ja/tai alapuolisten rakennusosien vaikutus		Alusrakenteen sementtistabilointi parantanut tien kantavuutta	Stabiloinnilla ei saavutettu merkittävää teknistä etua pelkkään pohjamaan homogenisointiin nähden
Tehdyt korjaustoimenpiteet		Ei tiedossa	Ei tiedossa
Huomiot:		Seurannassa havaittu myös stabiloidun kerroksen routimista	Seurannassa havaittu stabiloidun kerroksen routimista

4 Johtopäätelmät ja jatkotutkimustarpeet

Selvityksessä tunnistettiin usean uusiomateriaalirakenteen potentiaali käytettäväksi päällys- ja pengerrakenteissa. Näiden rakenteiden ominaisuuksista ja toimivuudesta on saatu tutkittua tietoa koerakentamisen avulla. Selvityksen perusteella uusiomateriaalit toimivat päällys- ja pengerrakenteessa suunnitellulla tavalla, kun rakenteet on suunniteltu, mitoitettu ja toteutettu oikein. Tuotteistetuilla uusiomateriaaleilla toteutetuissa kohteissa havaittiin ongelmia vain silloin, kun jokin/jotkin edellä esitetyistä asioista ei toteutunut.

Luonnon maa- ja kiviaineksesta poikkeavilla materiaaleilla rakennettaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota rakentamisen laatuun koko tuotantoketjun aikana. Esimerkiksi laadultaan puutteellisen luonnon- tai uusiomateriaalin käyttäminen, puutteellinen tiivistäminen tai optimialueelta poikkeava vesipitoisuus aiheuttaa laadullisen riskin kaikessa maarakentamisessa. Sidottujen rakennekerrosten ja stabilointien tapauksissa puutteet edellä mainittujen noudattamisessa kasvattavat rakenteen vaurioitumisriskiä sekä heikentävät rakenteen pitkäaikaistoimivuutta herkemmin kuin perinteisten sitomattomien luonnon maa- ja kiviainesten tapauksissa. Riskin vähentämiseksi, kokeellisessa suhteituksessa on usein pyrittykin optimoimaan rakentamisessa käytettävä materiaaliseos sietämään mahdollisimman paljon vaihtelua esimerkiksi vesipitoisuudessa ja/tai tiiveysasteessa.

Hydraulisesti sidotuilla uusiomateriaalirakenteilla saavutetaan luonnon maa- ja kiviainesta parempi lämmöneristävyys, jota oikein hyödyntämällä voidaan rajoittaa roudan tunkeutumissyvyyttä rakenteessa. Hydraulisesti sidottujen rakenteiden E -moduulit ovat usein huomattavasti luonnon maa- ja kiviainesta suurempia, jolloin niiden avulla voidaan rakentaa suuren kantavuuden omaavia rakenteita. Hydraulisesti sidottu rakennekerros on kuitenkin jäykkänä kerroksena altis esimerkiksi epätasaisen routanousun aiheuttamille halkeamille, joiden on havaittu heijastuvan päällysteeseen, riippumatta siitä, että kuinka syvällä päällysrakenteessa rakennekerros on.

Suomessa 1990-luvulla tehdyissä maabetonirakenteissa havaittiin pakkaskatkoja sekä rapautumista liukkaudentorjunnassa käytetyn suolan vaikutuksesta. Tässä selvityksessä ei voitu yksiselitteisesti osoittaa, että suolavesi olisi heikentänyt tutkittujen rakennuskohteiden sidottujen uusiomateriaalirakenteiden sidoksia ja aiheuttanut näin ollen rakenteiden vaurioitumista vastaavilla mekanismeilla kuin maabetonirakenteiden tapauksessa. Myöskään hydraulisesti sitoutuvien uusiomateriaalirakenteiden suola-pakkaskestävyydestä ei ollut riittävästi tutkittua tietoa. Selvityksessä tarkastellut rakennuskohteet sijoittuvat pääasiassa alemmalle tieverkolle, jossa liukkaudentorjunnassa käytetään ensisijaisesti hiekoitusta ja tien pinnan karhennusta. Sitoutuvien, sidottujen ja stabiloitujen uusiomateriaalirakenteiden suola-pakkaskestävyyttä tulisikin jatkossa selvittää lisää laboratoriossa.

Sidottujen uusiomateriaalirakenteiden yhdistäminen sitomattomista materiaaleista rakennettujen rakennekerrosten kanssa kasvattaa jäykkyyseroja päällysrakenteessa. Hydraulisilla sideaineilla stabiloitujen jäykkien rakennekerrosmateriaalien sietämiä vetojännityksiä tulisi tutkia tarkemmin mallinnuksen ja laboratoriotutkimusten avulla ja näin ollen kehittää uusiomateriaalipäällysrakenteiden mitoitustapaa.

Osa tässä selvityksessä tarkastelluista alemman tieverkoston koerakennuskohteista on toteutettu tilaajan vaatimuksesta mahdollisimman kustannustehokkaasti, jolloin rakennepaksuudet ovat olleet usein ohuita. Osa näistä rakenteista onkin vaurioitunut roudan ja liikennekuormituksen vaikutuksesta vaikka kantavuus onkin säilynyt (suhteellisen) hyvänä. Hyvin routaa eristävillä uusiomateriaaleilla on mahdollista aikaansaada perinteisiä tierakenteita vähemmän routivia rakenteita, kunhan rakennepaksuudet ovat riittäviä ja kuivatus toimiva.

Tehtyjen tutkimusten perusteella lujittuvien uusiomateriaalien (kuten lentotuhkat, kipsit ja jauhettu masuunikuona) hyödyntäminen stabiloidun kantavan kerroksen sideaineseoksen osakomponenttina on hyvin tarkoituksenmukaista teknisten ominaisuuksien puolesta. Niillä toteutettujen rakenteiden on havaittu kestävän hyvin ilmasto- ja liikennesuhteita, silloin kun sideaineseokset on suhteitettu huolellisesti sekä rakenne suunniteltu, mitoitettu ja rakennettu oikein. Sovellus antaa mahdollisuuden säästää päällysteen kerrospaksuudessa ja koko rakenteen paksuudessa (routamitoitus huomioiden). Lisätutkimus eri rakennetyypeistä, niiden mitoitusparametreista sekä eri sideaineseoksilla saavutettavista ominaisuuksista (mm. kutistumisominaisuudet) sekä päällysteen tartunnasta stabiloituun kerrokseen ovat tarpeellisia.

Soratien kulutuskerroksen murskeen kosteuden sitomisominaisuuksien jalostamista kalsiumkloridipitoisella suotojätteellä on tutkittu muun muassa osassa tässä selvityksessä käsitellyissä soratiekohteissa. Kokemusten perusteella suotojäte+kalliomurskeseoksen seossuhdetta tulisi kehittää ja tutkia jatkossa lisää.

Lähteet

Ahlqvist, E., Jyrävä, H. & Lahtinen, P. 2000 Teollisuuden sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. Rakentaminen. Pt 11146, Inko.

Ahonen, M., Holappa, T., Huttunen, E. & Kivikoski, H. 2001. Mt 941 Männikkövaara, Kohderaportti TPPT 42. TPPT -tutkimusohjelma. Espoo. 55 s.

Ahonen, M., Holappa, T., Huttunen, E. & Kivikoski, H. 2004. MT 595 Kiuruvesi. Kohderaportti TPPT 35. TPPT -tutkimusohjelma. Espoo. 66 s.

Dettenborn, T., 2013. Betonimurskerakenteiden pitkäaikaistoimivuus. Aalto yliopisto. Diplomityö. 110 s.

Dettenborn, T., Forsman, J. & Korkiala-Tantt, L. 2014. Long-term behavior of crushed concrete in road structure. Proceedings of the 23rd European Young Geotechnical Engineers Conference. Barcelona, 2-5 September 2014 (Eds, Arroyo, M. & Gens, A.). 7-10. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona ISBN-10: 84-679-1036-2

Dettenborn, T., Forsman, J. and Korkiala-Tantt, L. 2015. Crushed concrete in road structures - two decades of experience. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials ISSN 1747-650X. DOI: 10.1680/jcoma.15.00005

Dettenborn, T. & Forsman, J. 2016. Sepänmäen meluvalli. Jätkäsaaren sedimenttien sijoittaminen meluvalliin. Laskentamuistio. Esikopio 19.2.2016. Ramboll Finland Oy. Espoo. 5 s.

Ehrola, E., 1977. Masuunikuonan käytöstä tierakenteissa. Oulun yliopisto. Tie- ja maarakennustekniikan laitos. Julkaisu 23. ISBN 951-42-0452-2

Forsman, J., Lindroos, N., Napari, M., Melander, M., Korkiala-Tantt, L. & Suominen, M. 2018. Utilization of mass stabilized surplus mud and clay as fill and embankment construction material in urban building. WASCON 2018, 10th International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials. June 6-8, 2018, Tampere, Finland

Forsman, J., 2016. Yt 11146 rakennuskohteen videodokumentointi. 10.9.2016.

Forsman, J., Lindroos, N. and Korkiala-Tantt, L. 2015. Three mass stabilization phases in the west harbor of Helsinki, Finland - geotechnical and environmental properties of mass stabilized dredged sediments as construction material. Deep mixing 2015 conference, 2.-5.6.2015, San Francisco. pp. 671-680

Forsman, J., Lindroos, N., Autiola, M., Hämäläinen, H. and Kreft-Burman, K. Ramboll Finland Oy. 2014. Pilot Construction Report 2013. Dog Park, Espoo, Perkaa. LIFE09 ENV/FI/575 ABSOILS.

Forsman, J., Kreft-Burman, K., Lindroos, N., Hämäläinen, H., Niutanen, V. & Lehtonen, K. 2013. Experiences of utilizing mass stabilised low-quality soils for infrastructure construction in the capital region of Finland – case ABSOILS project. The XXVIII International Baltic Road Conference, Vilna, Liettua, 26.-28.8.2013.

Forsman, J., Hautalahti, P. & Haatainen, M. 2002. Ekoinfra -projekti. Seurantamittaukset uusiomateriaalikohteissa: Jaanintie, Pansiontie, Turun satama ja Kyläsaari. SCC Viatek Oy. Espoo. 22 s.

Forman, J. & Koivisto, K. 2002. Ekoinfra -projekti. "Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikkörakentamisessa". Nurmijärvi, Haikala: Seurantamittausraportti. Raportti A2. SCC Viatek Oy. Espoo. 13 s.

Forman, J. & Koivisto, K. 2001. Ekoinfra -projekti. "Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikkörakentamisessa". Nurmijärvi, Haikala: Koerakentamisauditointi. Raportti A1. SCC Viatek Oy. Espoo. 10 s.

GTK, Geologian tutkimuskeskus, 2009. Vuosaaren satama on Suomen portti maailmalle. Geofoorumi 2/2009.

Haatainen, M., Hautalahti, P., Forsman, J., Maijala, A. & Koivisto, K. 2003. Paikallistie Pt 11636, plv 3200-3580, Sipoo. Tuhkakoerakenteet. Seurantamittausten loppuraportti. Seurantamittaustulokset 1997-2002. Tuhkat hyötykäyttöön -projekti. SCC Viatek Oy. 40 s.

Haatainen, M. & Forsman, J. 2001. Ekoinfra -projekti. "Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikkörakentamisessa". Parivaljakontie, Helsinki. Koerakentamisauditointi. Raportti B1. SCC Viatek Oy. Espoo. 21 s.

Harju, I., 2017 a. Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa. Oulun yliopisto. Diplomityö. 128 s.

Harju, I., 2017 b. Kt 87, Yt 14547, Yt 14800, Yt 16563 ja Yt 15673 rakennuskohteiden päällystevauriokartoitusvalokuvat ja videodokumentoinnit. 16. – 22.5.2017

Hautalahti, P., Forsman, J., Maijala, A., Haatainen, M. & Koivisto, K. 2003. Tuhkat hyötykäyttöön -projekti. Knuters-Östersundom yksityistien muuttaminen paikallistieksi PT 11636. Loppuraportti 15.1.2003.

Hietala, P., Jyrävä, H. & Lahtinen, P. 2008 a. LTY/Ecoroad. Pilottikohde: Teuroisten paikallistien 14547 kerrosstabilointi. Koerakenne: Vanhan päällysteen ja kantavan kerroksen stabilointi (tuhka-sementti-sideaine). Rakentaminen ja seuranta. Raportti. Ramboll Finland Oy. 45 s.

Hietala, P., Jyrävä, H. & Lahtinen, P. 2008 b. LTY/Ecoroad. Pilottikohde: Hanhikemпин yksityistie, kerrosstabilointi. Koerakenne: vanhan päällysrakenteen yläosan stabilointi (sideaineena sementti ja lentotuhka). Rakentaminen ja seuranta. Raportti. Ramboll Finland Oy. 45 s.

Hyvönen, I. 2014. Kuitutuhkan pitkäaikaistoimivuus teiden ja urheilukenttien päällysrakenteissa. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Immonen, S., 2017. Skanska Infra. Vt 19 Seinäjoen itäinen ohikulkutie, Rengonkylä-Nurmo. Uusiomateriaalien hyötykäyttö. Uusiomaarakentamisen erityisopintojakso, Tampereen teknillinen yliopisto ja Aalto yliopisto.

Infra 062-710191, 2018. Tuhkien käyttö maarakentamisessa. Metsä- ja energia-teollisuuden tuhkamateriaalit. Ohje. Rakennustietosäätiö RTS. 21 s.

ISCORD, 2007. Proceedings of the 8th International Symposium on Cold Region Development. Tampere, Finland 25.-27.9.2007. 743 s. Saatavissa: <http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/tra/iscord/proceedings/iscord2007.pdf>. [viitattu: 28.12.2017]

Joensuu, S. & Vanhanen, H. 2013. [verkkodokumentti] TuhkaTie -hankkeen tuloksia 2011-2013. Ympäristökelpoisuus asiantuntijaseminaari, YM. Saatavissa: <http://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/TuhkaTie-hankkeen%20tuloksia%202011-2013%20%E2%80%93%20Samuli%20Joensuu%20Tapio%209.12.2013.pdf>. [viitattu: 19.1.2018]

Jokinen, T., Jyrävä, H. & Lahtinen, P. 1999 Teollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttö tienrakentamisessa. Koerakentaminen. Pt 19552 / 01, Tornio. 20 s.

Jokinen, T., Hietala, P., Jyrävä, H. & Lahtinen, P. 2008 LTY. Ecoroad. Pilottikohde: Paikallistie 14795 Vihtola-Jäkkö koerakenteet: Rikastushiekka-tuhkarakenne (kantava kerros) – Kuitutuhkarakenne (jakava kerros). 49 s.

Juvankoski, M. & Kivikoski, H. 2001 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma. RA3 Koerakenteiden rakentamisen, seuranta ja tulokset. Kohderaportti: Mt 272 Ämttö, Kivihilituhkan käyttö tierakenteissa "Porin tuhkatie". 79 s.

Jyrävä, H., 2018. Diplomi-insinööri. Ramboll Finland Oy. Haastattelut.

Jyrävä, H., Ronkainen, M., Maijala, A., Lahtinen, P., Kilpeläinen, J. & Reinikainen, S-P. 2007 Ecoroad – Ecological utilization of industrial waste materials on road construction. Projektityhteenvedo. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 78 s. ISBN 978-952-214-502-4

Jyrävä, H. 2006 a. LTY, Ecoinfo II. Kuitutuhkan käyttö tierakentamisessa. Laboratoriotutkimukset. Tulosraportti. Ramboll Finland Oy. 30 s.

Jyrävä, H. 2006 b. LTY, Ecoinfo II. Rikastushiekka-tuhka seoksen käyttö tierakentamisessa. Laboratoriotutkimukset. Tulosraportti. Ramboll Finland Oy. 20 s.

Jyrävä, H. 2006 c. LTY, Ecoinfo II. KYVO:n lentotuhkan hyödyntäminen vanhan tierakenteen stabiloinnissa. Laboratoriotutkimukset. Tulosraportti. Ramboll Finland Oy. 22 s.

Jyrävä, H. 2004. Tieliikelaitos, Inkoon pilotti. Seurantatutkimukset 2000-2004. Yhteenvedoraportti. Ramboll. 33 s.

Kajander, T. 2014. Seospolttotuhkan käyttö metsäteissä. Kandidaatintyö. Rakennus- ja ympäristötekniikka, Aalto-yliopisto.

Kirvesniemi, S., Vänskä, M. & Loukonen, S. 2009. Tiesuunnitelmaselostus. Maantien 13791 Nokia-Pinsiö parantaminen, Nokia, Hämeenkyrö. Ramboll Finland Oy. Tampere. 11 s.

Kivikoski, H. 2004. Mt 5950 Salahmi. Kohderaportti TPPT 36. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994-2001. Espoo 24.5.2004. s 50.

Kiviniemi, O., Ronkainen, M. & Lahtinen, P. 2010 a. KES UUMA 2010. Kohteet 16563, 16573 ja 16583 -kerrostabilointi ja massiivituuhkarakenteiden työselitykset. Julkaisematon. Ramboll Finland Oy. 43 s.

Kiviniemi, O., Ronkainen, M. & Lahtinen, P. 2010 b. Keski-Suomen UUMA. Jämsän rakentamiskohteet 2010 b. Julkaisematon. Ramboll Finland Oy. 44 s.

Kiviniemi, O., Ronkainen, M. & Lahtinen, P. 2011. Keski-Suomen UUMA. Seuranta-tutkimukset 2011. Julkaisematon. Ramboll Finland Oy. 23 s.

Kiviniemi, O. & Ronkainen, M. 2012. Keski-Suomen UUMA. Seurantatutkimukset 2012. Julkaisematon. Ramboll Finland Oy. 26 s.

Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P. & Forsman, J. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja: energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. [verkkodokumentti]. Saatavissa: http://projektit.ramboll.fi/tuhkarakentaminen/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf. [viitattu 28.1.2018]

Koivisto, K. & Haatainen, M. 2002. Ekoinfra -projekti. "Uusiomateriaalit yhdyskuntien liikenneväylien pehmeikkörakentamisessa". Parivaljakontie, Helsinki. Seurantamittausraportti. Raportti B1.1. SCC Viatek Oy. 25 s.

Kousa, P. 2012. Sähköpostiviesti 17.7.2012. Rakennuttajainsinööri. Ramboll.

Korkiala-Tanttu, L., Juvankoski, M., Kivikoski, H., Eskola, P. & Kiviniemi, M. 2008. Moreeni tehokäyttöön! HUUMA, Heikkolaatuisten luonnonmateriaalien hyötykäytön tehostaminen infrarakentamisessa. Tutkimusraportti, VTT-R-07845-08. VTT. Espoo. 74 s. [verkkodokumentti]. Saatavissa: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/HUUMA_Final.pdf. [viitattu 27.1.2018]

Lahtinen P., Ronkainen M., Sikiö, J. 2007. Fly Ash and FGD as Stabilisation Binder Components for the Base Course. Case Vuosaari Harbour. Sixth International Conference on Sustainable Aggregates, Asphalt Technology and Pavement Engineering, 21-22.2.2007, Liverpool, UK.

Liikennevirasto, 2017. Tiestö- ja liikennetietopalvelut. Tierekisteri.

Liikennevirasto, 2016. Vaihtoehtoisia maarakennusmateriaaleja sisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 52/2016. Helsinki. 172 s. ISBN 978-952-317-340-8

Liikennevirasto, 2014. Liikenneviraston ympäristötoimintalinja. Liikenneviraston toimintalinjoja 1/2014. Helsinki. 35 s. ISBN 978-952-317-001-8

Liikennevirasto, 2011. Kevennysrakenteiden suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet 9.3.2011. Liikenneviraston ohjeita 5/2011. Helsinki. 39 s. ISBN 978-952-255-638-7

Liikennevirasto, 2010. Tien melusteiden suunnittelu. Helsinki. 87 s. ISBN 978-952-255-9

Lummi, T., Uimarihuhta, H., Tolvanen, H., Muotio, S., ja Grims, P. 2015. Kevyen liikenteen väylän rakentamisen laadunvalvonnan loppuraportti. Ramboll Finland Oy. 10 s.

Länsi- ja Sisä-Suomen Aluehallintovirasto LSSAVI, 2014. Voimalaitostuhkan hyötykäyttö kevyenliikenteen väylässä välillä Lövä-Sandsund, ympäristöluvan muuttaminen, Pedersöre. Dnro: LSSAVI/181/04.08/2013. Saatavilla: <https://tietopalvelu.ahtp.fi/Lupa/>

Mäkelä, H., Höynälä, H., Halkola, H. & Kettunen, A., 2000. Viikin savikatu. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Julkaisu 81/200. Helsinki. 61 s. ISBN 951-718-521-9

Mäkinen, A. 2017. Pinsiöntie, Mt 13791. Kuitutuhkarakenteen rakentamisen jälkeiset tutkimukset ja havainnot Pinsiöntiestä. Ramboll Finland Oy. 12 s.

Mäkinen, A. 2014. Seinäjoen itäisen ohikulkutien tuhkapengerrakentaminen. Videoaineisto.

Mäkinen, A. & Ronkainen, M. 2013. Uusiomateriaalirakenne. Koerakentamisen seuranta- ja laadunvalvontaraportti. Ramboll Finland Oy. Luopioinen. 16 s.

Niemelin, T., Ronkainen, M., Kreft-Burman, K., Forsman, J., & Suominen, M., 2015. Streamlined Life Cycle Case Studies: Utilising Surplus Soils in Civil Engineering Applications in Three Different Pilot Cases. WASCON 2015 – Santander, Spain, 10–12 June 2015.

Nousiainen, A. 2003. Tieliikelaitos. Yt 11146 vauriokartoitus 8.5.2003. [sähköpositiivisesti]

Nygård, F-E. 2017. Skanska Infra Oy. Vt3-18 parantaminen Laihian kohdalla. Voimalaitostuhkan vastaanottaminen. Loppuraportti. 12 s. Julkaisematon.

Outokumpu 20xx. Outokumpu Tornio Worksin terässulaton kivituohteiden käyttö tie-, katu- ja maarakenteissa. Esite. 36 s. (esitteen laatimivuotta ei ole esitetty)

Palo, S. 2000. Käytettyjen kokonaisten autonrenkaiden käyttö meluvallissa. Hämeen ammattikorkeakoulu. Insinööriyö. 54 s.

Pyykkö, L. & Lindroos, N. 2015. Jätkäsaari, stabiloidut ruoppausmassat jätkä III. Hyötykäyttö- ja kaatopaikkakelpoisuuslausunto. Ramboll Finland Oy. Luopioinen. 11 s.

Ramboll & Tiehallinto, 2005. LIFE02 ENV/FIN329. Kukkia Circlet pilot 2002 ja 2003, tekninen seuranta. Seurannan loppuraportti 2004. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://projektit.ramboll.fi/luopioinen/life/pdf/julkaisut/sloppuraport.pdf>. [viitattu 2.7.2018]

Ramboll, 2014. Maantien 741 parantaminen rakentamalla kevyen liikenteen väylän välille Lövä-Sandsund, Pedersöre. Ymp. Rakennussuunnitelma, tyyppipoik-kileikkaukset.

Ramboll, 2008 a. PT 19552/01/1450-1550, 1650-1800 ja 1900-2050 Yli-Liakka-Kourilehto (Tornio). Lentotuhka ja teräskuona massiivirakenteissa. 20 s.

Ramboll 2008 b Pt 14790/500-900 ja 1725-2000 Vihtola - Jäkkö (Lappeenranta). Rikastushiekka+lentotuhka ja kuitutuhka, massiivirakenteet. 25 s.

Ramboll 2008 c Pt 16207 /01/30-1700 ja 3600-5240 Käänninniementie (Maaninka). Fosfokipsi ja lentotuhka; massiivirakenteessa ja kerrosstabiloinnin sideaineena. 13 s.

Ramboll 2008 d Pt 14567/01/1000-1500 ja 1500-2550 Metsäkulma (Koria). Lentotuhka massiivirakenteissa. 21 s.

Ramboll 2008 e Pt 16569/01/1340-2890 Tyryntie (Jämsä). Kuitutuhka massiivirakenteessa. 17 s.

Ramboll, 2004. Selvitys vt4/vt8-liittymässä (Haaransilta-Kiviniemi) käytetyissä betonimurske ja masuunihiekkarakenteissa havaittujen vaurioiden syistä. Kantavuusmittaukset 2004. 7.9.2004

Rakennustieto, 2017. InfraRYL 2017. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset.

Ronkainen, M., Jyrävä, H. & Lahtinen, P. 2011 13791 Nokia-Pinsiöntie, kuitutuhkarakenne, pilottirakentaminen. 20 s.

Ronkainen, M. & Sikiö, J. 2007. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysrakenteet. Koerakentamisraportti. Ramboll Finland Oy. 23 s.

Ronkainen, M. & Sikiö, J. 2009. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysrakenteet. Jatkotutkimukset. Ramboll Finland Oy. 6 s.

Saarelainen, S. 2002. Arktinen tie -tutkimusohjelma 1985-1990. Seuranta- ja lopuraportti. Tiehallinnon selvityksiä 21/2002. Helsinki. 76 s. ISBN 951-726-895-5

Saarelainen, S. 1993. Arktinen tierakentaminen. Kilpisjärven hankkeen yhteen-veto. Tielaitoksen tutkimuksia 5/1993. Helsinki. 62 s. ISBN 951-47-6851-5

Salmenkaita, S. & Tikkakoski, A. 2006. OSTo koerakenteet 2005. Tieliikelaitos, Pohjois-Suomen alue. Muokattu raportti. 13 s.

SCC Viatek Oy, 2001. Teollisuuden sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. Uudemaan pilot-hanke. Laboratoriotutkimukset, tekniset ominaisuudet. 31 s.

SCC Viatek Oy, 2003 a. LIFE02 ENV/FIN/000329: Kukkia Circler. Tekninen raportti 2002. 19 s. [verkkodokumentti]. Saatavissa: http://projektit.ramboll.fi/luopioinen/life/pdf/julkaisut/KC2002_tekninen_raportti07032003.pdf. [viitattu 9.2.2018]

SCC Viatek Oy, 2003 b. Selvitys vt4/vt8-liittymässä (Haaransilta-Kiviniemi) käytetyissä betonimurske ja masuunihiekkarakenteissa havaittujen vaurioiden syistä. 11.8.2003.

Sormunen, A., 2017 a. Jätteenpolton pohjakuonan hyödyntäminen Vt19 hankkeessa-materiaalitoimittajan näkökulma. Uusiomaarakentamisen erityisopintopakso, Tampereen teknillinen yliopisto ja Aalto yliopisto.

Sormunen, A., 2017 b. Recovered Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate-Like Products for Civil Engineering Structures. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology. Publication 1503. 81 p. ISBN 978-952-15-4016-5

Tammirinne, M., Juvankoski, M., Kivikoski, M., Laaksonen, R., Törnqvist, J. & Wahlström, M. 2000. Kuormitetuissa maarakenteissa käytettävien sidottujen uusiomateriaalien pitkäaikaiskäyttymisen tutkiminen laboratoriossa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 541. Espoo. 131 s.

Tarkkio, T., 2014. Lentotuhkan pitkäaikaistoimivuus teiden ja kenttien päällysrakenteissa. Tampereen teknillinen yliopisto, diplomityö.

Tiehallinto, 2007 a. Käsikirja päällysteen kunnon mittaamiseen. Helsinki. 55 s. ISBN 978-951-803-864-4.

Tiehallinto, 2007 b. Päällysrakenteen stabilointi. Helsinki. 52 s. ISBN 978-951-803-970-2

Tiehallinto, 2007 c. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa, Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki. 67 s.

Tiehallinto, 2005. Fosfokipsistabilointi. Loppuraportti. S14-Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito. Tuotantotekniikat ja koerakentaminen. 24 s. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/s14/docs/loppuraportti_fosfokipsistabilointi.pdf [viitattu: 30.3.2018].

Tielaitos, 2000. Teollisten sivutuotemateriaalien käyttö tierakenteissa pilottihanke. Solbergintie (Pt 11146). Projektisuunnitelma. Helsinki. 10 s.

Torniainen, S., 2017. Uusiomateriaalien käytön ohjeistuksen ja hankekäytäntöjen kehitystarpeet ja mahdollisuudet tierakentamisessa. Oulun yliopisto. Diplomityö. 118 s.

Turunen, P. 1998. Maabetonirakenteiden vaurioselvitys. Tielaitos. 51 s.

Valjakka, J., 2008. Yt 14795 rakennuskohteen kuntotarkastus.

Valkonen, A. 2017. Sähköpostiviesti 18.3.2017. Via Blanca Oy.

Rakennuskohteiden päällysteen kunto



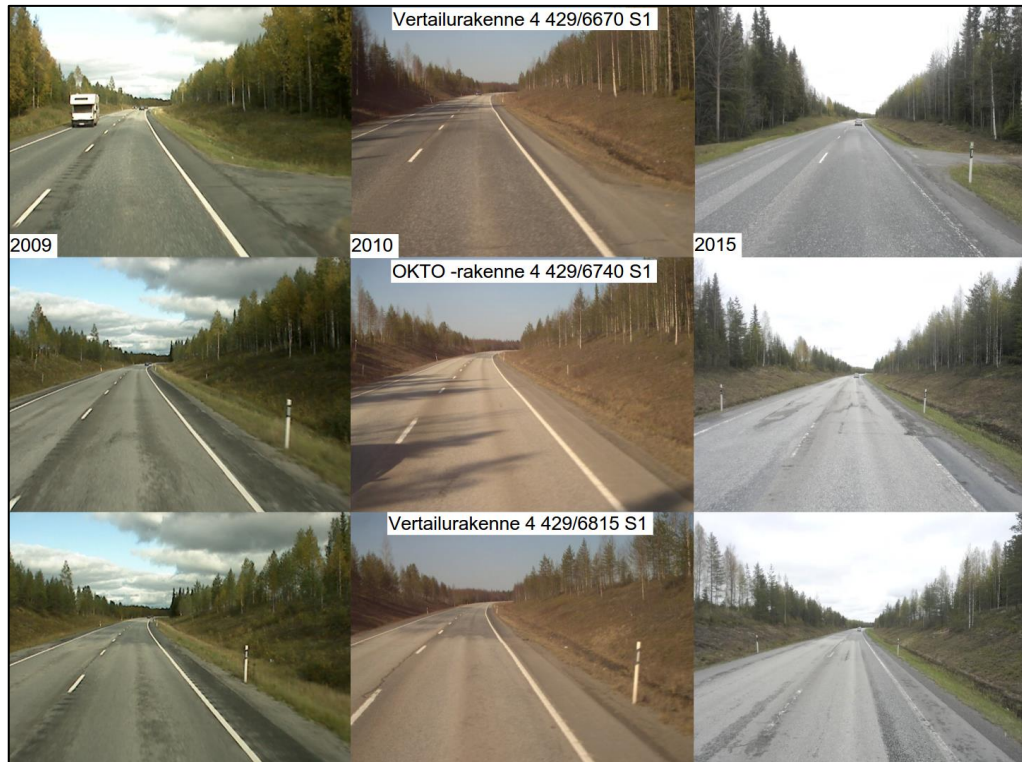
Kuva 70. Pt 19552 Yli-Liakka-Kourilehto. Päällysteen kunto 2007 ja 2015 (Jokinen 2007 ja Tiekuva 2017).



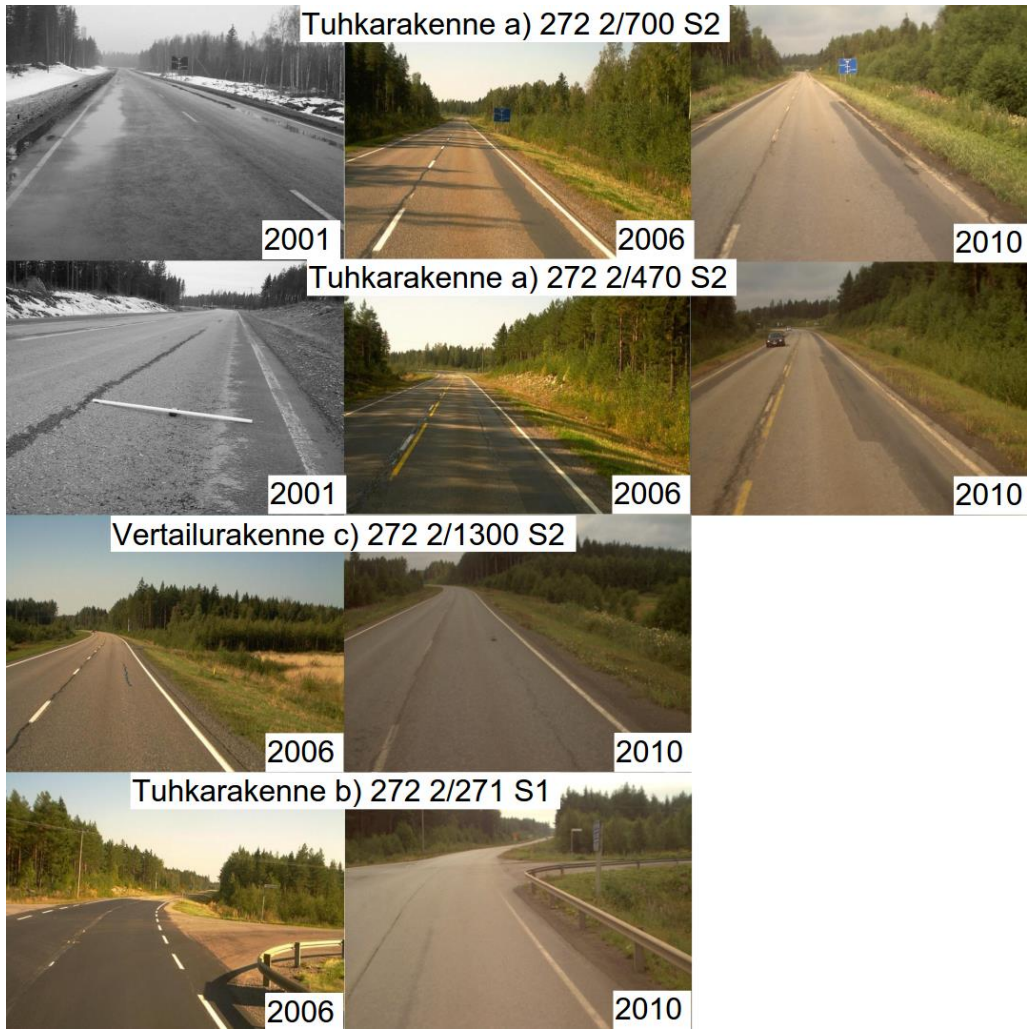
Kuva 71. Yt 14795 Vihtola–Jäkkö. Päällysten kunto 2009 ja 2016 (Tiekuva).



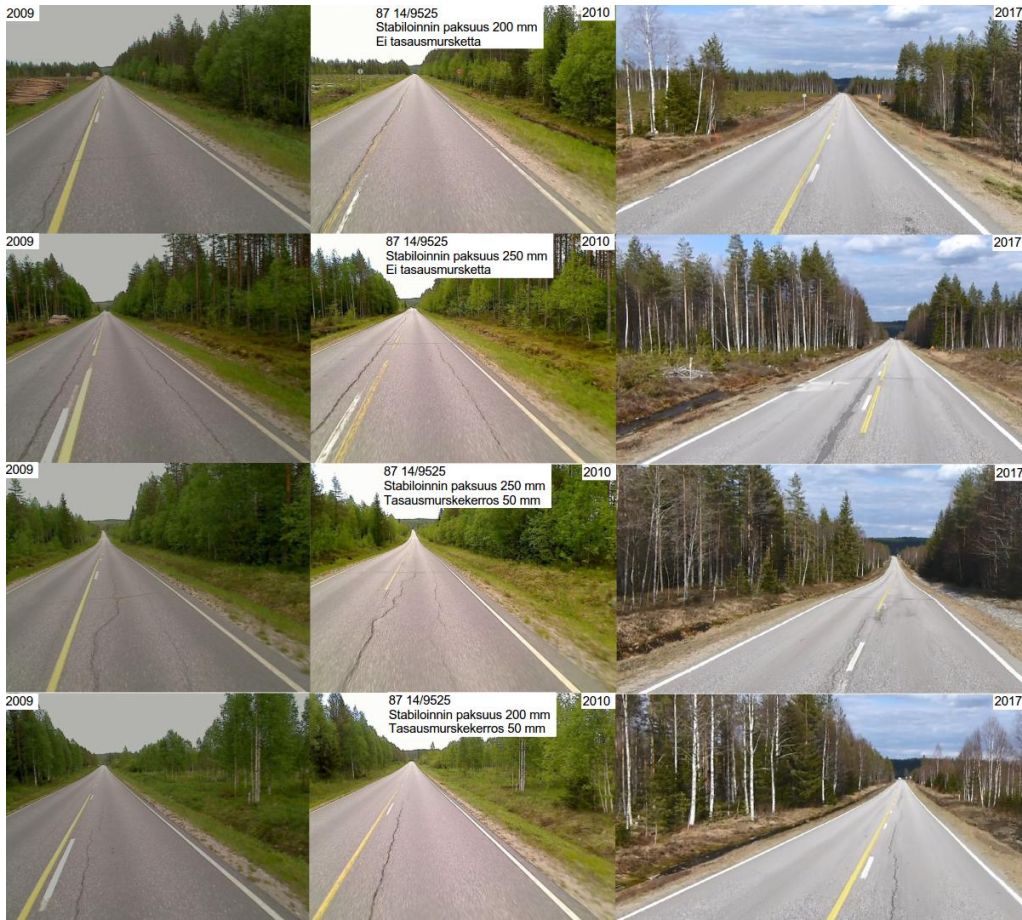
Kuva 72. Yt 11146 Degerby-Tyris. Päälysteen kunto 2003, 2010 ja 2017 (Noussiainen 2003, Tiekuva 2010 ja Forsman 2016). * Kuva suunnassa 2.



Kuva 73. Vt4 Tervola. Päällysteen kunto 2009, 2010 ja 2015 (Tiekuva 2017).



Kuva 74. Mt 272. Päällysteen kunto 2001, 2006 ja 2010 (Juvankoski & Kivikoski 2001, Tiekuva 2017).



Kuva 75. Kt 87. Päällysteen kunto 2009, 2010 ja 2017 (Tiekuvat 2017, Harju 2017).



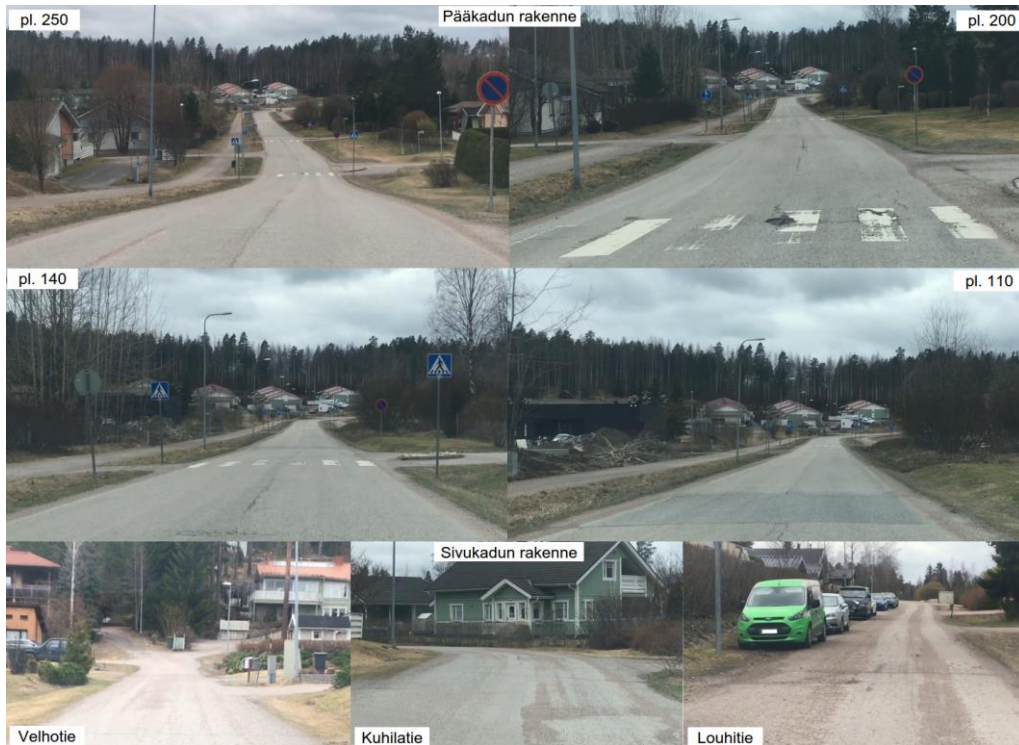
Kuva 76. Yt 14547. Päällysteen kunto 2009 ja 2017 (Tiekuva 2017).



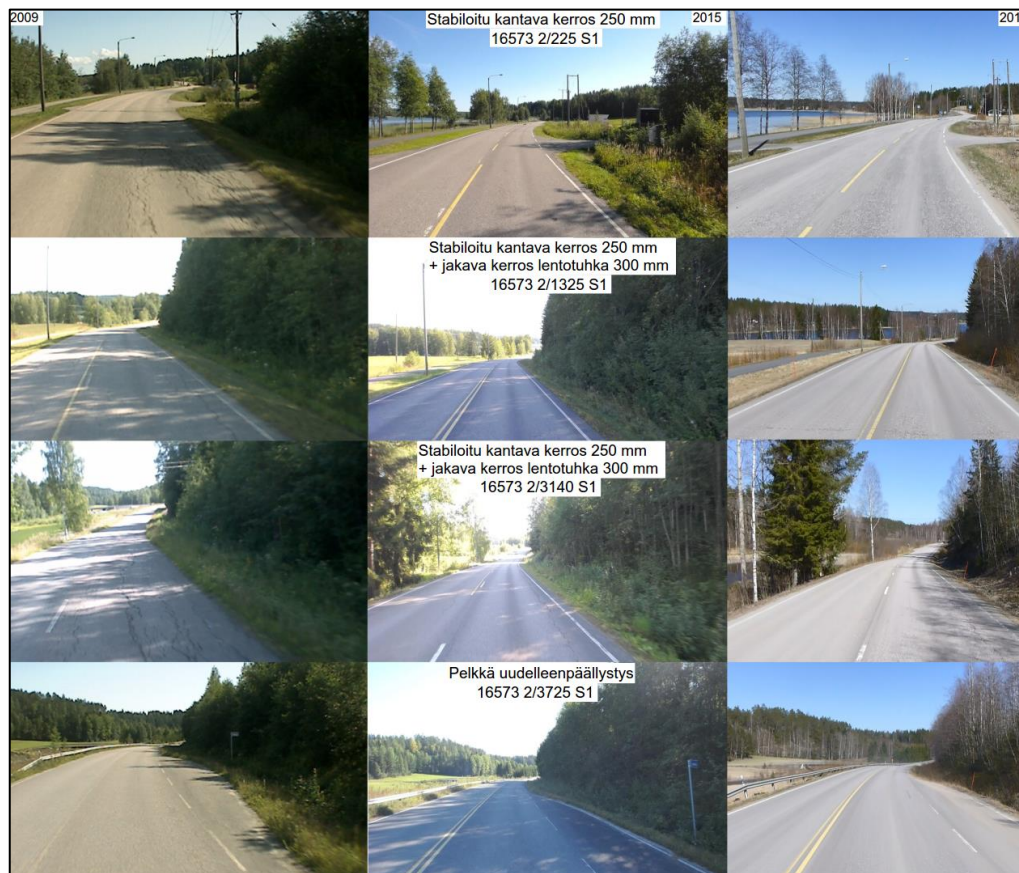
Kuva 77. Parivaljakontie. Päällysteen kunto 2018 (22.4.2018 Ilari Harju).



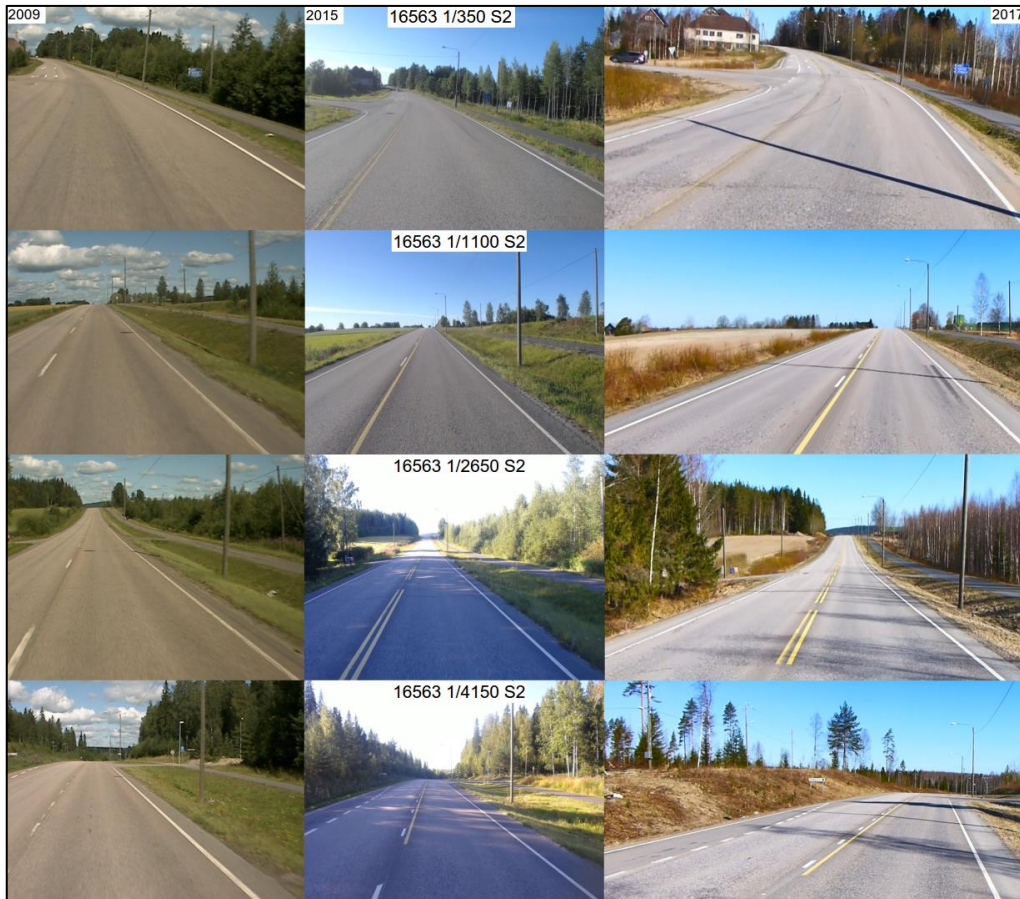
Kuva 78. Tilanhoitajakaari. Päällysteen kunto 2007 ja 2018 (Korkiala-Tanttu et al. 2008 ja Ilari Harju 22.4.2018).



Kuva 79. Haikala. Päällysteen kunto 2018 (Ilari Harju 22.4.2018).



Kuva 80. Yt 16573. Päällysteen kunto ennen rakenteen parantamista (2009) ja rakenteen parantamisen jälkeen 2015 ja 2017 (Tiekuva 2017, Harju 2017, muokattu).



Kuva 81. Yt 16563. Päällysteen kunto ennen rakenteen parantamista (2009) ja rakenteen parantamisen jälkeen 2015 ja 2017 (Tiekuva 2017, Harju 2017, muokattu).

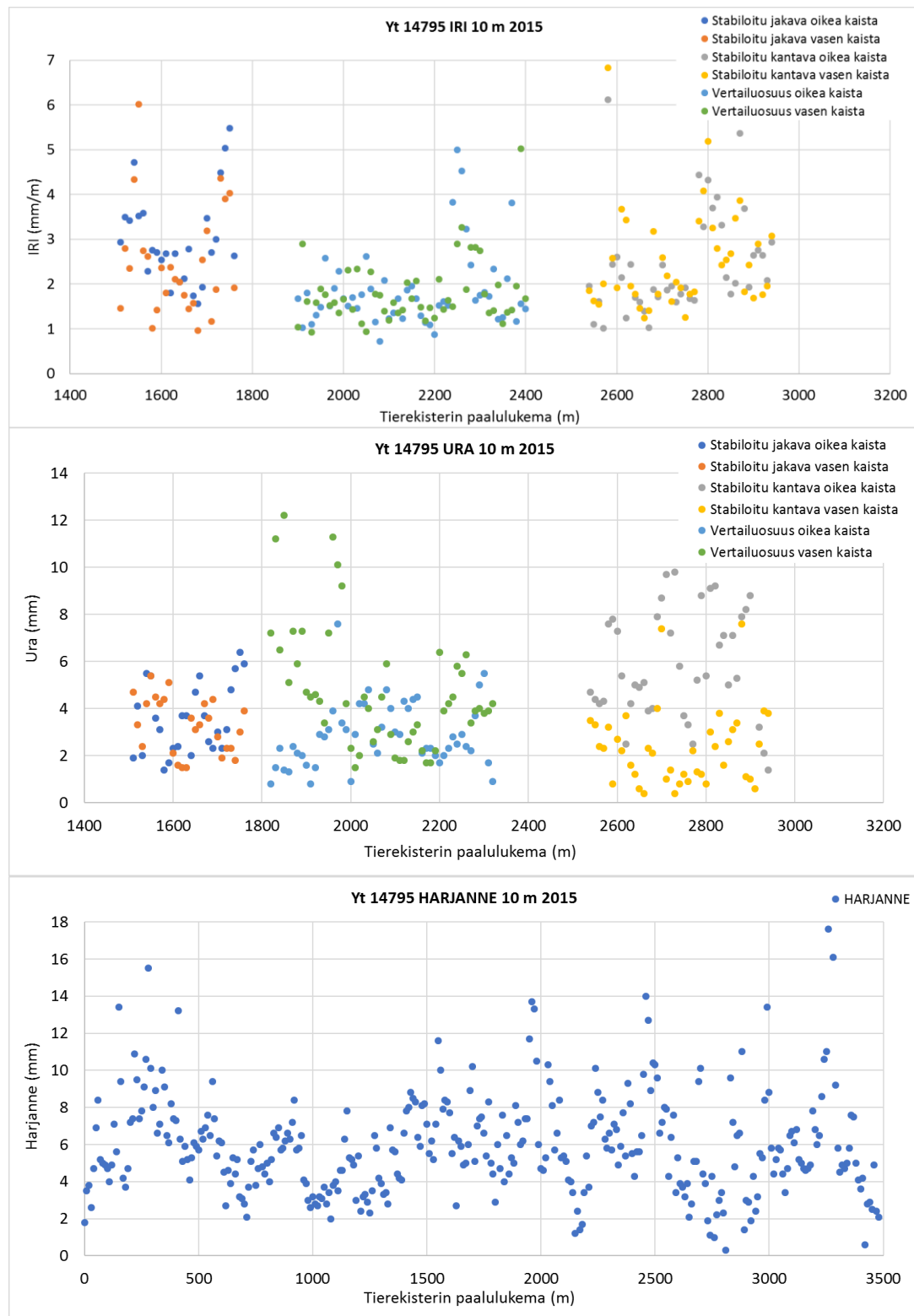


Kuva 82. Mt 5341. Stabiloidun kantavan kerroksen rakennetutkimukset 2013 (Tero Jokinen 7.8.2013).



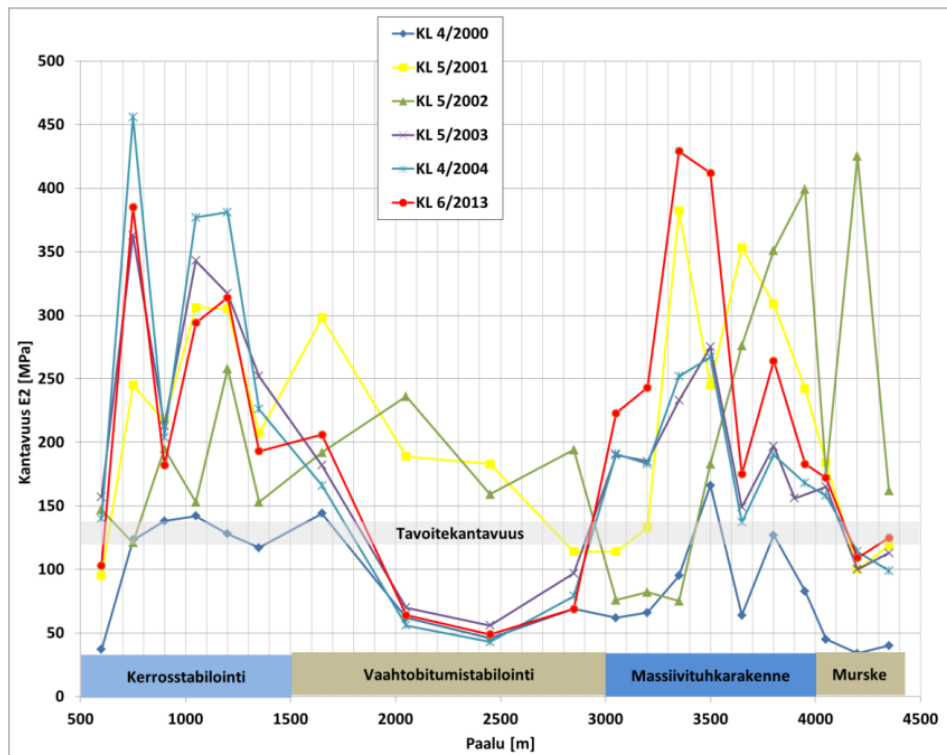
Kuva 83. Yt 14800. Päällysteen kunto ennen rakenteen parantamista (2007) ja rakenteen parantamisen jälkeen 2016 ja 2017 (Hietala et al. 2008, Tiekuva 2017, Harju 2017, muokattu).

Rakennuskohteiden PTM-mittaustulokset

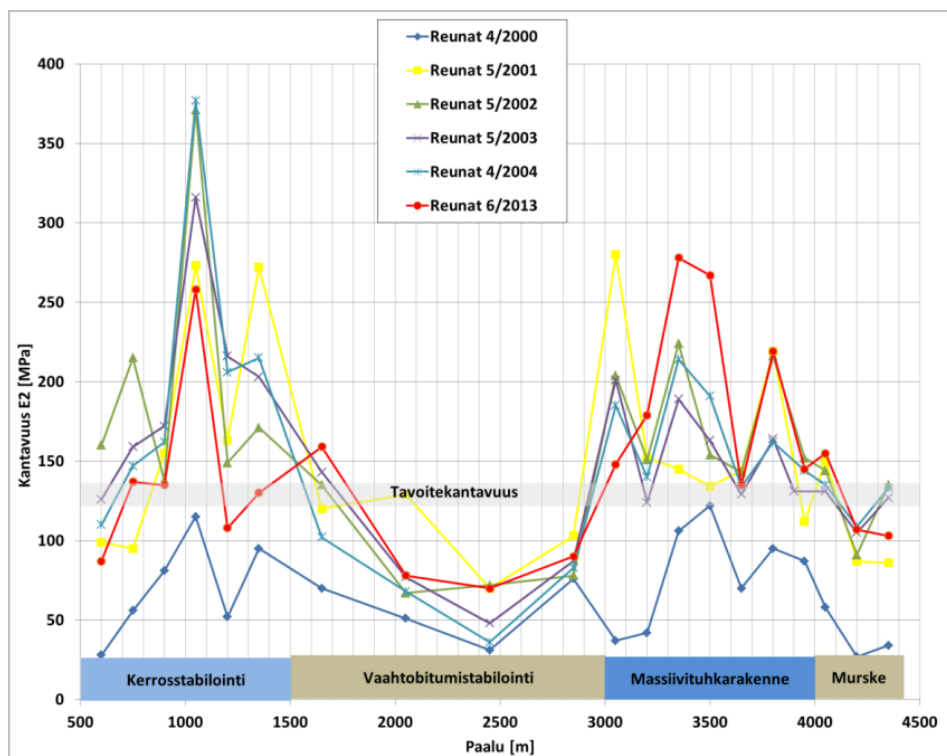


Kuva 84. Yt 14795. IRI-tasaisuus, urasyvyys ja harjanteen korkeus 2015 (Liikennevirasto, 2017).

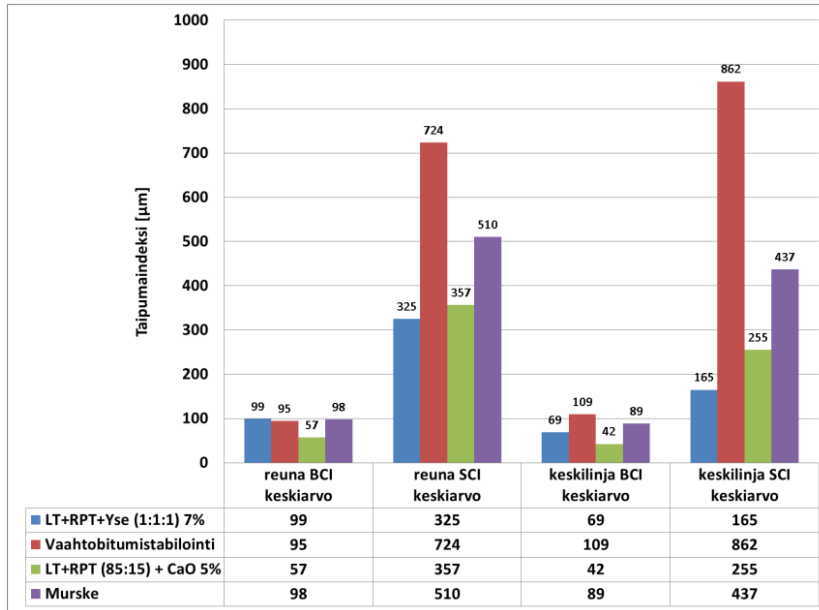
Rakennuskohteiden seurantatutkimustulokset



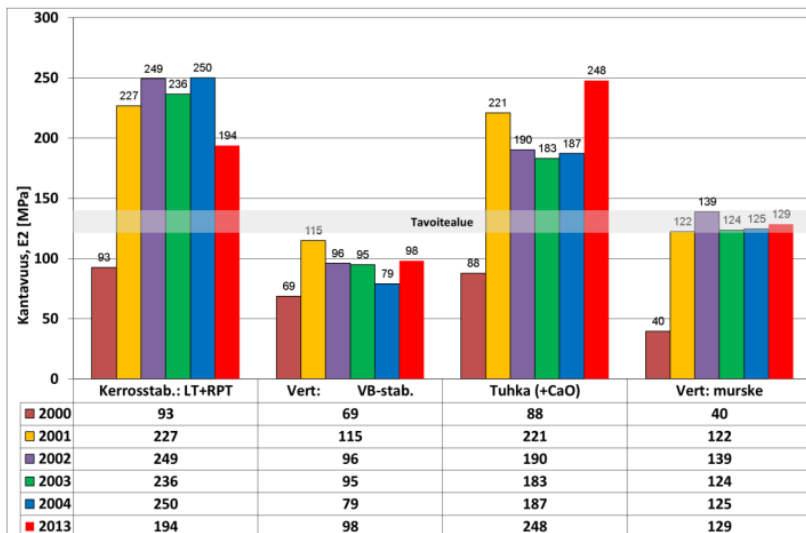
Kuva 85. Yt 11146. Kohteen keskilinjän kantavuus (Tarkkio, 2014).



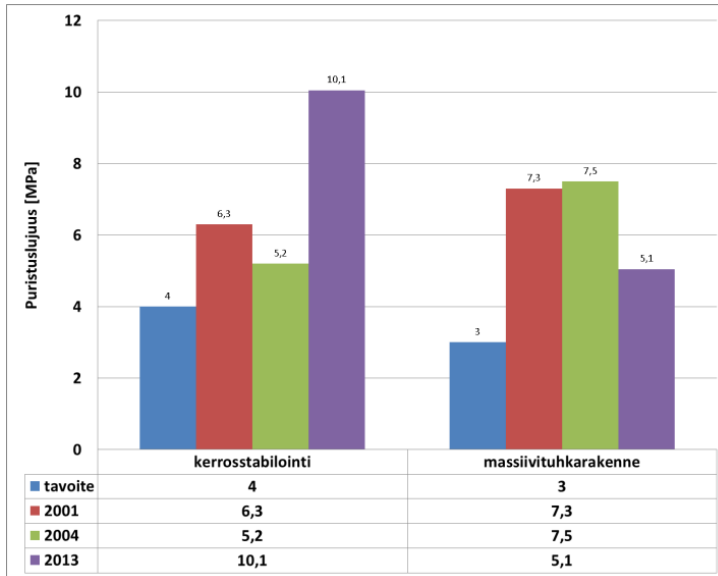
Kuva 86. Yt 11146. Kohteen reunalinjän kantavuus (Tarkkio, 2014).



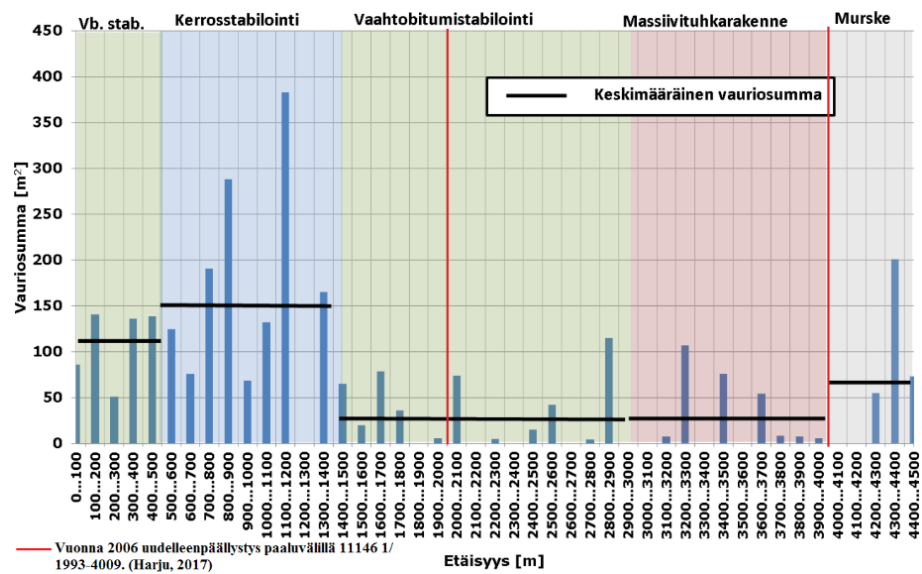
Kuva 87. Yt 11146. Vuoden 2013 kantavuusmittausten taipumaindeksit (Tarkkio, 2014).



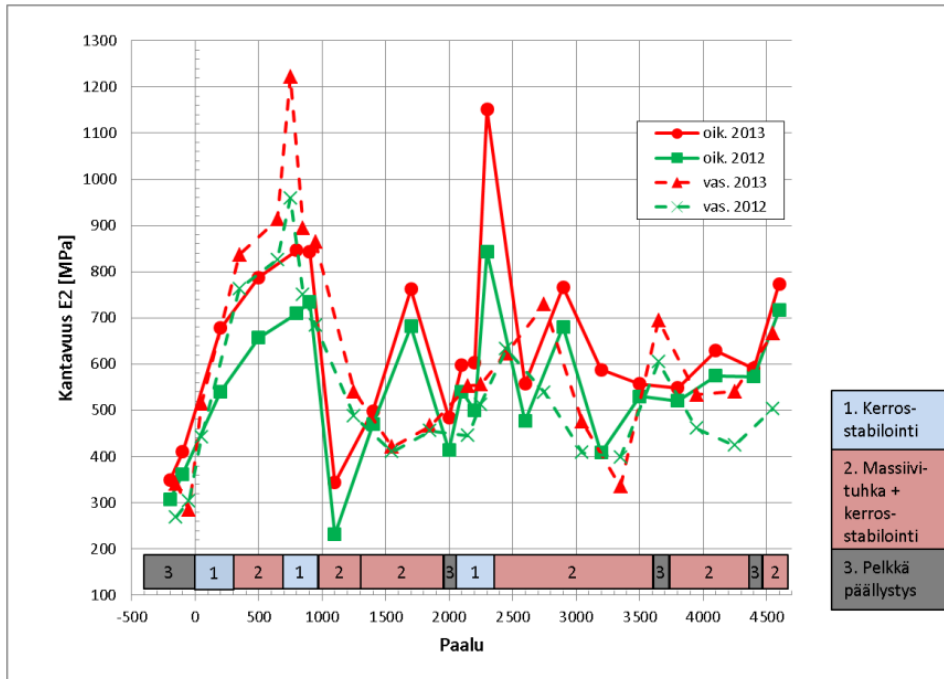
Kuva 88. Yt 11146. Kohteen kantavuusmittaustulosten keskiarvot (Tarkkio, 2014).



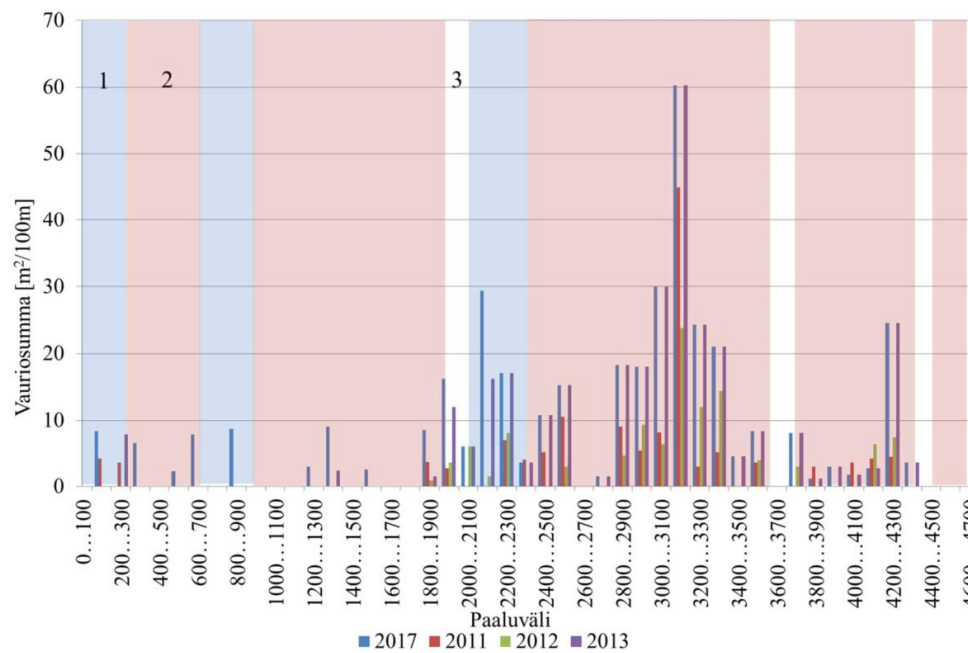
Kuva 89. Yt 11146. Rakennenäytekappaleiden keskimääräiset yksiakseliset puristuslujuudet (Tarkkio, 2014).



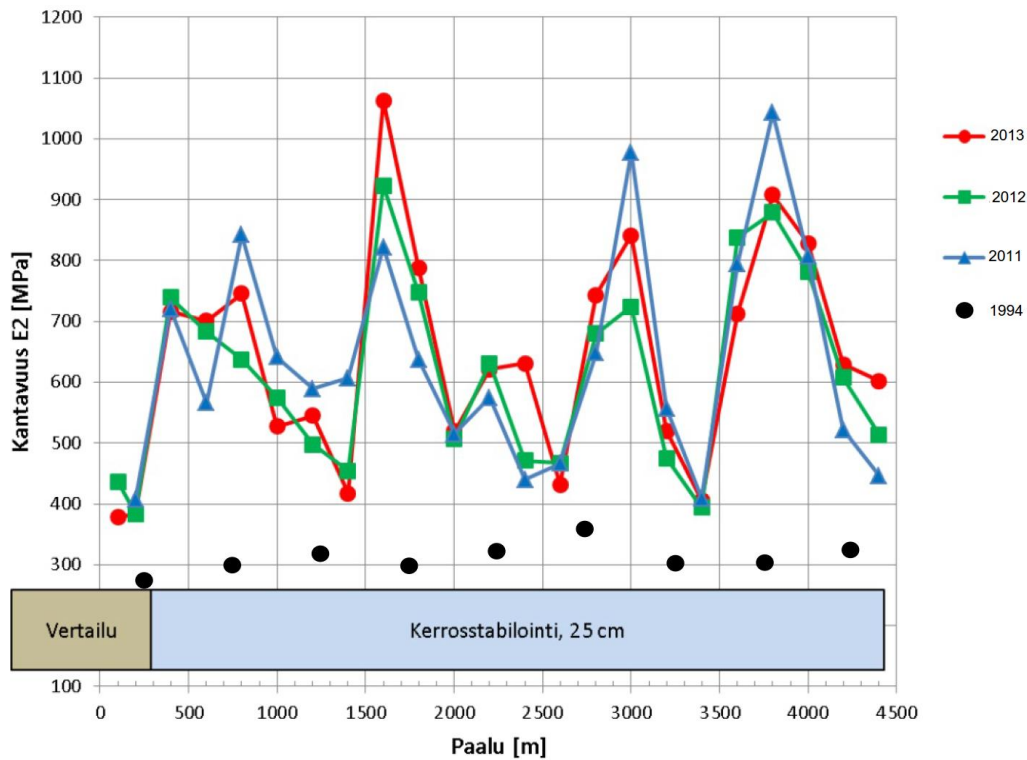
Kuva 90. Yt 11146. Tienkäyttäjän vauriosumma 2013 (Tarkkio, 2014, muokattu).



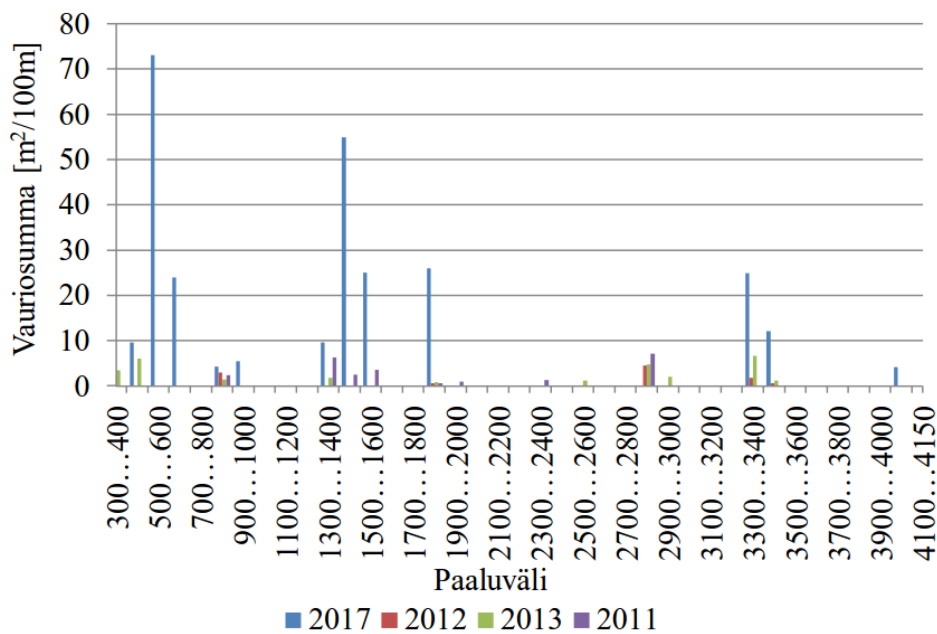
Kuva 91. Yt 16573. Kantavuusmittaustulokset 2012 ja 2013 (Tarkkio 2014).



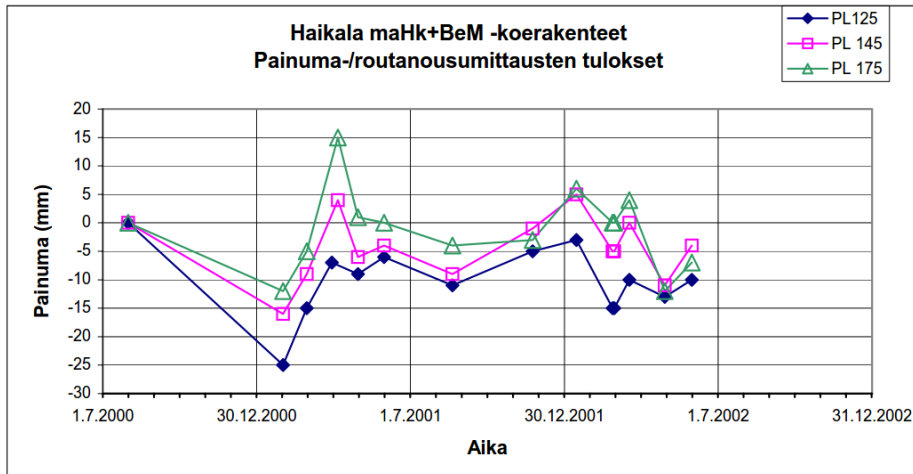
Kuva 92. Yt 16573. Tienkäyttäjän vauriosumma 2011, 2012, 2013 ja 2017. Rakennetyypit: 1) stabiloitu kantava kerros, 2) stabiloitu kantava kerros + jakavan kerroksen lentotuikka ja 3) pelkkä uudelleenpäällystys (Harju 2017).



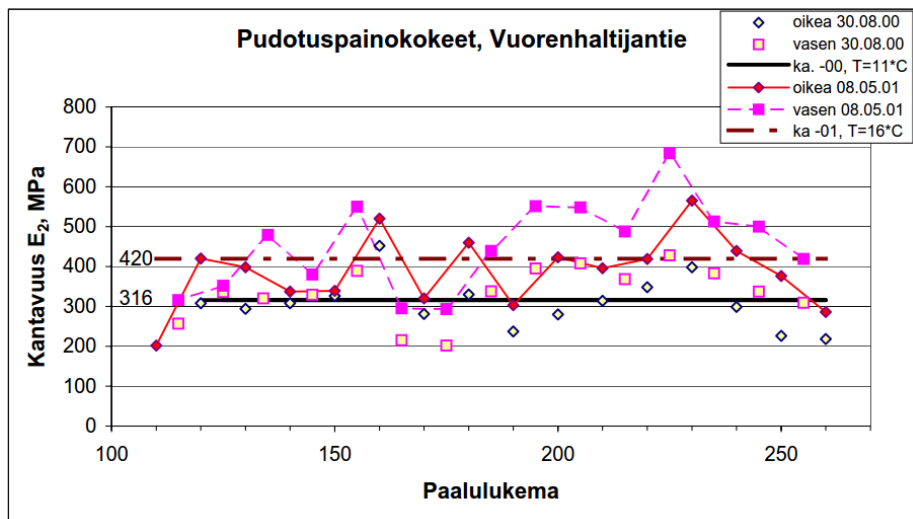
Kuva 93. Yt 16563. Kantavuusmittaustulokset 1994, 2011, 2012 ja 2013 (Tarkkio 2014, Liikennevirasto 2017, muokattu).



Kuva 94. Yt 16563. Tienkäyttäjän vauriosumma 2011, 2012, 2013 ja 2017 (Harju 2017).

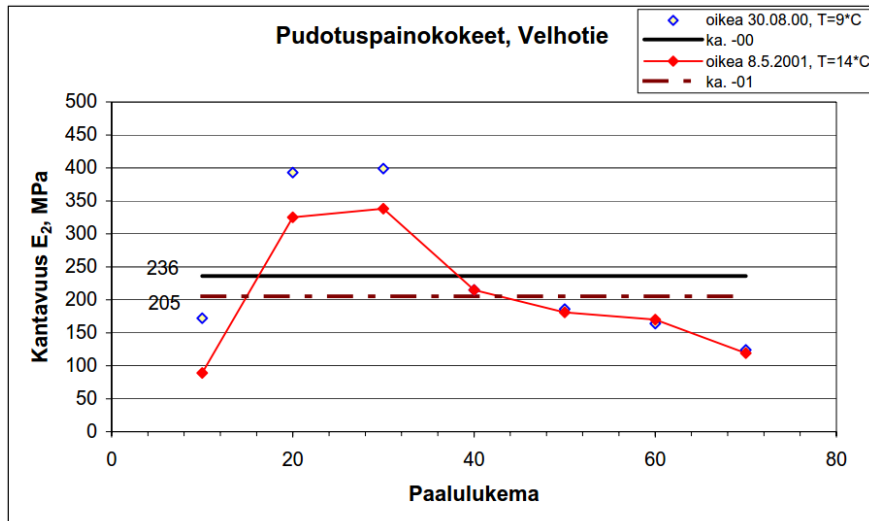


Kuva 95. Haikala. Painuma- ja routanousumittaukset 2000–2002 (Forsman & Koivisto 2002).

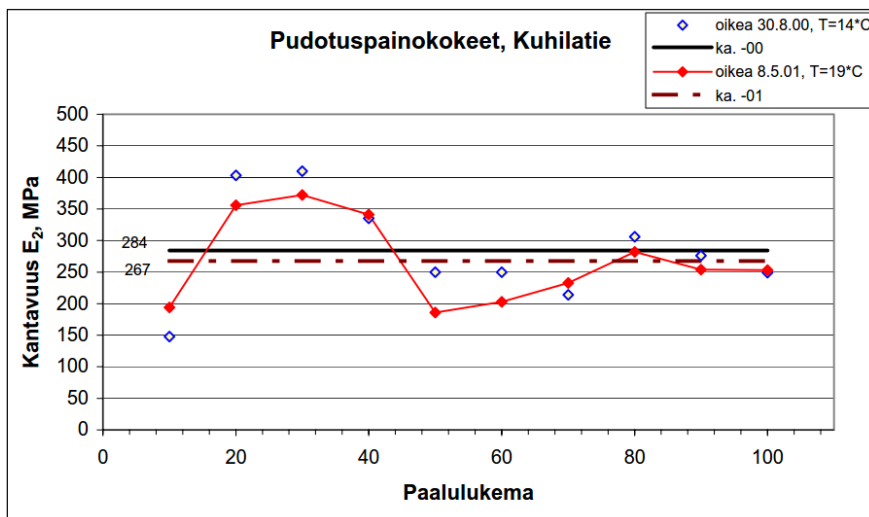


Paalu	50	100	125	150	175	200	225	250	275	300
Savikerroksen paksuus (m)	12,8	14,8	16	14,4	12,2	10	6,6	3,3	0	1

Kuva 96. Haikala. Pääkadun pudotuspainokokeiden tulokset 2000 ja 2001 (Forsman & Koivisto 2002).

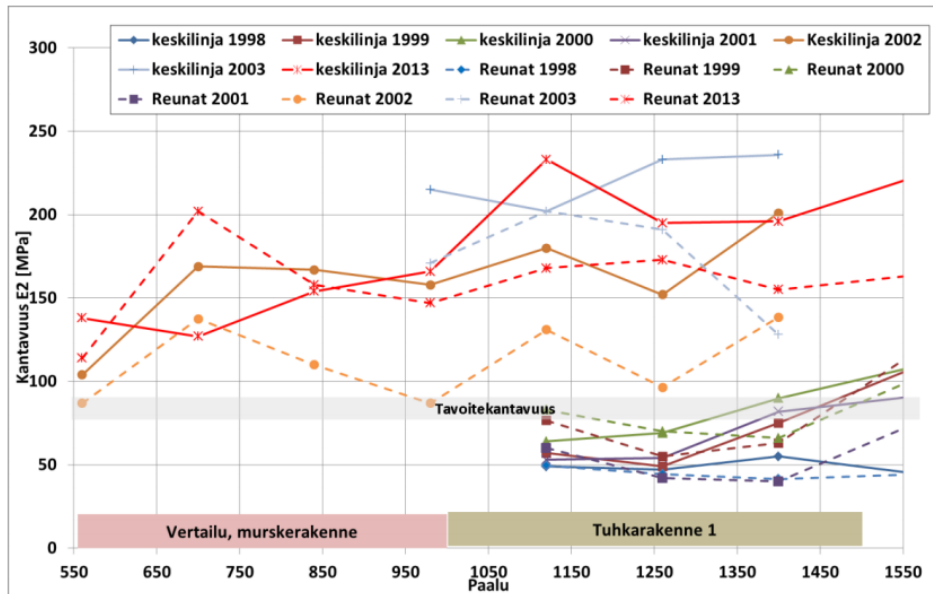


Paalu	25	75	100
Savikerroksen paksuus (m)	16,9	10,7	5,8

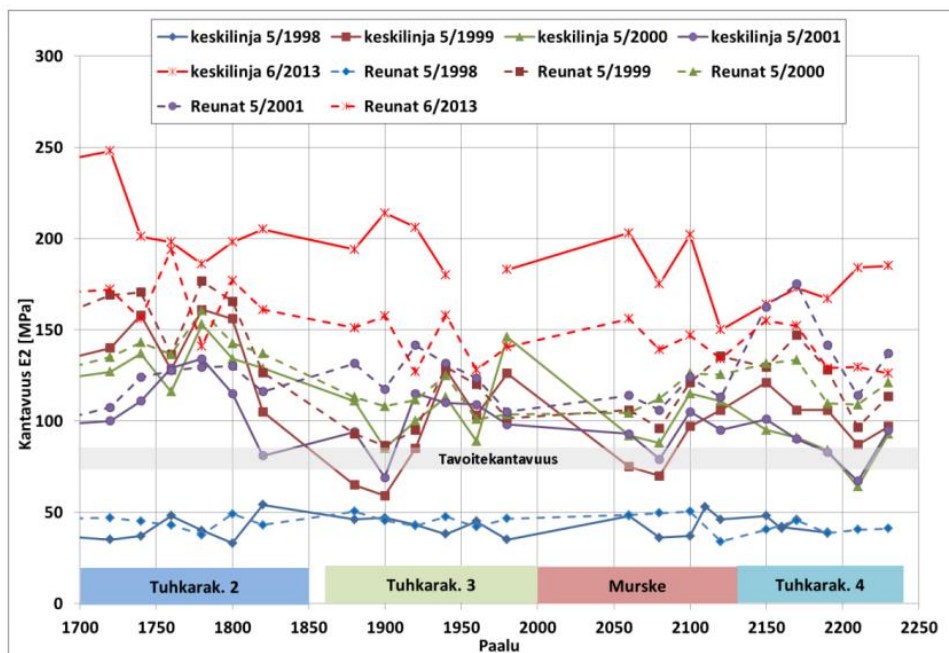


Paalu	0	50	75	100	125	150
Savikerroksen paksuus (m)	12,8	14,8	16	14,4	12,2	10

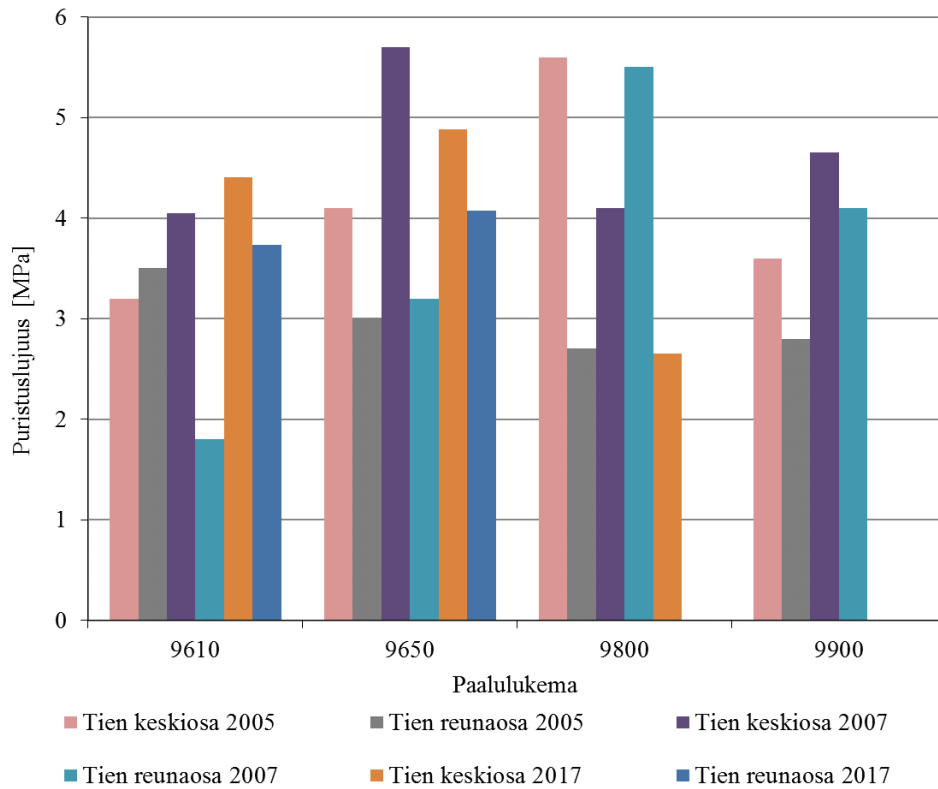
Kuva 97. Haikala. Sivukatujen pudotuspainokokeiden tulokset 2000 ja 2001 (Forsman & Koivisto 2002).



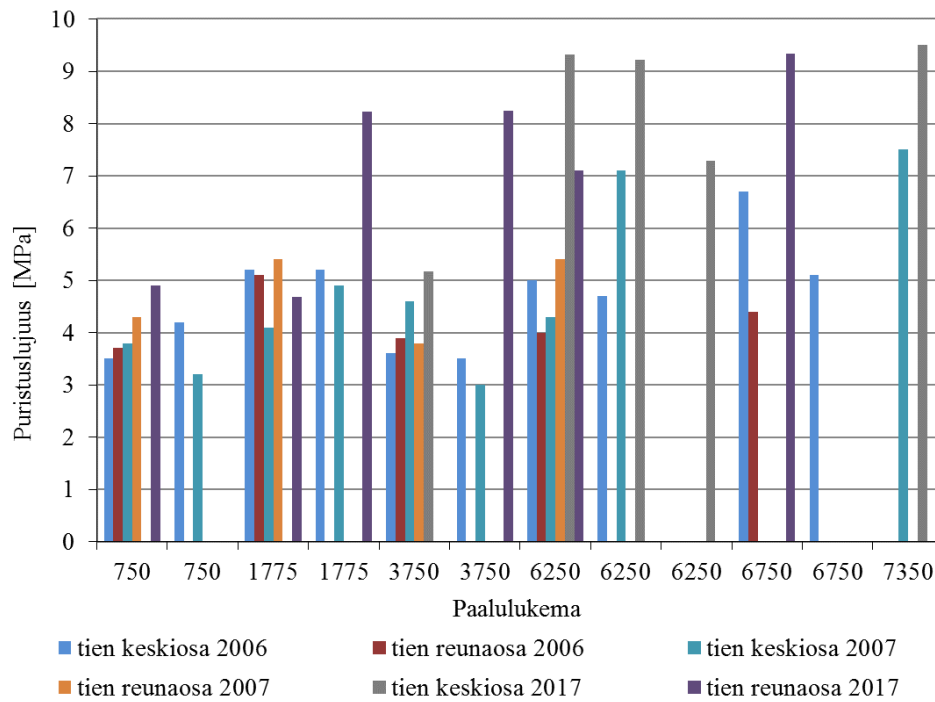
Kuva 98. Yt 14567. Kantavuus paaluvälillä 550–1550 (Tarkkio 2014).



Kuva 99. Yt 14567. Kantavuus paaluvälillä 1700–2250 (Tarkkio 2014).



Kuva 100. Kt 87. Rakennenäytekkappaleiden yksiakselinen puristuslujuus 2005, 2007 ja 2017 (Harju 2017).



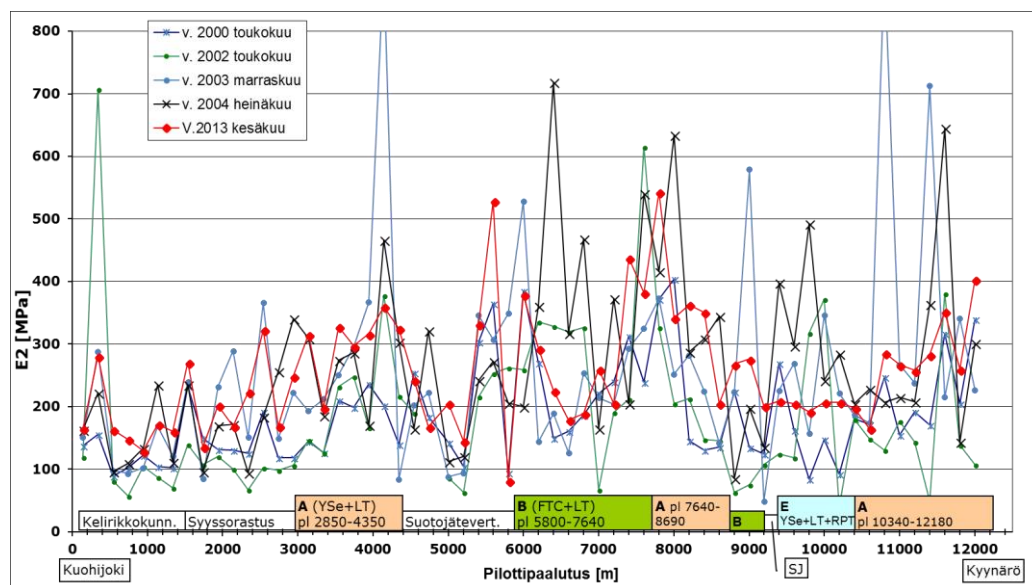
Kuva 101. Yt 14547. Rakennenäytekkappaleiden yksiakselinen puristuslujuus 2006 ja 2017 (Harju 2017, muokattu).

Taulukko 59. Pudotuspainokokeiden tulokset. Päällystettyjen teiden stabiloidut kantavat kerrokset. (Harju 2017)

Kohde	Päällysteen paksuus (mm)	E2-tavoite (MPa)	Mittausvuosi	PPL-Mittaukset, mediaaniarvo				
				SCI, d0-d300 (µm)	BCI, d900-d1200 (µm)	E2_T (MPa)	E20_T (MPa)	E120_T (MPa)
Kt 87	40	290	2008	54	27	572	242	83
Yt 14547	40	204	2007	60	43	406	169	57
Yt 16563	50	420	2012	64	25	680	306	116
Yt 11146	40	125	2002	132	63	305	132	36
Yt 16573	50	390	2012	88	29	541	253	113

Taulukko 60. Rakennenyhteiden- sekä laboratorion ennakkokokeiden yksiaksiaalinen puristuslujuus. Päällystettyjen teiden stabiloidut kantavat kerrokset. (Harju 2017)

Kohde	Rakennusvuosi	Porauskerat/ Ehjät rakennetyt (kpl)	Puristuslujuus (MPa)				E50 – sekanttimuoduuli, 2017 (MPa)	
			Ennakkokoe	Aiemmat tulokset / Vuosi	Keskiarvo (2017)	Mediaani (2017)	Keskiarvo	Mediaani
Kt87	2004	13/6	4,8	3,56/2005	3,83	3,9	254	211
Yt 14547	2006	14/12	4,0 - 6,0	4,67/2006	7,47	8,22	613	542
Yt 14800	2007	4/4	3,0 - 4,0	2,37/2007	3,58	3,58	431	444
Yt 16563	2010	7/5	3,5	4,3/2013	3,31	2,93	378	364
Yt 16573	2010	5/3	3,3	3,3/2013	3,18	3,56	354	354



Kuva 102. Kukkia-Circlet. Kantavuusmittaustulokset (Tarkkio 2014).

Taulukko 61.

Mt272. Seurantatutkimustulokset (Juvankoski & Kivikoski 2001, muokattu).

Seurantamittaustulokset ja havainnot (Juvankoski & Kivikoski 2001)																
	1998				1999				2000				2001			
	Rakenne A	Rakenne B	Rakenne C	Rakenne D	Rakenne A	Rakenne B	Rakenne C	Rakenne D	Rakenne A	Rakenne B	Rakenne C	Rakenne D	Rakenne A	Rakenne B	Rakenne C	Rakenne D
Kantavuus (MPa)¹⁾	339	Y2: 280 P1: 419	271	271	415	Y2: 208 P1: 372	430	430	389	Y2: 258 P1: 273	409	409	436	Y2: 275 P1: 283	454	454
IRI 5m (mm/m)²⁾	1,3 (0,53-7,58)	Y2: 5,39 (1,02-22,67) P1: 5,28 (2,16-20,08)	1,04 (0,40-3,24)	-	1,53 (0,54-8,82)	Y2: 5,68 (1,35-21,78) P1: 5,19 (1,72-19,60)	1,13 (0,43-3,67)	-	1,75 (0,57-10,65)	Y2: 4,69 (1,53-21,78) P1: 5,11 (1,79-13,22)	1,16 (0,29-4,5)	-	1,94 (0,60-10,98)	Y2: 5,94 (1,15-22,03) P1: 5,50 (2,31-19,00)	1,24 (0,46-4,39)	-
Vauriot	-	-	-	-	pituus- halkeilu	-	-	-	pituus- halkeilu	-	-	-	pituus- halkeilu	-	-	-
Roudan syvyys (m)	1,09	1,16	1,36 - 2,0	1,36 - 2,0	1,02	0,7	1,12 - 1,56	1,12 - 1,56	1,13 - 1,18	1,13 - 1,18	1,13 - 1,8	1,13 - 1,8	-	-	-	-
Puristus-lujuus (MPa)	2,46 (3,34 ³⁾)	3,10 (3,76 ³⁾)	-	-	1,61 ⁴⁾ 0,71 ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Routanous (mm)	28-88 (max 88 pl 750)	Y2: 22-51 P1: 16-31	-10-11	-10-11	27-104 (max 104 pl 480)	Y2: 31-59 P1: 32-51	-5-13	-5-13	21-106 (max 106 pl 910)	Y2: 26-50 P1: 27-48	-	-	-	-	-	-

¹⁾Kevätkantavuusmittaus ka. Y2 ja P1 liittymä-alueita.²⁾Kesä/syysmittaus ka. (vaihteluväli).³⁾Syksyllä 1997 rakentamisen jälkeen porattu näyte⁴⁾PL 460, kevätinäyte. Yksi koekappale.⁵⁾PL 900, kevätinäyte. Yksi koekappale.

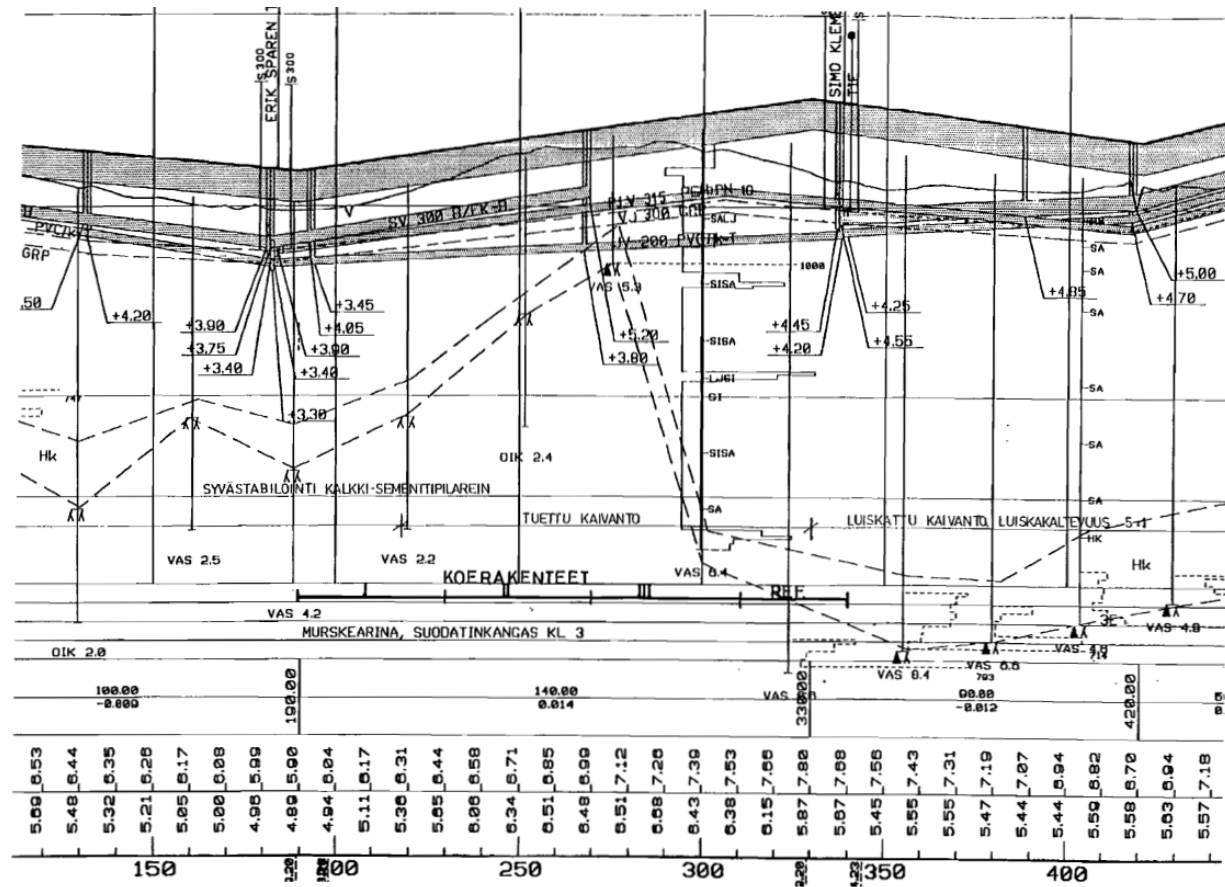
Rakenne A = Kantava: Bitumistabilointi, jakava: stabiloitu lentotuhka

Rakenne B = Kantava: Stab. LT/PT, jakava: stabiloitu lentotuhka, suodatin: PT

Rakenne C = Luonnon maa- ja kiviainesrakenne 111 cm

Rakenne D = Luonnon maa- ja kiviainesrakenne 650 mm

Tilanhoitajankaari. Pituusleikkaus (Mäkelä et al. 2000).



Rakennuskohteiden rakentamisvaiheen valokuvia



Kuva 103. Parivaljakontie. Rakentamisvaiheen valokuvia. a) levitetty rengasrouhekevennysrakenne, b) kevytsorakevennysmateriaali levitystyö, c) masuunihiekkakerroksen pinta, d) betonimurskekerroksen pinta, e) rakeisuudeltaan laadukkaan, tiivistetyn betonimurskekerroksen pinta ja f) rakeisuudeltaan puutteellisen, tiivistetyn betonimurskekerroksen pinta (Haatainen & Forsman 2001, muokattu).



Kuva 104. Yt 11146. Rakentamisvaiheen valokuvia. a) stabiloinnin kuivan sideaineseoksen levityksessä käytetty, traktorin perään kiinnitettävä vaunu (kuva yt 14800 rakennuskohteelta (Jokinen 2007)), b) sideaineseoksen ja olemassa olevan tien rakennekerrosten esisekoitusjyrsintä ja c) esisekoitetun materiaaliseoksen vesipitoisuuden kohottaminen toisen sekoitusjyrsintäkerran yhteydessä ja rakenteen tiivistys (Ahlqvist et al 2000, muokattu).



Kuva 105. Yt 13791. Rakentamisvaiheen valokuvia. a) kuitutuhkakerroksen rakennuspohja ja reunatuet, b) kuitutuhkamateriaalin levitystyö ja esitiivistetty pinta, c) liian kostea, häiriintynyt kuitutuhkakerros ja d) kuitutuhkamateriaaliseoksen valmistuksessa käytetty sekoitusasema sekä aumaan varastoidut materiaalit (Mäkinen & Ronkainen 2013, muokattu).



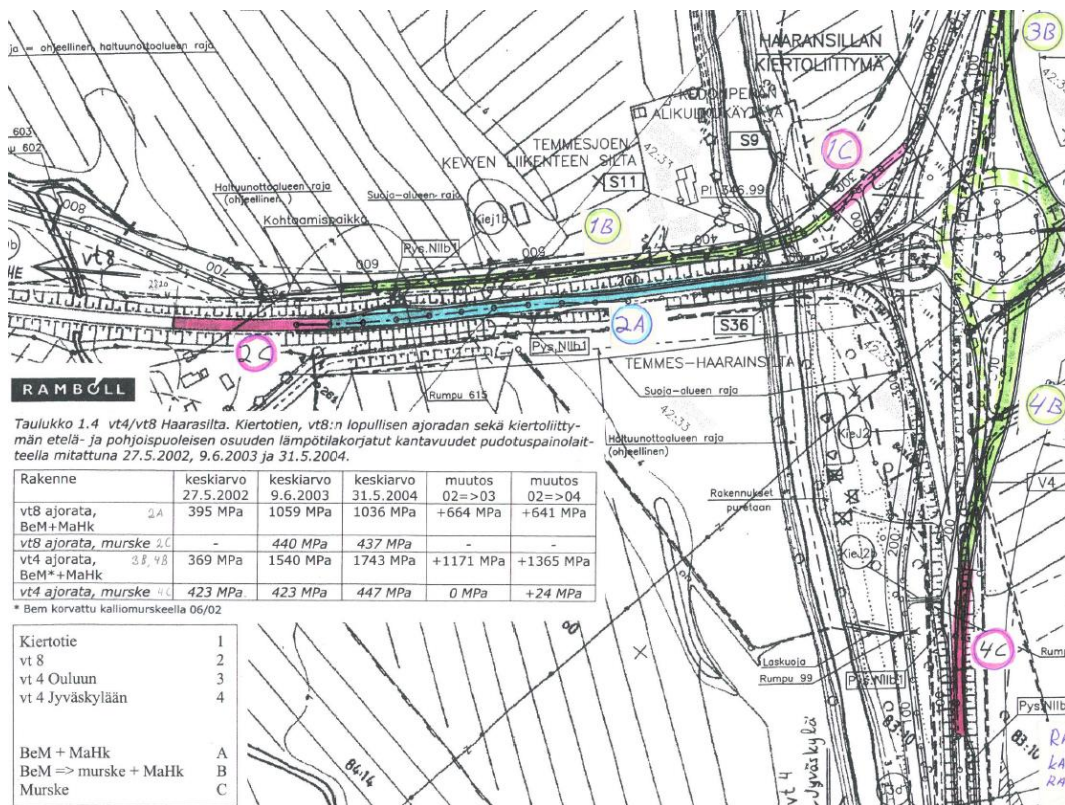
Kuva 106. Mt 741 Lövö-Sandsund. Rakentamisvaiheen valokuvia. a) lentotuhkan tiivistäminen koekentällä, b) bentoniittimaton asentaminen ja c) kevyen liikenteen väylän rakenne ennen päällystämistä (Lummi et al. 2015).



Kuva 107. Vuosaaren satama. Rakentamisvaiheen valokuvia. a) stabiloitavan murskeen kostuttaminen säiliöautolla, b) sideaineseoksen valmistus asemasekoittimella, c) sideaineseoksen levitys asfaltinlevittimellä, d) sideaineseoksen ja murskeen sekoitus stabilointijärsimellä e) stabiloidun rakennekerroksen tiivistäminen, f) stabiloidun rakennekerroksen muotoilu ja tiivistäminen, g) kaivon ympäristäytön leikkaus ja h) kaivon ympäristäytön murskeen tiivistäminen tärylevyllä (Ronkainen & Sikiö, 2007).

Haaransillan betonimurske- ja masuunihiekka-rakenteet (Liminka 2001)

1. Tarkastellut osuudet ja havaitut vauriot: Haaransillan kiertoliittymä (vt4 ja vt8) ja siitä Raahan suuntaan lähtevän vt8:n viereinen työnaikainen kiertotie rakennettiin kesällä-syksyllä 2001 (sijainnit kuvassa 108). Kiertotie ohitti vt8:n varsinaisen ajoradan osuuden, jota esikuormitettiin painopenkereellä. Joulukuun 2001 loppupuolen kylmän jakson (-20 - -30 °C) aikana tiehen muodostui routanousuja. Tammikuun alussa sää lämpeni nopeasti plussan puolelle, jolloin erityisesti syyskesällä rakennetun kiertotien päällysteeseen syntyi huomattavia vaurioita ja sitä jouduttiin paikkaamaan. Myös kiertoliittymän alueella havaittiin vaurioita. (SCC Viatek 2003) Vaurioituneen kohdat korjattiin kesäkuussa 2002. Kuvassa 108 on esitetty korjatut osuudet (3B ja 4B) ja osuudet, joissa ei havaittu vaurioita (2A, 2C, ja 4C).



Kuva 108. Rakenteet, jotka on rakennettu 2001. Osuudet 3B ja 4B on muutettu 2002. Taulukossa 2002-2004 tehtyjen kantavuusmittaustulosten yhteenveto.

2. Suunnitellut ja havaitut rakennekerrokset: Kiertotien ja kiertoliittymän suunnitellut ja koekuopista 2002 havaitut rakennekerrokset on esitetty taulukossa 66. Koekuoppatuloksista voidaan havaita poikkeamia suunnitelmasta:

Kiertotie: päällyste on suunniteltua ohuempi (50 mm => min. 30 mm), maHk-kerros on suunniteltua ohuempi (600 mm => min. 350 mm), päällysrakenne on suunniteltua ohuempi (750 mm => min. 560 mm) ja pengertäytteen materiaali vaihtelee paljon (siHk - hkSr).

Kiertoliittymä: BeM-kerroksen paksuus vaihtelee (60-200 mm) ja päällysrakenne on ainakin paikoin suunniteltua ohuempi (1460 => 980 mm)

3. Rakentamisen aikainen laadunvalvonta: Voimassa olleen Tielaitoksen ohjeistuksen mukaan "Työmaalla on laadittava kaavio, johon päivittäin merkitään tärkeimmät tutkimustulokset. Kaavioon merkitään lisäksi kantavuutta, tiiviyyttä sekä korkeutta koskevat tutkimustulokset. Työmaan päällikkö vastaa työn laadusta ja tämän vuoksi hänen on jatkuvasti seurattava ja vähintään viikon välein hyväksyttävä alusrakenteen ja päällysrakennekerroksen rakeisuutta, kantavuutta, tiiviyyttä, kerrospaksuuksia sekä keskimääräistä korkeutta koskevat tutkimustulokset". => Ko. dokumentteja ei näytetty tai toimitettu miltei osin materiaalitoimittajille tai materiaalitoimittajien ulkopuolisille asiantuntijoille lukuisista pyynnöistä huolimatta ja niitä ei myöskään esitetty oikeuskäsittelyssä.

Taulukko 62. Kiertotien a) ja kiertoliittymän b) suunnitellut ja koekuopista (30.5.2002) mitatut rakennekerrokset (SCC Viatek 2003).

a) Kerros	Suunniteltu paksuus	Koekuopista mitattu paksuus (5 koekuoppaa n. 120 m matkalla)	laboratoriotutkimus
ABK*	50 mm	40 / 45 / 30 / 30-35 / 40-50 mm	tyhjättila 4,2 %
BeM 0/50 mm	100 mm	190 / 220 / 180 / 180 / 170 mm	
MaHk	600 mm	410 / 400 / 350 / 360 / 500 mm	
yht.	750 mm	640 / 660 / 560 / 570 / 710 mm	
Pengertäyte (Hk)	≥ 200 mm	150 / 300 / 240 / 330 / 340 mm	siHk - hkSr
Pohjamaa savi			Si (pinta)

* Työyhteenliittymältä myöhemmin saadun tiedon mukaan päällystys olisi tehty AB:lla (?).

b) Kerros	Suunniteltu paksuus	Koekuopista mitattu paksuus, kiertoliittymän eteläpuolella 7 ja pohjoispuolella 4 koekuoppaa	
ABK	60 mm	60 mm	60 mm
BeM 0/50 mm	100 mm	130 / 150 / 200 / 120 mm	60 / 60 / 100 mm
MaHk	600 mm	x / x / 950 / 800 mm	x / x / x mm
Hk (suodatin)	200 mm	x / x / x / x mm	x / x / x mm
Pengertäyte (Hk)	≥ 500 mm	x / x / x / x mm	x / x / x mm
Yhteensä:	≥ 1460 mm	x / x / 1210 / 980 mm	x / x / x mm
Pohjamaa SaSi		x	x

x = kerrospaksuutta ei ole mitattu tai mittaustulos ei ole tiedossa

4. Tehdyt kenttä- ja laboratoriotutkimukset: Koska toteutuksen aikaisia urakoitsijan tekemiä (tai tekemättä jättämiä?) laadunvalvonnan tuloksia ei ollut käytettävissä, vaurioiden syiden selvittämiseksi materiaalitoimittajat tekivät kenttä- ja laboratoriotutkimuksia ja keräsi aineistoa mm. seuraavasti: katselmuksat, koekuopat, kartoitukset, rakennänäytteiden laboratoriotutkimukset, kantavuusmittaukset, päällysrakenteen vaurioinventointi ja betonimurskeen valmistuksen laadunvalvontadokumentit. Laboratoriotutkimukset sisälsivät mm. seuraavia tutkimuksia: puristuslujuus sekä epäpuhtaudet ja liukoisuus (ennen työmaalle toimitusta), kemiallinen koostumus (2001), rakeisuus (ennen toimitusta ja työmaanäytteistä), routivuus (2002), kloridipitoisuus (rakenteessa ja varastokasassa), humuspitoisuus (työmaanäytteet) ja päällystetutkimukset (tyhjättila, rakeisuus). Urakoitsijan vaurioiden jälkeen tekemiä seulontatuloksia oli käytettävissä. (SCC Viatek 2003)

5. Laboratoriotutkimustulokset: Kohteeseen toimitetulle betonimurskeelle tai varastokasasta otetuille näytteille tehtyjen tutkimusten perusteella toimitettu BeM on täyttänyt laatuvaatimukset ja siitä ei ole löydetty muista lukuisista onnistuneista rakennuskohteista poikkeavia ominaisuuksia. Yhteenvedo laboratoriotutkimuksista: 1) Ennen toimitusta 28 vrk puristuslujuudet ovat olleet keskimäärin 1,3-1,4 MPa, vaatimus ≥ 0,8 MPa 2) Ennen toimitusta tutkitut epäpuhtaudet ja liukoisuudet ovat tavoitearvojen alapuolella. 3) Kohteessa käytetyn BeM

kemiallinen koostumus ei poikkea muiden tuolloin menestyksekkäästi toteutetuista kohteista tutkittujen BeM-näytteiden koostumuksesta. 4) Ennen toimistusta ja painopenkereestä otettujen BeM-näytteiden ao. ajankohdan laadunvalvontaohjeiden mukaisesti tutkittu rakeisuus on ollut vaatimusten mukainen. 5) Rakeisuuden perusteella BeM on ollut routimatonta työmaalle toimitettaessa. 2002 Oulun yliopistolla teetettyjen routanousukokeiden perusteella työmaalla käytetty lujittunut BeM ei roudi. 6) BeM:n humusasteen (humuspitoisuus) määritettiin olevan välillä 0-1 betonissa käytettävän kiviaineksen humusasteen vaatimuksen ollessa 0-1. 7) Kloridianalyysit osoittavat, että kloridien pitoisuus on selvästi noussut rakenteiden BeM-kerroksen näytteissä, 0 % →0,03-0,17 %. 8) Kiertotien ja kiertoliittymän päällysteiden sideainepitoisuuden ja rakeisuuden perusteella kummankaan asfaltin suhteituksessa ei ole tavoiteltu vettä läpäisemätöntä asfalttia. Tiiviin asfaltin käyttäminen BEM lujittumista hyödynnettyäessä oli esitetty ohjeissa. (Ramboll 2003)

6. Kantavuusmittaukset: Kohteessa on tehty kantavuusmittauksia 05/2002, 06/2003 ja 05/2004 - taulukossa 67 yhteenveto. 05/2002 mitatut kantavuudet edustavat rakenteiden, joiden lujittuminen on kesken, kantavuuksia. 2003 ja 2004 mitatut kantavuudet edustavat lujittuneiden rakenteiden kantavuuksia. Syksyllä 2001 BeM+maHk-rakenteet eivät olleet lujittuneita ennen liikenteelle avaamista, joten ko. rakenteiden kantavuus on ollut syksyllä merkittävästi keväällä 2002 mitattua alhaisempi ja urakoitsija ei ole osoittanut mittaustuloksilla, että rakenteiden kantavuus olisi ollut tuolloin riittävä liikenteelle avaamiseksi.

2002-2004 kantavuusmittaustulosten perusteella voidaan havaita mm.: 1) murskerakenteen kantavuus ei ole käytännössä muuttunut 2002 => 2004 (2C ja 4C). 2) MaHk+BeM -rakenteen kantavuus on ollut murskerakennetta alhaisempi 05/2002 (3B ja 4B). 3) MaHk-rakenteiden kantavuus on kasvanut 2,5-3 -kertaiseksi 2002 => 2004 (2A, 3B ja 4B). 4) MaHk+BeM-rakenteen (2A), joka on avattu liikenteelle kesällä 2002, kantavuus on ollut riittävä liikenteelle avattaessa. Rakenne 2A on saanut lujittua rauhassa ennen liikenteelle avaamista, joten sen kantavuus on ollut riittävä ja se on kestänyt erittäin hyvin liikennekuormituksen.

Taulukko 63. Kiertotien, Vt 8:n lopullisen ajoradan sekä kiertoliittymän etelä- ja pohjoispuoleisen osuuden lämpötilakorjatut kantavuudet pudotuspainolaitteella mitattuna 27.5.2002, 9.6.2003 ja 31.5.2004 (Ramboll 2004).

Rakenne	keskiarvo 27.5.2002	keskiarvo 9.6.2003	keskiarvo 31.5.2004	muutos 2002-2003	muutos 2002-2004
Vt 8 ajorata, BeM + MaHk (2A)	395 MPa	1059 MPa	1036 MPa	+664 MPa	+641 MPa
Vt 8 ajorata, murske (2C)	-	440 MPa	437 MPa	-	-
Vt 4 ajorata, BeM ⁺ + MaHk (3B, 4B)	369 MPa	1540 MPa	1743 MPa	+1171 MPa	+1365 MPa
Vt 4 ajorata, murske (4C)	423 MPa	423 MPa	447 MPa	0 MPa	+24 MPa

* BeM korvattu kalliomurskeella 06/2002. Vt 8 = 2 / Vt 4 Ouluun = 3 / Vt 4 Jyväskylään = 4 / BeM + MaHk = A / BeM →murske + MaHk = B / Murske = C

7. Yhteenveto: Rakentamisen jälkeen tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan todeta ja päätellä (työnaikaisen laadunvalvonnan tuloksia ei käytettävissä): 1) kiertotien AB- ja MaHk-kerrokset ovat selvästi suunniteltua ohuempia ja koko rakenne on hyvin ohut liikennekuormitukseen nähden. 2) Kiertoliittymän BeM-kerros on rakennettu myöhään syksyllä ja avattu pian liikenteelle. 3) Kiertoliittymän BeM-kerros on paikoin selvästi suunniteltua ohuempi. 4) Lujittuvilla materiaaleilla rakennettujen rakenteiden kantavuus liikenteelle avattaessa oli tarkaislaskentojen perusteella alhainen (mittaustuloksia ei ole esitetty). 5) MaHk+BeM -rakenne, joka on saanut lujittua rauhassa ennen liikenteelle avaamista, on toiminut moitteettomasti.

Kirjallisuus:

SCC Viatek 2003. *Selvitys vt4/vt8-liittymässä (Haaransilta-Kiviniemi) käytetyissä betonimurske ja masuunihiekkarakenteissa havaittujen vaurioiden syistä.* 11.8.2003.

Ramboll Finland Oy 2004. *Selvitys vt4/vt8-liittymässä (Haaransilta-Kiviniemi) käytetyissä betonimurske ja masuunihiekkarakenteissa havaittujen vaurioiden syistä. Kantavuusmittaukset 2004.* 7.9.2004.



ISSN 2490-0982
ISBN 978-952-317-678-2
www.vayla.fi