



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TIMO TARKKIO
LENTOTUHKAN PITKÄAIKAISTOIMIVUUS TEIDEN JA KENTTIEN
PÄÄLLYSRAKENTEISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa 9. huhti-
kuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

TARKKIO, TIMO: LENTOTUHKAN PITKÄAIKASTOIMIVUUS TEIDEN JA KENTTIEN PÄÄLLYSRAKENTEISSA

Diplomityö, 138 sivua, 4 liitesivua

Syyskuu 2014

Pääaine: Yhdyskuntatekniikka

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja

Avainsanat: Lentotuhka, tierakenne, kenttärakenne, pitkäaikaistoimivuus

Tuhkia on hyötykäytetty tie- ja kenttärakenteissa jo kymmeniä vuosia ja erilaisia koerakenteita on rakennettu runsaasti. Koerakenteita on yleisimmin seurattu muutamia vuosia rakentamisen jälkeen, mutta pitkäaikaista seurantaa ei ole vielä laajemmin tehty. Tämän työn puitteissa on tutkittu 1990-luvun lopulla ja 2000-luvun alussa rakennettuja koekohteita, joissa on käytetty erilaisia kivihiilenpolton ja seospolton lentotuhkia teiden tai kenttien päällysrakenteissa. Tutkitut lentotuhkarakenteet ovat pääosin erilaisin seosainein stabiloituja massiivilentotuhkarakenteita sekä kerrosstabiloituja lentotuhkarakenteita.

Työn tavoitteena oli tutkia lentotuhkarakenteiden pitkäaikaistoimivuutta teiden ja kenttien päällysrakenteissa. Työn tutkimusosiossa analysoitiin kuutta eri-ikäistä ja erilaisin lentotuhkarakentein toteutettua koekohdetta kuntokartoitusten, kantavuusmittausten, ja rakennetutkimusten avulla. Rakennetutkimuksista saatuja näytekappaleita tutkittiin laboratoriossa. Saatuja tutkimustuloksia verrattiin aikaisemmin tehtyyn seurantaan. Lisäksi työssä takaisinlaskettiin kahdesta kohteesta tuhkarakenteen E-moduuli käyttäen Odearkin laskentakaavaa ja kimmoteoriaa.

Työssä saatujen tulosten perusteella voidaan pitkäaikaistoimivuudesta todeta, että lentotuhkarakenteilla on ollut myönteinen vaikutus tutkittuihin tie- ja kenttärakenteisiin. Lähes poikkeuksetta lentotuhkarakenteet ovat parantaneet päällysteen päältä mitattuja kantavuuksia ja kantavuudet ovat pysyneet lähtötilannetta paremmalla tasolla ja tavoitekantavuuksien yläpuolella. Tehtyjen puristuskokeiden perusteella voidaan todeta, että tuhkarakenteiden puristuslujuudet olivat pääsääntöisesti pysyneet suunnitellulla tasolla. Tutkimuksissa huomattiin kuitenkin, että kantavuuksissa ja puristuslujuuksissa saattoi olla suuria vaihteluja, jotka taas saattoivat johtua monista ympäristöllisistä, fysikaalisista ja kemiallisista tekijöistä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

TARKKIO, TIMO: LONG-TERM FUNCTIONALITY OF FLY ASH IN ROAD AND FIELD STRUCTURES

Master of Science Thesis, 138 pages, 4 Appendix pages

September 2014

Major: Earth and Foundation Structures

Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: fly ash, road structure, field structure, long-term behaviour

Ashes have been recycled in road and field structures for many years and several test sites have been made. Usually the test structures have been followed-up couple of years after the construction and there is only little information about the fly ash long-term behavior in structures of roads and fields. In this study, fly ash structures which were built in the late 1990's and the early 2000's have been researched after several years. Research focuses on the road structures where fly ashes from the combustion of the coal and biofuel have been used.

The goal of this study was to examine the long-term behavior of fly ashes in low-volume road structures and field structures. In this study five different low-volume roads and one field were analysed using falling weight deflometer and visual survey. Some specimens from fly ash layers were also tests in laboratory. Additionally, the E-modules of fly ash structures were backcalculated using the Odemarks mathematical formula and Hooke's theory.

According to this study the fly ash structures have improved the bearing capacity of the road and field structures and after several years of usage the bearing capacities were almost invariably bigger than the designed value. Also the measured strength of the drilled test site samples were within designed values. However, there was quite a lot variation in the results which can be caused by various environmental, physical and chemical factors.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Fortum Power and Heat Oy:n, Helsingin sataman ja Ramboll Finland Oy:n rahoituksella. Yhteistyössä mukana on ollut myös Tampereen teknillisen yliopisto. Työn kokeellinen osio on tehty Ramboll Finland Oy:n Luopioisten toimipisteeseen järjestämänä ja tulosten käsittely sekä kirjoitustyö Ramboll Finland Oy:n Porin toimipisteessä.

Diplomityön tekemistä on ohjannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet:

Ria Kiuru	Fortum Power and Heat Oy
Katri Nyberg	Fortum Power and Heat Oy
Miika Leinikka	Fortum Power and Heat Oy
Pentti Lahtinen	Ramboll Finland Oy
Harri Jyrävä	Ramboll Finland Oy
Marjo Ronkainen	Ramboll Finland Oy
Pauli Kolisoja	Tampereen teknillinen yliopisto

Haluan kiittää ohjausryhmää avusta, materiaaleista ja kommenteista, joita olen työn aikana saanut. Lisäksi haluan kiittää Tero Jokista ja Ari Mäkistä (Ramboll Finland Oy) työpanoksesta ja avusta kenttä- ja laboratoriotutkimusten teossa. Kiitos myös Valter Wigrenille (Ekolite Oy) avusta lähtötietojen hankinnassa. Suuri kiitos Ramboll Finland Oy:n Porin Infrasuunnitteluyksikön työntekijöille, eli työkavereilleni henkisestä tuesta ja kannustuksesta työn aikana. Erityiskiitos Jouni Aliselle (Ramboll Finland Oy) työntöön mahdollistamisesta.

Lopuksi vielä erittäin suuri kiitos perheelleni ja ystäväilleni.

Porissa syyskuussa 2014

Timo Tarkkio

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	viii
1 Johdanto	1
1.1 Työn taustaa	1
1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset	2
1.3 Työn toteutustapa	2
2 Energiateollisuudessa syntyvät tuhkat ja rikinpoistotuotteet	4
2.1 Tuhkalaadut ja niiden syntymäärät Suomessa	4
2.2 Tuhkien geotekniset ominaisuudet	5
2.3 Lentotuhkien kemiallinen koostumus	9
2.4 Lentotuhkien lujittumisominaisuudet	10
2.5 Tuhkien ympäristökelpoisuus ja hyötykäyttöä koskeva lainsäädäntö	12
2.6 Tuhkien tekninen luokittelu	13
3 Tuhkarakentamisen sovellutukset tie- ja kenttärakentamisessa	14
3.1 Suomen tieverkon yleispiirteet ja tämänhetkinen tila	14
3.2 Liikennealueiden yleiset rakenneperiaatteet	14
3.2.1 Alusrakenne	15
3.2.2 Päällysrakenne	15
3.3 Erilaiset tuhkarakenneratkaisut	16
3.3.1 Massiiviset lentotuhkarakenteet	16
3.3.2 Lentotuhkapohjaisella sideaineseoksella stabiloidut päällysrakenteet ..	18
3.3.3 Pohjatuhka- ja pohjahiekkakerrosrakenteet	20
3.4 Päällysrakenteen mitoitus	20
3.4.1 Kuormituskestävyysmitoitus	20
3.4.2 Routamitoitus	23
3.5 Tie- ja kenttärakenteiden vaurioituminen	24
4 Koekohteet	26
4.1 Inkoo	26
4.1.1 Koekohteen kuvaus	26
4.1.2 Koerakenteet	28
4.1.3 Aikaisemmat tutkimukset	30
4.2 Jämsä	31
4.2.1 Koekohteiden kuvaus	31
4.2.2 Koerakenteet	34
4.2.3 Aikaisemmat tutkimukset	37
4.3 Korja	38
4.3.1 Koekohteen kuvaus	38
4.3.2 Koerakenteet	39
4.3.3 Aikaisemmat tutkimukset	41

4.4	Kukkia.....	41
4.4.1	Koekohteen kuvaus.....	41
4.4.2	Koerakenteet.....	42
4.4.3	Aikaisemmat tutkimukset.....	44
4.5	Leppävirta.....	44
4.5.1	Koekohteen kuvaus.....	44
4.5.2	Koerakenteet.....	45
4.5.3	Aikaisemmat tutkimukset.....	46
4.6	Vuosaari.....	47
4.6.1	Koekohteen kuvaus.....	47
4.6.2	Koerakenteet.....	47
4.6.3	Aikaisemmat tutkimukset.....	48
5	Tuhkarakennuskohteille vuonna 2013 tehdyt seurantatutkimukset.....	50
5.1	Kenttätutkimukset.....	50
5.1.1	Kantavuusmittaukset.....	50
5.1.2	Kuntokartoitus.....	53
5.1.3	Rakennetutkimus.....	54
5.2	Laboratoriotutkimukset.....	55
5.2.1	Yksiaksiaalinen puristuslujuus.....	55
5.2.2	pH-mittaus ja sähkönjohtavuus.....	57
5.3	E-moduulin takaisinlaskenta.....	57
5.3.1	Odemarkin laskentakaavan käyttö takaisinlaskennassa.....	57
5.3.2	Takaisinlaskenta käyttäen Hooken lakia.....	58
6	Tuhkarakennuskohteiden seurantatutkimustulokset ja niiden vertailu.....	60
6.1	Inkoo.....	60
6.1.1	Kantavuudet.....	60
6.1.2	Kuntokartoitus ja rakennetutkimus.....	64
6.1.3	Puristuslujuus.....	68
6.2	Jämsä.....	70
6.2.1	Kantavuudet.....	70
6.2.2	Kuntokartoitus ja rakennetutkimus.....	74
6.2.3	Puristuslujuus.....	80
6.3	Koria.....	82
6.3.1	Kantavuudet.....	82
6.3.2	Kuntokartoitus ja rakennetutkimus.....	86
6.3.3	Puristuslujuudet.....	89
6.4	Kukkia.....	90
6.4.1	Kantavuudet.....	90
6.4.2	Kuntokartoitus ja rakennetutkimus.....	93
6.4.3	Puristuslujuudet.....	97
6.5	Leppävirta.....	98
6.5.1	Kantavuudet.....	98

6.5.2	Kuntokartoitus ja rakennetutkimus.....	101
6.5.3	Puristuslujuudet	106
6.6	Vuosaaren satama.....	107
6.6.1	Kantavuudet	107
6.6.2	Kuntokartoitus ja rakennetutkimus.....	111
6.6.3	Puristuslujuudet	114
6.7	E-moduulien takaisinlaskenta	116
6.7.1	Kerrosstabiloidun tuhkarakenteen E-moduuli	116
6.7.2	Massiivisen lentotuhkakerroksen E-moduuli.....	120
6.8	Tulosten yhteenveto	122
6.8.1	Kantavuudet	122
6.8.2	Puristuslujuudet	127
6.8.3	Mitoituksen takaisinlaskenta	129
7	Loppupäätelmät.....	131
	Lähteet.....	134
	Liite 1: Vuosaaren satamakentän tutkimuskartta	139
	Liite 2: Vuosaaren satamakentän tuhkarakenteen E-moduulin takaisinlaskenta	140

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Merkinnät

d	taipuma, m
E	kimmomoduuli, MPa
$E_{50\text{-sek}}$	sekanttimoduuli, MPa
$E_{50\text{-tan}}$	tangenttimoduuli, MPa
E_1	ensimmäisellä mittauksella saatu kantavuusarvo, MPa
E_2	toisella mittauksella saatu kantavuusarvo, MPa
h	kerrospaksuus, m
T	lämpötilakorjauskerroin
w	vesipitoisuus, %
z	laskentasyvyys, m
ε	suhteellinen muodonmuutos
σ	jännitys, kPa
σ_0	tasainen pintapaine, kPa
σ_z	pystysuora normaalijännitys, kPa
τ	leikkausjännitys, kPa
v	poisson-luku

Lyhenteet

AB	asfalttibetoni
AFm	kalsiummonosulfaattialuminaattihydraatti
Aft	ettringiitti
BCI	base curvature index
CASH	kalsiumaluminaattihydraattisilikaatti
CAHx	kalsiumaluminaattihydraatti
CSH	kalsiumsilikaattihydraatti
Hk	hiekkä
JS-koe	jäädytys-sulatuskoe
KaM	kalliomurske
KKL	kuormituskertaluku
LT	lentotuhka
pl.	paalu
plv.	paaluväli
PPL	pudotuspainolaite
RPT	rikinpoistonlopputuote
SCI	surface curvature index
SP %	spreadability

Sr	sora
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
YSe	yleissementti

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustaa

Liikkumistarve on ihmisen perusominaisuus. Tiet ja kadut luovat edellytykset eri kuluneuvojen jatkuvalla liikkumiselle ja sitä myötä ihmisten ja tavaroiden kuljettamiselle. Tierakenteiden parantamiseksi on pyritty kehittämään uusia kustannustehokkaita menetelmiä ja uusiomateriaalien hyötykäyttö on yksi paljon tutkittu menetelmä.

Tuhkat muodostavat merkittävän mahdollisuuden uusiomaarakentamisen edistämisessä. Tuhkia muodostuu Suomessa noin 1,5 miljoonaa tonnia vuodessa. Hiilen, turpeen ja puupolttoaineiden polton energia muodostaa 44 % osuuden energian kokonaiskulutuksesta. (Tilastokeskus 2013) Energiatuotannossa syntyvän tuhkan määrä ja laatu riippuu polttoprosessista, polttoaineesta ja tuhkanerotustekniikasta. Eniten Suomessa syntyy kivihiilen- ja biopolton lentotuhkaa, mutta polttolaitoksissa syntyy myös pohjatuhkaa sekä rikinpoiston lopputuotetta. Näitä kaikkia voidaan hyödyntää maarakentamisessa. Muodostuvan tuhkan määrä on pieni verrattuna vuosittain käytettävän kiviaineksen määrään, mutta paikallisesti tuhkien hyötykäytöllä on mahdollisuus saavuttaa monia etuja. Hyötyvaikutus korostuu erityisesti tiheästi asutuilla alueilla, joissa kiviainekset joudutaan hankkimaan pitkän kuljetusmatkan päästä.

Tuhkia pystytään käyttämään monipuolisesti maarakentamisessa. Tuhkia voidaan käyttää joko sellaisenaan tai seosmateriaalina yhdessä muiden teollisuuden sivutuotteiden tai kiviainesten kanssa erilaisissa täytöissä sekä teiden ja kenttien rakenteissa. Materiaalina tuhkat eroavat tavanomaisesta kiviaineksestä sementinkaltaisten lujittumisominaisuuksiensa sekä huokoisen rakeidensa puolesta. Erityisesti lentotuhka on lujittuva materiaali, jonka lujittumista voidaan nopeuttaa erilaisilla aktivaattoreilla, kuten sementillä, kalkilla tai rikinpoiston lopputuotteella. Tuhkia ei voida kuitenkaan käyttää aivan vapaasti maarakentamisessa niiden jäteluokituksen vuoksi. Tuhkien ympäristökelpoisuus tulee arvioida tutkimalla haitta-aineiden kokonaispitoisuudet sekä liukoisuudet. Jos niin sanotun MARA-asetuksen (VNa 403/2009) mukaiset raja-arvot alittuvat, voidaan tuhkaa käyttää asetuksessa mainittuihin sovelluksiin ilmoitusmenettelyllä.

Tuhkien tehokas hyötykäyttö vaatii perehtymistä materiaaleihin, rakenteiden mitoittamiseen sekä työtekniikkaan. Tuhkien käyttöä on tutkittu jo 80-90-luvuilta asti ja erilaisia tuhkarakenteita hyödyntäen on rakennettu tie- ja kenttärakentamisen pilottikohteita eri puolille Suomea. Yleinen käytäntö on ollut, että pilottikohteita on seurattu muutaman vuoden ajan rakentamisen jälkeen. Näin toteutetulla seurannalla on yleensä varmistettu

rakentamisen laatua, mutta olennainen tieto tuhkarakenteiden pitkäaikaiskestävyydestä on jäänyt selvittämättä.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tämän työn päätavoitteena on tutkia lentotuhkarakenteiden pitkäaikaistoimivuutta tie- ja kenttärakenteissa ja näin arvioida lentotuhkien käyttöikää liikennealueiden rakenteessa. Tutkittavaksi on valittu kuusi hyvin tuhkarakentamista edustavaa koekohtetta Inkoosta, Jämsästä, Korialta, Leppävirralta ja Luopioisista sekä Vuosaaren satamasta. Kohteista Vuosaaren satama edustaa kenttärakentamista ja muut ovat tiekohteita, joista Inkoo ja Jämsä ovat asfaltoituja tiekohteita. Työssä tutkitaan lentotuhkapohjaisilla sideaineseoksilla stabiloituja kantavia kerroksia sekä massiivisia stabiloituja tai stabiloimattomia lentotuhkakerroksia liikennealueen päällysrakenteessa. Sideaineina lentotuhkan lisäksi koekohteissa on käytetty sementtiä, kalkkia ja rikinpoistolopputuotetta. Pohjatuhkan käyttöä ei ole tutkittu tämän työn puitteissa. Käytetyt lentotuhkat ovat peräisin eri polttolaitoksilta Suomesta, joten poltetut materiaalit ja polttomenetelmät sekä varastointi- ja kuljetusmenetelmät vaihtelevat kohteittain.

Työssä tuhkarakenteita tarkastellaan aikaisempaa pidemmän ajanjakson päästä rakentamisesta. Tutkimuksissa selvitetään aikaisemmin rakennettujen kohteiden nykytila uusimalla aikaisemmat kohdetutkimukset ja vertaamalla nykytilannetta rakentamisen jälkeiseen tilanteeseen. Lisäksi tuhkarakenteesta saatuja tuloksia verrataan perinteiseen rakenteeseen. Näin arvioidaan tehtyjen tuhkarakenteiden mitoituksen oikeellisuutta sekä tarkastellaan tuhkarakenteiden pitkäaikaiskestävyyttä.

Tutkimuskohteissa on aikaisemmin tehty vauriokartoituksia ja kantavuusmittauksia sekä tuhkarakenteista on otettu näytekappaleita laboratoriotutkimuksia varten. Nämä tiedot ovat käytettävissä lähtötietoina tuhkarakenteiden käyttöikää arvioitaessa ja tämän työn puitteissa nämä tutkimukset uusitaan. Kohteissa on aikaisemmin tehty myös ympäristönäytteiden ottoa, mutta tuhkarakenteiden ympäristövaikutusten analysointi on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Tässä työssä ei myöskään tutkita lämpötilamuutoksia tuhkarakenteissa ja niiden alapuolella, joten tuhkarakenteiden routamitoituksen tarkastelu tehdään ainoastaan vauriokartoituksen perusteella.

1.3 Työn toteutustapa

Tämä diplomityö tehdään Fortum Power and Heat Oy:n, Helsingin sataman, Ramboll Finland Oy:n sekä Tampereen teknillisen yliopiston yhteistyössä. Työhön sisältyy kenttä- ja laboratoriotutkimuksia, joista kenttätutkimuksia ovat kantavuuskokeet, vauriokartoitukset sekä rakennetutkimukset, ja laboratoriotutkimuksina koekappaleille tehtävä puristuslujuuden määrittäminen sekä pH-arvon ja sähkönjohtavuuden mittaaminen.

Teiden kantavuusmittaukset tekee ulkopuolinen konsultti KUAB FWD 50 pudotuspainolaitetta käyttäen. Teiden kuntokartoitukset, rakenne- sekä laboratoriotutkimukset tekee Ramboll Finland Oy. Kuntokartoitus toteutetaan silmämääräistä vauriokartoitusmenetelmää käyttäen ja samassa yhteydessä tehdään rakennetutkimukset, joissa tuhkarakenne kaivetaan esiin näytteenottoa ja tarkastelua varten suunnitelluista tutkimuspisteistä. Kenttätutkimusten suunnittelu ja toteutus muodostavat oleellisen osan tätä diplomityötä.

Kantavuuskokeista saatujen tulosten perusteella takaisinlasketaan tuhkarakenteen E-moduuli Odemarkin laskentakaavaa käyttäen. Lisäksi pudotuspainolaitteella tehdystä kantavuusmittauksesta saadaan analysoitavaksi tietoa tienpinnan taipumasta kuormituksessa, minkä perusteella voidaan arvioida tuhkarakenteen jäykkyyttä. Tuhkarakenteesta poratuille koekappaleille tehdään yksiaksiaalinen puristuskoe, jonka avulla pystytään analysoimaan tuhkarakenteen lujuuden kehitystä. Puristuskokeesta saadusta muodonmuutos-jännitys – kuvaajasta takaisinlasketaan puristuskappaleen kimmomoduuli. Vauriokartoitusten perusteella arvioidaan tiekohteiden toimivuutta ja palvelutasoa.

2 ENERGIATEOLLISUUDESSA SYNTYVÄT TUHKAT JA RIKINPOISTOTUOTTEET

2.1 Tuhkalaadut ja niiden syntymäärät Suomessa

Tuhka on polttoprosessin sivutuote ja se muodostuu polttoprosessissa palamattomista aineista. Tuhkalaadut luokitellaan Suomessa polttoprosessin polttoainekoostumuksen mukaan esimerkiksi kivihiilen, turpeen tai puun polton tuhkiin. Voidaan puhua myös seospolton- sekä rinnakkaispolton tuhkista. Seospoltolla käsitetään tavanomaisten polttoaineiden seosten polttoa ja rinnakkaispoltolla ymmärretään jätteiden ja tavanomaisten polttoaineiden seosten polttamista.

Poltossa syntyvien tuhkien kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin sekä määriin vaikuttavat käytettävän polttoaineen koostumus ja laatu. Lisäksi polttotekniikka ja –parametrit, kuten lämpötila, palamisnopeus ja ilman määrä sekä kattiloiden kunto vaikuttavat tuhkan laatuun. Myös tuhkan talteenottojärjestelmillä on merkitystä. (Korpijärvi, 2009)

Sillä, mitä materiaalia poltetaan, on suuri vaikutus syntyvän tuhkan määrään ja laatuun. Puun polton tuhkat eroavat kemialliselta koostumukseltaan kivihiilen ja turpeen tuhkista, kuten taulukosta 2.4 voidaan nähdä. Biopolton lentotuhkat eroavat kivihiilen lentotuhkista myös rakenteellisesti. Lisäksi puun tuhkapitoisuus on tavallisesti pienempi kuin muiden kiinteiden polttoaineiden. Kuorettoman runkopuun tuhkapitoisuus on tavallisesti 0,5 %. Kuitenkin kuori, lehdet ja neulaset lisäävät puun poltossa syntyvän tuhkan määrää, havupuun kuoren tuhkapitoisuuden ollessa 2 %. Turpeen tuhkapitoisuus on keskimäärin 5 – 6 % ja kivihiilen 15 %. (Alakangas, 2000)

Keräyspaikan mukaan tuhkat voidaan jakaa pohjatuhkaan, pohjahiekkaan ja lentotuhkaan. (Tuhkakäsikirja, 2012) Hienojakoinen lentotuhka erotetaan savukaasuista erilaisin menetelmin kun pohjatuhka ja pohjahiekka kerätään polttokattilan pohjalta. Polttotekniikoista pöly- ja leijukerrospoltoissa syntyvä tuhka on pääasiassa (80 - 100 %) lentotuhkaa. (Mäkelä, 2000)

Kivihiilen poltossa käytettävien hiilipölykattilan ja leijupetikattilan pohjatuhkat eroavat toisistaan huomattavasti. Pölypolton sivutuotteena syntyvä pohjatuhka on kivetön materiaali, jonka raekoko vaihtelee välillä 0,002...16 mm riippuen poltetun hiilen laadusta. Leijukerrospoltoissa kivihiili poltetaan hiekka-/sorakerroksen päällä ja näin leijupetikat-

tilan pohjatuhka sisältää luonnonkiviainesta. Usein termillä pohjatuhka tarkoitetaan hiilipölykattilan pohjatuhkaa ja termillä pohjahiekka leijupetikattilan pohjalta kerättävää tuhkaa. (Hakari, 2007) Näin myös tässä työssä.

Kivihiilen poltossa sivutuotteena syntyy myös rikinpoistolopputuotetta (RPT). Poltto-prosessissa savukaasuihin vapautuu vaihteleva määrä rikkiä lentotuhkahiukkasten ta-voin ja savukaasuja puhdistetaan rikinpoistoprosessin avulla. Rikinpoistoprosessissa syntyvän lopputuotteen laatu määräytyy käytettävän menetelmän mukaan. Määrässä ri-kinpoistomenetelmässä syntyy kipsiä, joka useimmiten hyödynnetään kipsilevyteolli-suudessa. Puolikuivamenetelmässä kuumaan polton savukaasuun sumutetaan erillisessä reaktorissa hienojakoista alkalista lietettä, esimerkiksi kalsiumoksidista ja vedestä val-mistettua kalsiumhydroksidilietettä. Puolikuivan menetelmän lopputuotteena syntyvää kalsiumsulfii-tin, kipsin, kalsiumhydroksidin ja lentotuhkan seosta kutsutaan rikinpoisto-lopputuotteeksi.

Tuhkia muodostuu Suomessa noin 1,5 miljoonaa tonnia vuodessa. (Tuhkakäsikirja, 2012) Kivihiilen poltosta muodostuvia tuhkia syntyy vuositasolla noin 500 000 – 1 000 000 tonnia, joista lentotuhkaa on keskimäärin 580 000 tonnia. Puun ja turpeen polton tuhkia syntyy vuosittain noin 500 000 tonnia, joista suurin osa on seospolton tuhkaa. Puhdasta turvetuhkaa on arvioitu syntyvän noin 50 000 tonnia vuodessa ja puhdasta puutuhkaa noin 50 000 – 100 000 tonnia vuodessa. (Finncao, 2005; Korpijärvi, 2009) Fortum Oyj:n arviot heidän voimalaitoksissaan syntyvistä sivutuotteista on esitetty tau-lukossa 2.1.

Taulukko 2.1. Arvio Fortum Oyj:n voimalaitoksissa syntyvistä tuhista (Kiuru, 2013)

Tuhkalaatu	Määrä [t/a]
Kivihiilen lentotuhka	90 000...200 000
Seospolton lentotuhka	15 000...20 000
Rikinpoistonlopputuote	10 000...20 000
Kipsi	10000...20 000
Pohjatuhka	25 000...35 000
Pohjahiekka	10 000...15 000

2.2 Tuhkien geotekniset ominaisuudet

Kivihiilen lentotuhka on hienorakeista jauhemaista, erikokoisista pallomaisista hiukka-sista ja pienistä neulamaisista kiteistä koostuvaa materiaalia (Fortum, 2013). Rikinpois-totuote on teknisiltä ominaisuuksiltaan lentotuhkan kaltaista. Kivihiilen pohjatuhka on karkeampaa, rakeisuudeltaan karkeaa hiekkaa vastaavaa materiaalia. Rakeet ovat sär-mikkäitä ja pinnaltaan huokoisia. (Mäkelä, 2003)

Turpeen lentotuhka on raekooltaan kivihiilen lentotuhkan kaltaista, mutta tuhka sisältää raemuodoltaan epämääräisempiä sauvamaisia ja hiutalemaisia hiukkasia. Puutuhka on hienorakeisempaa kuin turvetuhka, mutta useimmiten puuta ja turvetta poltetaan sekaisin, joten puun ja turpeen seospolton tuhka on sekoitusta puu- ja turvetuhkista.

Tuhkien ominaisuudet on selvitettävä aina tapauskohtaisesti. Taulukkoon 2.2 on koottu lento- ja pohjatuhkien geoteknisten ominaisuuksien tyypillisiä ominaisarvoja. Taulukkoon 2.3 on eritelty eräiden kivihiilenpolton, puunpolton ja turpeenpolton lentotuhkien teknisiä ominaisuuksia.

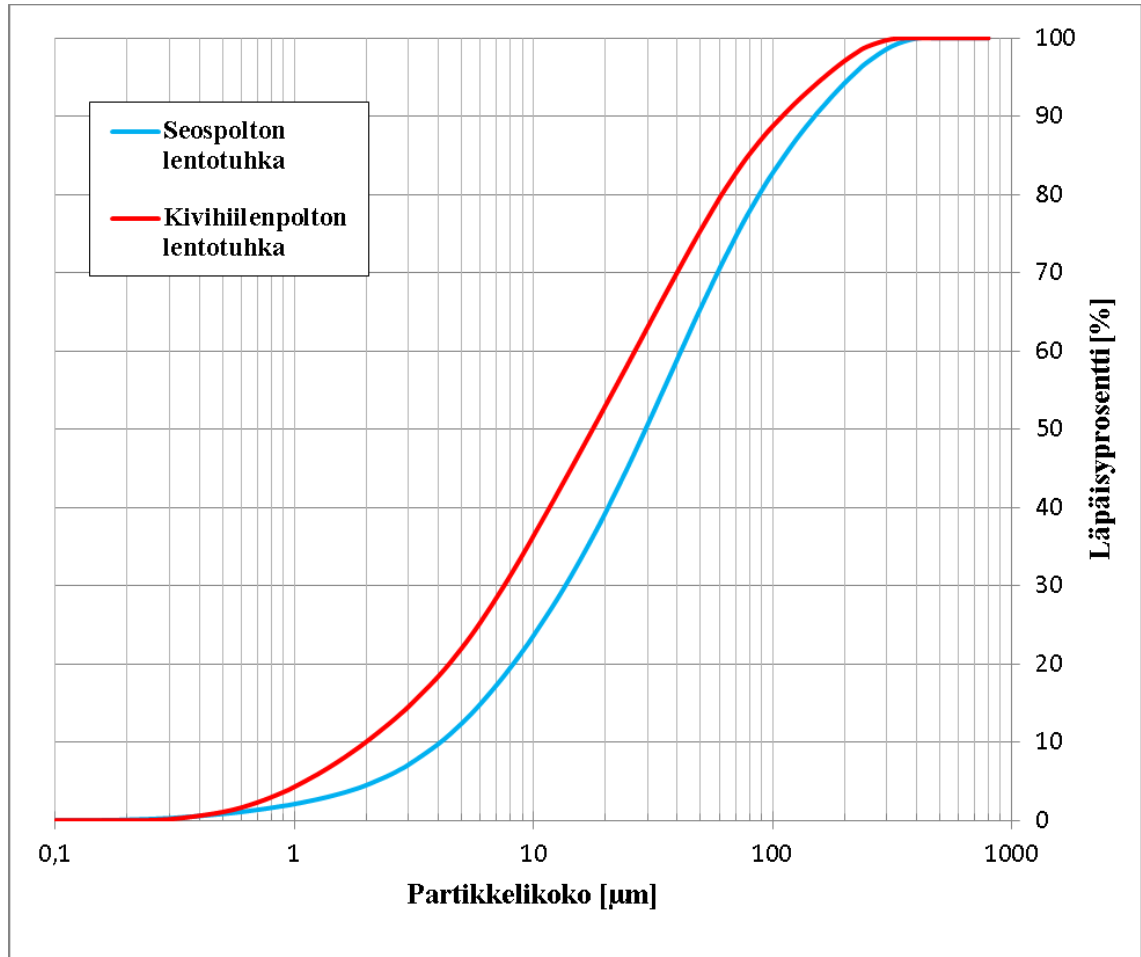
Taulukko 2.2. Tuhkien geoteknisten ominaisuuksien tyypillisiä ominaisarvoja. (Tuhkäsikirja, 2012 ; Hakari, 2007)

Ominaisuus		Lentotuhka	Pohjatuhka	Pohjahiekka
Rakeisuus [mm]		0,002–0,1 (siltti)	0,002–16 (hiekk)	0,063–32 (sora)
Optimivesipitoisuus [%]		20–50	16–24	11–17
Max. kuivairtoteiheyden [kg/m ³]		1100–1400	1000–1500	1500
Märkäirtoteiheyden tiivistetynä [kg/m ³]		1300–1500	1250–1800	-
Kitkakulma [°]	lujittumaton	28–36	39–53	-
	lujittunut	49–77		
Koheesio [kPa]	lujittumaton	23–47	10–30	-
	lujittunut	64–490		
Vedenläpäisevyys [m/s]	lujittumaton	10 ⁻⁷ –10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ –10 ⁻⁵	10 ⁻⁴ –10 ⁻³
	lujittunut	10 ⁻⁸ –10 ⁻⁶		
Hehikutushäviö [%]		1–15	-	-
Lämmönjohtavuus [W/mK]	sula	0,4–0,6	0,9	-
	jäätynyt	0,8		
Segregaatiopotentiaali [mm ² /Kh]		0,05–5	< 0,2	-

Taulukko 2.3. Eräiden lentotuhkien teknisiä ominaisuuksia (Lahtinen, 2001; Kari, 2005)

Ominaisuus	Kivihiili- lentotuhka	Puulento- tuhka	Turvelento- tuhka
Optimivesipitoisuus [%]	13 - 29	30 - 45	20 - 79
Max. kuivairtoteiheyden [kg/m ³]	1180–1580	1000–1300	590 - 1500
Ominaispinta-ala [m ² /g]	0,36 – 17,3	2,6 - 85	-
Hehikutushäviö [%]	1,5 – 17,5	5 - 34	-

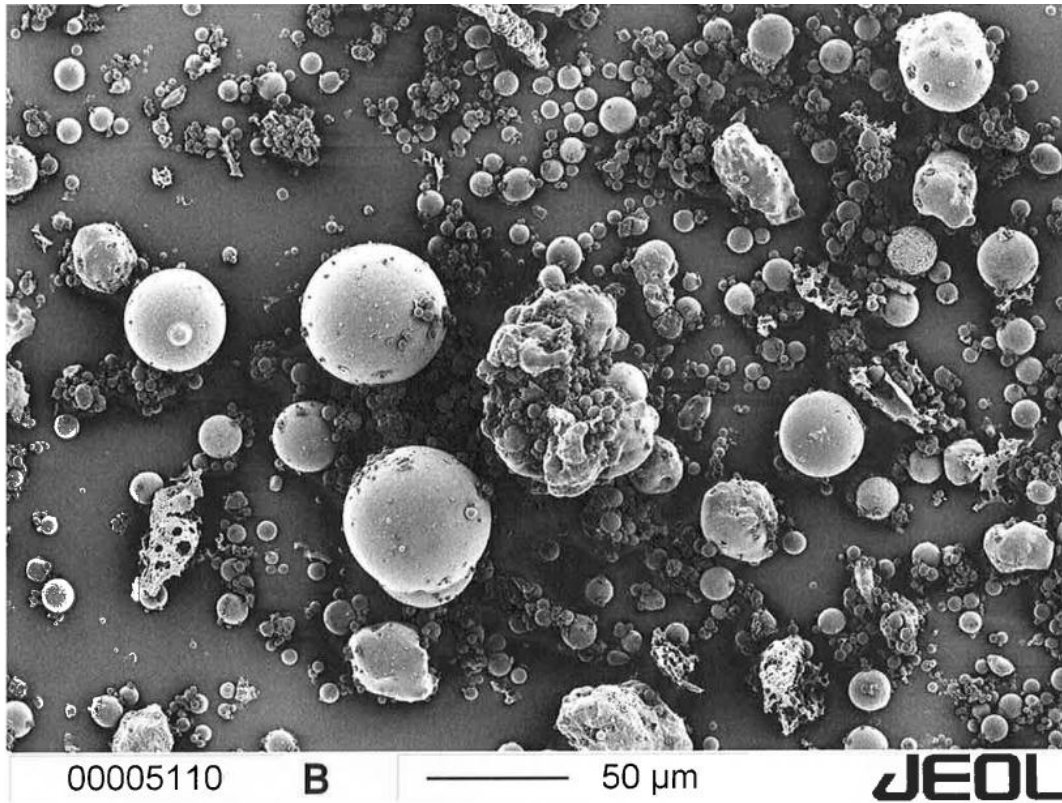
Lentotuhkan partikkelien muodolla, koostumuksella ja partikkelijakaumalla on suuri merkitys lentotuhkan optimivesipitoisuuteen, pakkautuvuuteen ja lujittumisominaisuuksiin. Kuvassa 2.1 on esitetty esimerkit seospolton lentotuhkan ja kivihiilenpolton lentotuhkan partikkelijakaumista.



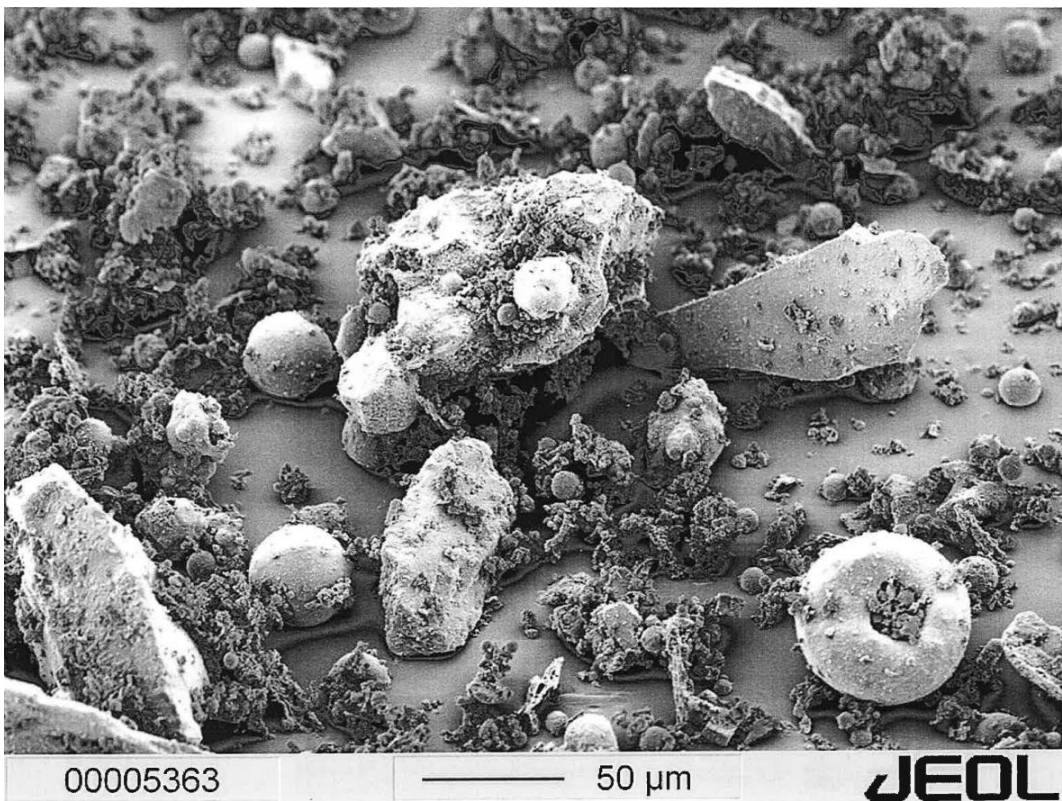
Kuva 2.1. Seospolton ja kivihiilenpolton partikkelijakaumat (Kiuru, 2013)

Kuvasta nähdään, että kivihiilenpolton lentotuhka on raekooltaan hienompaa kuin seospolton lentotuhka. Esimerkiksi sementin lisäaineena rakeisuudeltaan hienomman lentotuhkan on todettu osallistuvan nopeammin ja täydellisemmin sementin reaktioihin kuin rakeisuudeltaan karkeamman lentotuhkan. (Kari, 2005)

Kivihiilenpolton ja seospolton lentotuhkien raemuotojen eroavuus on nähtävissä mikroskooppikuvista. Kuvassa 2.2 on esitetty kivihiilenpolton lentotuhkasta otettu kuva ja kuvassa 2.3 on esitetty seospolton lentotuhkasta otettu kuva.



Kuva 2.2. Kivihiilenpolton lentotuhkasta otettu suurennos. Mittakaava esitetty kuvassa. (Kiuru, 2013)



Kuva 2.3. Seospolton lentotuhkasta otettu suurennos. Mittakaava esitetty kuvassa. (Kiuru, 2013)

Kuvista voidaan nähdä, että kivihiilenpolton lentotuhkan sisältämät partikkelit ovat pääsääntöisesti erikokoisia amorfisia pallomaisia lasipartikkeleita. Seospolton lentotuhka sisältää enemmän kidemäisiä ja mikrokiteisiä partikkeleita.

2.3 Lentotuhkien kemiallinen koostumus

Kivihiilen ja turpeen poltossa syntyvien lentotuhkien pääkomponentteja ovat kvartsi, mulliitti ja hematiitti eli piin, alumiinin ja raudan oksidit (Korpijärvi, 2009). Puun tuhka taas sisältää suurimmaksi osaksi kalsium-, magnesium- ja kaliumyhdisteitä (Ojala, 2010). Taulukossa 2.4 on esitetty eri laitosten kivihiilien, puun ja turpeen tuhkien kemialliset koostumukset sekä erään rikinpoistolopputuotteen kemiallinen koostumus. Taulukosta voidaan huomata, että biopoltosta saatavan tuhkan ominaisuudet vaihtelevat, sillä myös poltettavan materiaalin ominaisuudet vaihtelevat paljon. Sama pätee myös seospolton tuhkiin. Arvot vaihtelivat myös eri tietolähteiden mukaan.

Taulukko 2.4. Eri polttoaineista syntyneiden lentotuhkien tyypillisiä kemiallisia koostumuksia. (Alakangas, 2000; Fortum, 2013; Kiuru, 2013)

	Kivihiili- lentotuhka (keskimää- räisesti)	Kivihiilen lentotuh- ka (Naan- talin voi- malaitos)	Turvelen- totuhka	Puulento- tuhka	RPT
<i>Kemiallinen koostumus</i>	<i>paino-%</i>	<i>paino-%</i>	<i>paino-%</i>	<i>paino-%</i>	<i>paino-%</i>
Piidioksidi, SiO ₂	42 – 67	45 – 55	40 – 75	0,4 – 21,7	1,5
Alumiinioksidi, Al ₂ O ₃	11 – 41	20 – 30	1 – 16	0,3 – 5,3	0,5
Rautaoksidi, Fe ₂ O ₃	2,7 – 20	8 – 11	4 – 7	0,2 – 8,5	0,4
Kalsiumoksidi, CaO	0,5 – 6,4	4 – 7	1,5 - 12	30,8 – 60,3	44,3
Magnesiumoksi- di, MgO	0,3 – 8	3 – 5	0,5 – 2,5	2,6 – 16,0	0,9
Kaliumoksidi, K ₂ O	0,2 – 3,2	1 – 2	0,1 – 0,5	3,5 – 29,6	0,1
Natriumoksidi, Na ₂ O	0,1 – 2,3	0 – 2		0,2 – 8,6	1,2

2.4 Lentotuhkien lujittumisominaisuudet

Eri tuhkalaaduilla on erilaiset lujittumisominaisuudet. Pohjatuhkilla lujittumisominaisuudet ovat yleensä melko vähäisiä, kun taas lentotuhkilla lujittumisominaisuuksilla on merkittävä vaikutus materiaalin geoteknisiin ominaisuuksiin ja lopulta lopputuotteen tekniseen laatuun. (Tuhkakäsikirja, 2012) Lujittumisominaisuudet riippuvat tuhkan kemiallisesta koostumuksesta ja lentotuhkapartikkelien ominaisuuksista. Nämä määräytyvät poltettavan materiaalin ja polttotavan mukaan. Lentotuhkan lujittumisreaktioon vaikuttavat myös materiaalin vesipitoisuus sekä tiiveys. Lentotuhkien lujittumista voidaan myös edesauttaa ja nopeuttaa aktivaattoreilla. (Mäkelä, 2000)

Kivihiilenpolton ja seospolton tuhkat eroavat toisistaan, kuten edellä on esitetty. Näin myös niiden lujittumisominaisuudet eroavat toisistaan. Kivihiilen pölypolton lentotuhkien reaktiivisuus perustuu silikaattilasien liukenemiseen ja reaktiotuotteena alkalien kanssa on tällöin CSH – tyyppiset rakenteet. Reaktio on tällöin pozzolaaninen. Seospoltoaineiden leijupetipolton kalsiumrikkaat lentotuhkat reagoivat muodostaen kalsiumalumiinaattihydraattia tai ettringiittiä. Reaktiotuotteiden lujuuksien kehityksissä ja pitkäaikaiskestävyyksissä on eroja, joten tierakenteisiin oletettavasti muodostuneilla reaktiotuotteilla on merkitystä tuhkarakenteen pitkäaikaistoimivuuteen.

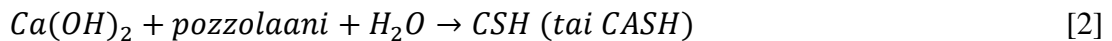
Kirjallisuudessa esitettävät lujittumisreaktion mallit kuvaavat useimmiten joko lentotuhkan ja sementin välistä reaktiota tai lentotuhkan pozzolaanista lujittumisreaktiota. Lujittumismalleissa haetaan useimmiten yhtäläisyyttä hyvin tunnetun sementin lujittumisreaktion kanssa. (Valtonen, 1996) Tämän työn puitteissa lentotuhkan lujittumisreaktiota joudutaan käsittelemään melko pintapuolisesti.

Lentotuhkan pozzolaanisuuudella tarkoitetaan sen kykyä reagoida kalkin ja veden kanssa. Pozzolaanisen lentotuhkan sisältämä piidioksidi (SiO_2) reagoi kalsiumhydroksidin (Ca(OH)_2) kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattia. (Pesonen, 2012) Lentotuhkan sisältämän piidioksidin määrä vaikuttaa siis sen pozzolaanisuuuteen. Lentotuhkan pozzolaaninen lujittumisreaktio on esitetty kaavassa 2. Lentotuhkan pozzolaaninen aktiivisuus riippuu sekä tuhkapartikkelien ominaisuuksista että partikkelien ulkopuolella vallitsevista ominaisuuksista. Aktiivisuuteen vaikuttaa muun muassa lasifaasin reaktiivisuus ja lasifaasin osuus partikkelissa. Pienet partikkelit ovat reaktiivisempia. Ulkoisista tekijöistä tärkein tekijä on huokosveden pH-arvo. Lentotuhka alkaa reagoida pozzolaanisesti pH:n ollessa noin 13,2 ja reaktionopeus lisääntyy pH:n noustessa. (Valtonen, 1996)

Lentotuhkan lujittumisominaisuuksia voidaan parantaa esimerkiksi sementti- tai kalkkilisäyksellä. Sementti koostuu useista veden kanssa reagoivista yhdisteistä ja näin sen hydrataatio on erittäin monimutkainen prosessi, joka käsittää useita sekä samanaikaisia että toisiaan seuraavia reaktioita, jotka ovat toisistaan riippuvaisia. (Virola, 2000) Näin myös lentotuhkan sekä lentotuhkan ja sementin seoksen lujittumisreaktio on erittäin

monimutkainen prosessi. Lentotuhkan ja sementin lujittumisreaktion arvioidaan tapahtuvan vaiheittain siten, että ensin tapahtuu sementin hydrataatio ja sen reaktiotuotteet reagoivat edelleen pozzolaanisen lentotuhkan kanssa. (Valtonen, 1996)

Sementtiä lentotuhkan aktivaattorina käytettäessä reaktiot ovat kaavojen 1 ja 2 mukaiset. Reaktiotuotteena muodostuu kalsiumsilikaattihydraattia (CSH) tai kalsiumalumiinaattisilikaattihydraattia (CASH). (Janz, 2002)



jossa:

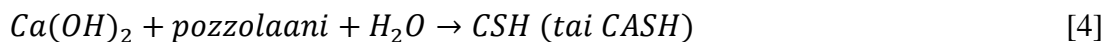
H_2O on vesi

CSH kalsiumsilikaattihydraatti

$Ca(OH)_2$ kalsiumhydroksidi, (sammutettu kalkki)

CASH kalsiumalumiinaattisilikaattihydraatti

Kalkkia, eli poltettua kalkkia, ja pozzolaanista lentotuhkaa käytettäessä reaktiot ovat kaavojen 3 ja 4 mukaiset. (Janz, 2002)



jossa:

CaO on kalsiumoksidi

Pozzolaaninen reaktio on hidas ja lujuuden kehitys on verrannollinen kalsiumhydroksidin määrään. Mitä korkeampi pitoisuus on, sitä korkeampi lujuustaso saavutetaan. (Janz, 2002) Lujittumiseen merkittävästi vaikuttavia tekijöitä ovat sideaineen tai aktivaattorin ominaisuudet, toteutunut vesipitoisuus ja tiiveysaste sekä sideaineen sekoituksen onnistuminen. Myös lujittumislämpötila ja -aika vaikuttavat lopputulokseen. Lentotuhkan lujittumisreaktio ei tapahdu, jos lämpötila on alle +4,0 °C. (Lahtinen, 2001)

Seospolton lentotuhkien lujittuminen perustuu niiden matalan piidioksidipitoisuuden vuoksi trikalsiumalumiinaatin ($3CaO \cdot Al_2O_3$) hydrataatioon. Mikäli materiaaleissa ei ole kalsiumsulfaattia, kalsiumalumiinaattihydraatti (CAHx) muodostuu nopeasti. Kalsiumsulfaatti ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) hidastaa reaktiota ja reaktiotuotteena syntyy ettringiittiä (AFt). Kun kalsiumsulfaatti on kulunut loppuun ensimmäisessä reaktiovaiheessa, seuraa reaktion toinen vaihe, jolloin ettringiitti reagoi edelleen trikalsiumalumiinaatin kanssa muodostaen kalsiummonosulfaattialumiinaattihydraattia (AFm). Kun ettringiittiä on kulunut loppuun, alkaa muodostua alumiinaattihydraattia. Trikalsiumalumiinaatin hydrataation reaktiovaiheiden eteneminen riippuu oleellisesti kalsiumsulfaatti/alumiinaattisuhteesta.

(Virola, 2000) Ettringiitin muodostuminen saattaa aiheuttaa rakenteessa turpoamista. Tämän on huomattu aiheuttavan esimerkiksi betonirakenteiden halkeilua. (Janz, 2002)

Pelkän lentotuhkan lujittumisreaktiossa, jossa kalsium hydratoituu, tuhkan sisältämä kalsiumoksidi reagoi veden ja ilmassa olevan hiilidioksidin kanssa. Reaktiossa muodostuu kalsiumkarbonaattia ja vesihöyryä kaavojen 5 ja 6 mukaisesti. (Isännäinen, 1997)



jossa:

CaCO₃ on kalsiumkarbonaatti

Kalsiumin hydratoituminen on merkittävä varastoinnin ja rakentamisen työtekniikoiden kannalta. Karbonaatti voi muodostua myös kuivassa tuhkassa, jos se saa olla tekemisissä ilman kanssa. (Isännäinen, 1997) Tällöin kuljetuksen ja varastoinnin aikana lentotuhka voi paakkuuntua hankaloittaen jatkokäsittelyä. Usein tuhkaa kastellaan, jotta se ei pölyä käsittelyssä. Tällöin tuhka alkaa heti lujittua. Lisäksi välivarastoinnissa tapahtunut lujuuskehitys vähentää lopullista saavutettavaa lujuustasoa. Kohtamäen tekemisissä tutkimuksissa tutkittiin 10 % vesipitoisuuden kostutetun kivihiilenpolton lentotuhkan kasvavarastoinnin vaikutusta sen lujuusominaisuuksiin. Pelkästään 4 tunnin kasvavarastointi alensi tuhkasta valmistetun koekappaleen lujuutta 25 % ja 28 vuorokauden säilytys pienensi tuhkan lujuuden viidesosaan optimaalisen tuhkan lujuudesta. (Kohtamäki, 1995) Kasatuhkan lujittumista pystytään kuitenkin aktivoimaan eri seosaineilla.

2.5 Tuhkien ympäristökelpoisuus ja hyötykäyttöä koskeva lainsäädäntö

Voimalaitoksilla syntyvien tuhkatuotteiden hyötykäyttöön tarvitaan Suomessa aina lupa. Kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lentotuhkat, pohjatuhkat ja pohjahiekka ovat lähtökohtaisesti määritelty jätteiksi, joten niiden hyödyntämistä sääntelee jätelaissa 646/2011 ja ympäristönsuojelulaissa 86/2000 ja 647/2011 sekä niiden alaisissa asetuksissa asetetut säädökset. (Jätelaki; Ympäristönsuojelulaki; Laki ympäristönsuojelulain muuttamisesta) Jäteluokituksen vuoksi tuhkien ympäristökelpoisuus tulee osoittaa, mikäli niitä aiotaan hyödyntää rakentamisessa. Ympäristökelpoisuutta voidaan arvioida tutkimalla tuhkista haitta-ainepitoisuuksia ja -liukoisuuksia. Valtioneuvoston asetuksessa 403/2009, eli niin sanotun MARA-asetuksen (VNa 591/2006) muutosasetuksessa, annetut raja-arvot alittavat tuhkat ovat hyötykäytettävissä asetuksessa mainittuihin sovelluksiin ilmoitusperiaatteella. Ympäristöluvut myöntää Aluehallintovirasto ja MARA-asetuksen mukaisen luvituksen hoitaa Elinkeino- liikenne ja ympäristökeskus. Muissa tapauksissa hyötykäyttö edellyttää muiden lupaprosessien läpikäymistä sekä

riskinarvioinnin käyttöä soveltavuuden arvioinnissa. Kaupungit ja kunnat voivat myöntää tiettyyn tonnimäärään rajatun ympäristöluvan tai koetoimintaan oikeuttavan koeluvan. (Tuhkakäsikirja, 2012)

Vuonna 2010 säädetyn jäteverolain mukaan kaatopaikoille toimitetut jätteet ovat olleet jäteveron alaisia. Kaatopaikoille toimitetuista jätteistä on 1 päivänä tammikuuta 2013 ja sen jälkeen täytynyt suorittaa veroa 50 euroa jätetonnilta. (Jäteverolaki)

Tuhkien ympäristökelpoisuuteen voidaan vaikuttaa erilaisilla toimenpiteillä, joten jokaiselle materiaalille tulee suunnitella tapauskohtaisesti paras mahdollinen esikäsittely- tai hyödyntämismenetelmä.

2.6 Tuhkien tekninen luokittelu

Tuhkarakentamisen käsikirjassa (Tuhkakäsikirja, 2012) on esitetty tuhkien jako eri käyttöluokkiin niiden teknisten ominaisuuksien perusteella. Luokittelu ei ole virallinen standardi vaan kirjantekijöiden ehdotus tuhkien jaotteluun niiden ominaisuuksien mukaan.

Massiivirakenteiden osalta tuhkat jaotellaan kahteen pääluokkaan – lentotuhkat ja pohjatuhkat. Lentotuhkat jaotellaan neljään ryhmään ja pohjatuhkat kahteen. Tuhkan tulee ensin täyttää ympäristövaatimukset ja sen jälkeen se voidaan luokitella teknisten ominaisuuksiensa mukaan. Taulukossa 2.5 on esitetty tuhkien tekninen luokittelu.

Taulukko 2.5. Tuhkien tekniset vaatimukset käyttöluokittain. (Tuhkakäsikirja, 2012)

	Käyttöluokka	1-aks. puristuslujuus, 28 d [MPa]	JS-kokeen muutos*	Routivuusluokitus	Lujittuminen	Rakeisuus
Lentotuhka	LT1	2	< 20 %	Routimaton	Kyllä	
	LT2	1	< 30 %	Routimaton	Kyllä	
	LT3	0,5	< 50 %	Lievästi routiva	Kyllä	
	LT4	-	-	Routiva		
Pohjatuhka	PT1			Routimaton	Ei	Infra- RYL suod.hk
	PT2			Routimaton	Ei	

* Jäätymis-sulamiskokeen jälkeinen muutos 1-aksiaalisessa puristuslujuudessa

Luokittelussa ei ole otettu kantaa lentotuhkan syntyprosessiin, jolla on kuitenkin suuri vaikutus saavutettavan lopputuotteen ominaisuuksiin. Myös käytetyt sideaineet ja aktivaattorit vaikuttavat lopputuotteen ominaisuuksiin.

3 TUHKARAKENTAMISEN SOVELLUTUKSET TIE- JA KENTTÄRAKENTAMISESSA

Liikennealueiden tarkoitus on palvella käyttäjää ja niiden tulee säilyttää riittävä palvelutaso koko sen ajanjakson, jolle ne on suunniteltu. Alueen palvelutaso ja toiminnallinen kunto riippuvat useimmiten siitä, kuinka hyväkuntoinen sen pinta on. Pinnan kuntoon vaikuttavat monet tekijät, mutta kuitenkin pääosassa on päällysteen alapuolinen rakenne ja pohjaolosuhteet.

3.1 Suomen tieverkon yleispiirteet ja tämänhetkinen tila

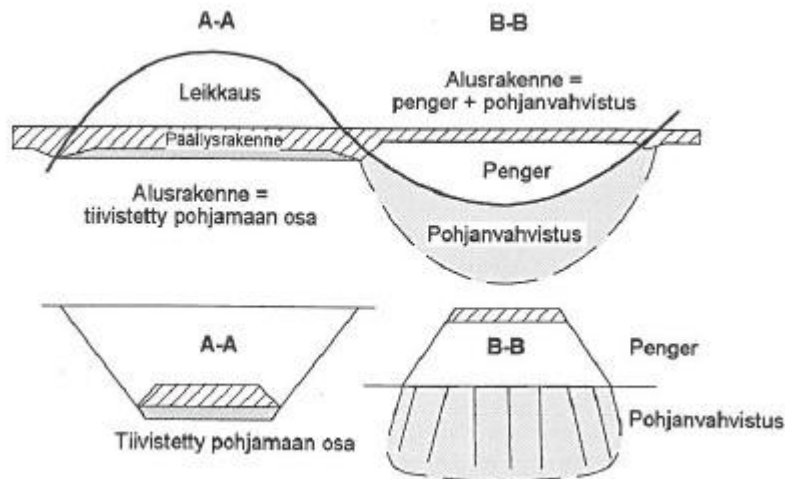
Suomen koko tieverkon pituus on noin 454 000 kilometriä. Tästä yksityis- ja metsäauto- teiden osuus on noin 350 000 kilometriä ja kuntien katuverkkojen osuus noin 26 000 kilometriä. Liikenneviraston mukaan Suomen valtion omistamien maanteiden pituus vuonna 2012 oli 78 109 kilometriä. (Liikennevirasto, 2013). Maantieverkon kunto sekä alempiluokkaisten teiden kantavuusongelmat ovat puhuttaneet ihmisiä viime aikoina. Rakennetun omaisuuden tila 2013 eli ROTI 2013 –raportissa maantieverkon kunto sai kouluarvosanakseen 6½ asteikolla 4-10. Maanteiden kunto koetaan siis kohtalaiseksi ja trendi on laskeva. Liikenneverkostoihin liittyen merkittävin kehityssuunta tällä vuositu- hannella on ollut henkilöautokannan kasvu 40 prosentilla nykyiselle 3,0 miljoonan au- ton tasolle. Samassa ajassa tieliikenne on kasvanut valtakunnallisesti 15 % ja esimerkik- si Uudellamaalla kasvu on ollut 28 %. (ROTI, 2013) Kehityssuuntana on ollut, että maaseudun hiljaisia syrjäiteitä kuormittaa raskas kaivos- ja puunjalostusteollisuuden liikenne samalla, kun kaupunkialueiden ruuhkaliikenne kuormittaa pääväyliä. Tieraken- teiden parantamiseksi on pyritty kehittämään uusia kustannustehokkaita menetelmiä ja uusiomateriaalien hyötykäyttö on yksi paljon tutkittu menetelmä.

3.2 Liikennealueiden yleiset rakenneperiaatteet

Liikennealueiden poikkileikkaukset ja niihin liittyvät rakenteet vaihtelevat väylä- ja kenttätyypistä toiseen erittäin paljon. Liikennöitävien tie- ja kenttäalueiden rakenteissa voidaan erottaa kaksi toiminnallista ja rakenteellista pääosaa, alusrakenne ja päällysrakenne.

3.2.1 Alusrakenne

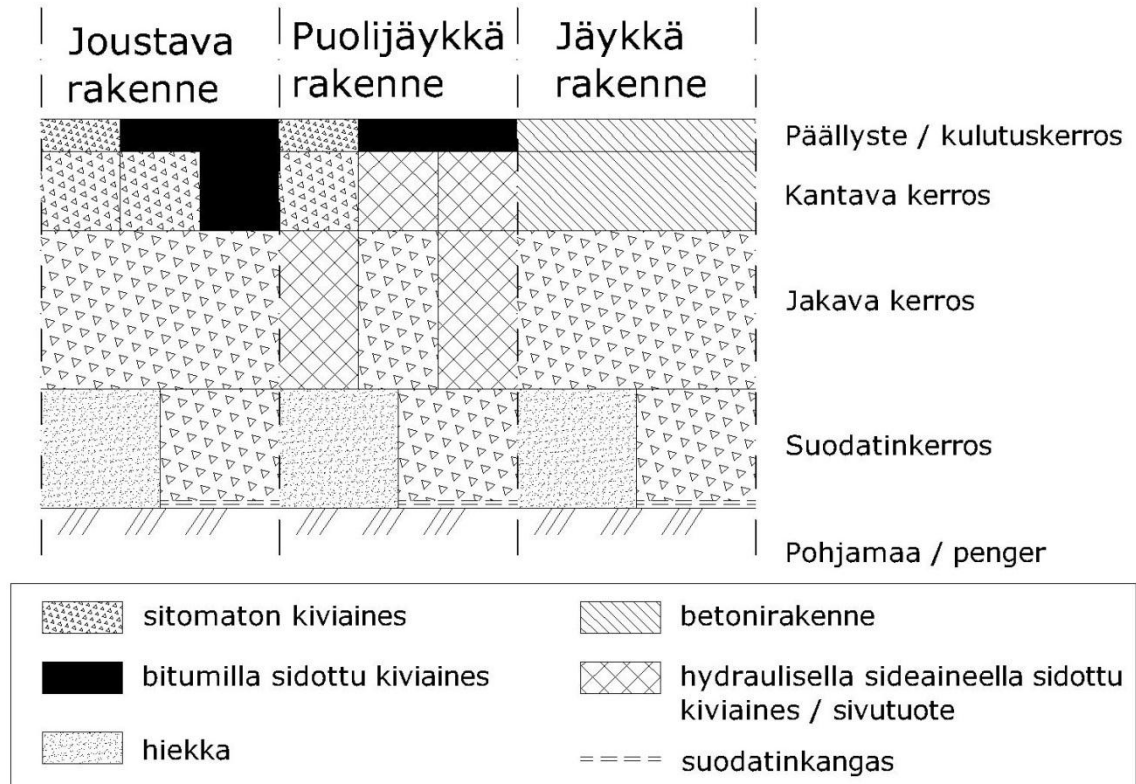
Kun liikennealueen korkeustaso edellyttää maaleikkausta, alusrakenteella tarkoitetaan tiivistettyä pohjamaata. Kun taas tasaus on tiiviiseen pohjamaahan nähden korkealla, rakennetaan liikennealueen alusrakenteeksi pengero. Heikosti kantavalla pohjamaalla alusrakenteen parantamiseksi voidaan tehdä pohjanvahvistustoimenpiteitä. Alusrakenteen tehtävänä on muodostaa riittävän tasalaatuinen, kantava ja painumaton alusta päällysrakenteelle. Liikennealueiden alusrakenteen ja päällysrakenteen muodostuminen on esitetty kuvassa 3.1. (Ehrola, 1996)



Kuva 3.1. Liikennealueiden alusrakenteen ja päällysrakenteen muodostuminen. (Ehrola, 1996)

3.2.2 Päällysrakenne

Päällysrakenne rakennetaan alusrakenteen päälle ja sen laatu määräytyy yleensä alusrakenteen mukaan. Päällysrakenteen tehtävänä on ottaa vastaan liikenteestä aiheutuva kuormitus ja jakaa kuormat tasaisesti alusrakenteelle. Kun alusrakenteen olosuhteet vaihtuvat liikennealueen eri osilla, tulee tämä huomioida päällysrakenteessa. Päällysrakenne on useimmiten kerroksellinen, eli se jaetaan eri rakennekerroksiin, joita ovat suodatinkerros, jakava kerros, kantava kerros sekä kulutuskerros. Kerrokset rakennetaan joko luonnonmateriaaleista tai jalostetuista materiaaleista. Käytetyistä materiaaleista riippuen päällysrakenne voidaan nimetä joko joustavaksi, puolijäykäksi tai jäykäksi. (Ehrola, 1996) Kuvassa 3.2 on esitetty erilaisia tie- ja kenttäalueiden päällysrakenteita.



Kuva 3.2. Tie- ja kenttäalueiden päällysrakenteiden perusrakenteita ja niiden luokittelua.

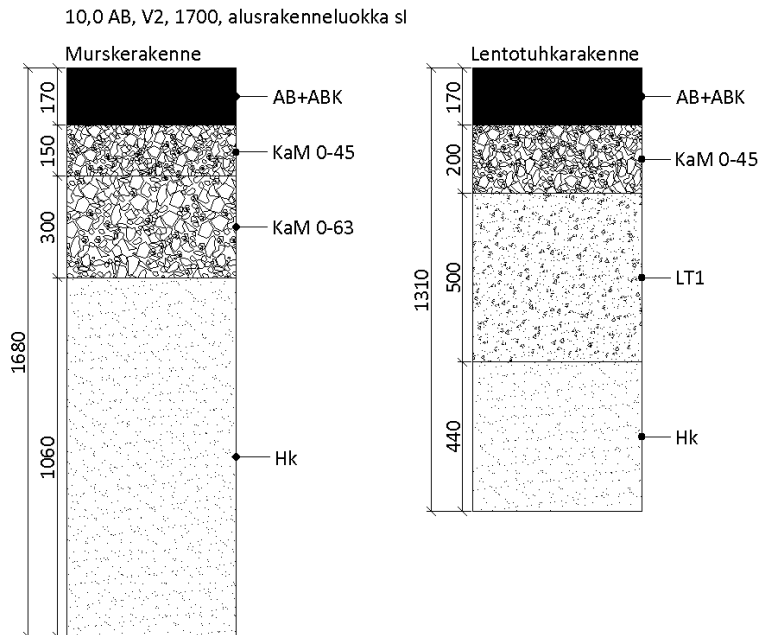
3.3 Erilaiset tuhkarakenneratkaisut

Tuhkia voidaan käyttää maarakentamisessa monella tavalla. Tie- ja kenttärakenteissa tuhkia voidaan käyttää sellaisenaan tiivistettynä tai seostettuna toisen sivutuotteen kanssa. Lentotuhkaa voidaan käyttää sellaisenaan tai sideainemaisesti tie- ja kenttärakenteiden stabiloinnissa. Tuhkille on laadittu tekninen käyttöluokitusjärjestelmä, jonka perusteella voidaan määrittää eri tuhkien soveltuvuus erilaisiin rakenteisiin ja tästä järjestelmästä on kerrottu enemmän kohdassa 2.6.

3.3.1 Massiiviset lentotuhkarakenteet

Massiivisia lentotuhkarakenteita voidaan käyttää tien tai kentän päällyys- ja alusrakenteissa kaikissa kantava kerroksen alapuolisissa rakenteissa. LT1-luokan lentotuhkaa voidaan käyttää myös kantavan kerroksen alaosassa. Massiivisilla tuhkarakenteilla saavutetut edut tavanomaisiin rakenteisiin verrattuna ovat niiden lämmöneristävyyden, kantavuuden, keveys sekä luonnonvarojen säästävä vaikutus. Tuhkarakentamisen käsikirjan mukaan massiivisen tuhkarakenteen avulla on mahdollista rakentaa kestäviä rakenteita tavanomaisia rakenneratkaisuja ohuemmalla kokonaisrakennepaksuudella mikä mahdollistaa monissa kohteissa luonnonvarojen säästön. Kuvassa 3.3 on Tuhkarakentamisen

käsikirja –julkaisussa (Tuhkakäsikirja, 2012) esitetty esimerkki, jossa massiivituuhkarakenteen avulla luonnon kiviaineksia on käytetty 60 % vähemmän tavanomaiseen rakenteeseen verrattuna.



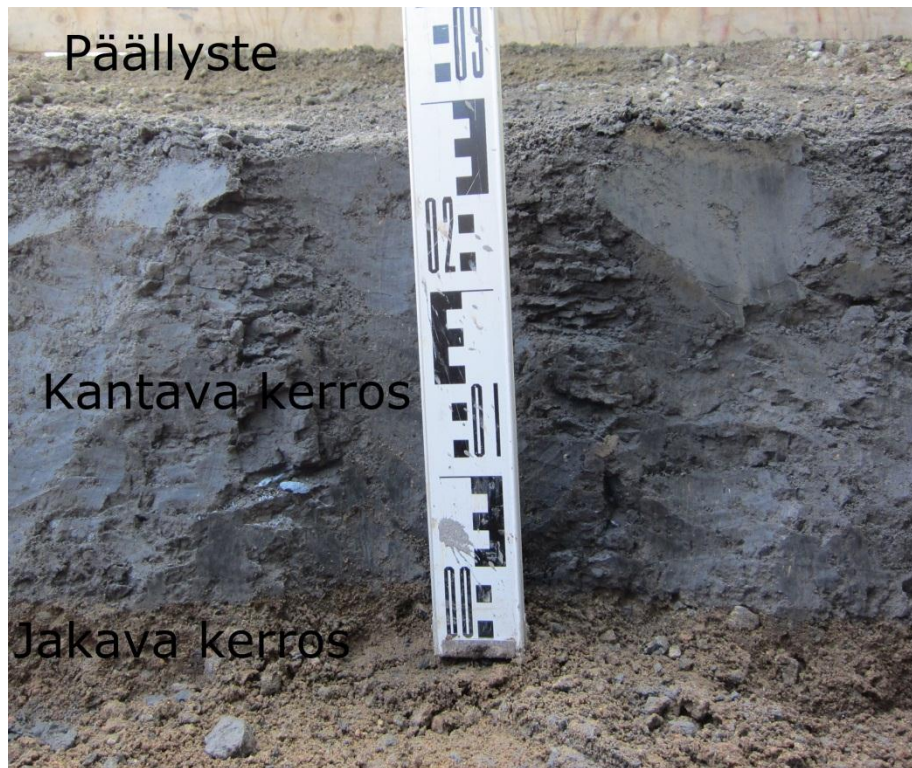
Kuva 3.3. Esimerkki vastaaville vaatimuksille mitoitetuista kiviaines- ja lentotuhkarakenteista. (Tuhkakäsikirja, 2012)

Penkereeseen ja suodatinkerrokseen lentotuhkarakennetta voidaan käyttää kuivissa olosuhteissa, mutta kosteilla ja pehmeillä pohjamailla tuuhkarakenteen alle tulee rakentaa kapillaarisen vedennousun katkaiseva kerros, joka toimii myös tiivistysalustana. Jakavaan kerrokseen, suodatinkerrokseen ja penkereeseen lentotuhkakerros voidaan usein rakentaa ilman sideainetta, jolloin lentotuhka tiivistetään optimivesipitoisena rakenteeseen. (Tuhkakäsikirja, 2012) Kun materiaali tiivistetään optimivesipitoisena, se tiivistyy parhaiten ja valmiin rakenteen kuivatilavuuspaino on tällöin suurin. (Rantamäki, 2008) Tuhkamateriaalin tiivistymisen optimivesipitoisuus määritetään laboratoriokokein ennen rakentamista, esimerkiksi parannettua Proctor–koetta käyttäen. Suurimmalle osalle lentotuhkarakenteita tavoitteellinen tiivisyysaste on noin 91 – 92 % (Lahtinen, 2001).

Jakavan kerroksen yläosaan ja kantavan kerroksen alaosaan rakennettavat lentotuhkakerrokset vaativat usein stabilointia hydraulisella sideaineella, kuten esimerkiksi sementillä, kalkilla, rikinpoistolopputuotteella tai näiden seoksella. Jos lentotuhka on routivaa, on stabilointi välttämätöntä. (Tuhkakäsikirja, 2012) Kuvassa 3.4 on esitetty stabiloidun massiivituuhkarakenteen leikkauskuva.

Massiivisten lentotuhkarakenteiden rakentamisen työmenetelmät voivat vaihdella tapauskohtaisesti. Olennaista työssä on kuitenkin käytettävän tuhkan vesipitoisuuden optimointi sekä mahdollisen sideaineen sekoittaminen lentotuhkaan. Kuivaan lentotuhkaan

joudutaan sekoittamaan vettä pölyämisen estämiseksi ja tämä luo haasteita vesipitoisuuden optimointiin. Sideaine voidaan sekoittaa tuhkaan joko työmaalla sekoitusjyrsimellä tai varastoalueella asema- tai aumasekoituksena.



Kuva 3.4. Stabiloitu massiivituhrak rakenne.

3.3.2 Lentotuhkapohjaisella sideaineseoksella stabiloidut päällysrakenteet

Päällysrakenteen kantavan kerroksen stabilointi toteutetaan yleensä paikalla tehtävänä kerrosstabilointina. Menetelmässä kantavan kerroksen kiviaineksen sekaan jyrsinsekoietaan lujittuva sideaine, jonka avulla kantavan kerroksen kantavuus sekä jäätymissulamissykliä kestävyys paranevat. Näin voidaan ohentaa päällysteen ja koko päällysrakenteen paksuutta ja säästää päällystyskustannuksissa. Stabilointijyrsinnän kerrospaksuus on yleensä 150 – 200 mm. (Tiehallinto, 2007)

Kerrosstabiloinnin tuhkapohjaisessa sideaineseoksessa käytetään yleensä tuoretta siilovarastoitua kostutettua lentotuhkaa ja sementtiä. Lentotuhkan lisänä voidaan käyttää myös muita teollisuuden sivutuotteita kuten kipsiä, rikinpoistolopputuotetta, kuonaa, rikastushiekkaa ja kuitusavea. Sideaineseoksessa voidaan käyttää myös erilaisia kalkkiseoksia.

Kerrosstabilointi soveltuu sekä korjausrakentamiseen että uudiskohteisiin. Korjausrakentamisessa vanha päällyste sekä kantava kerros hyödynnetään stabiloinnin runkoai-

neeksi, jolloin ei synny ylijäämämassoja. Myöskään lisämassoja ei tarvita, jos tasausta ei ole tarvetta nostaa. Usein lisämassojen käytöstä ja tasauksen nostosta aiheutuu lisäkustannuksia, koska kun tien tasaus nousee, tulee myös kaikki liittymät korottaa uuteen tasaukseen sopivaksi. Tasauksen nosto aiheuttaa jyrkkäluiskeisilla teillä myös ajoradan kapenemista tai sitten koko tierakenteen leventämistä. Kerrosstabiloinnissa työsuoritus on nopea, jolloin liikennehaitta tiellä on vähäinen. (Tiehallinto, 2007) Raskaasti kuormitettujen teiden ja kenttien uudisrakentamisessa kerrosstabilointi on kustannustehokas tapa parantaa kantavuutta ja ohentaa päällysteen paksuutta. Stabiloitavaksi kelpaa lujuudeltaan ja muodoltaan huonompi kiviaines kuin sitomattomiin kerroksiin. (Tiehallinto, 2007) Kuvassa 3.5 on esitetty korjausrakentamiskohteen kerrosstabiloidusta kantavasta kerroksesta poratut näytekappaleet.



Kuva 3.5. Kerrosstabiloidusta kantavasta kerroksesta porattuja näytekappaleita.

3.3.3 Pohjatuhka- ja pohjahiekkakerrosrakenteet

Pohjatuhkaa, joka on rakeisuudeltaan sekä ympäristöllisiltä ominaisuuksiltaan sopivaa, voidaan käyttää liikennealueiden rakenteissa kuten hiekkaa, esimerkiksi suodatinkerroksessa. (Rudus Oy, 2008) Hiekkarakenteisiin verrattuna pohjatuhkarakenteiden etuina ovat lämmöneristävyys, keveys sekä luonnonvaroja säästävä vaikutus.

3.4 Päällysrakenteen mitoitus

Liikennealueen päällysrakenteen suunnitellaan ja mitoitetaan kestävästi liikennekuormituksesta, roudasta ja sääolosuhteista sekä pohjaolosuhteista aiheutuvat rasitukset. Tien päällysrakenteen käyttöikä on lähtökohtaisesti 50 vuotta. (Liikennevirasto, 2012)

3.4.1 Kuormituskestävyyssmitoitus

Tierakenteen kuormituskestävyyssmitoitus voidaan tehdä joko Odemarkin laskukaavaa ja sen lisäehtoja 1 ja 2 käyttäen tai väsymisteoriaan perustuvaa monikerrosrakentaa käyttäen. Monikerrosrakentaa koskevat vaatimukset ja mitoitusparametrit on esitetty julkaisun Tietoa tiensuunnitteluun 71 D kulloinkin voimassa olevassa versiossa ja Odemarkin laskukaavan käyttö on esitetty Liikenneviraston julkaisussa Tierakenteen suunnittelu (Tiehallinto, 2004).

Kuormituskertaluku

Liikenteen aiheuttamaa rasitusta kuvataan kuormituskertaluvulla KKL. Kuormituskertalukua voidaan myös sanoa standardiakselien ylityskertojen lukumääräksi. Kuormituskertaluvun laskeminen on esitetty Liikenneviraston julkaisussa Tierakenteen suunnittelu. Kaistakohtaisen kuormituskertaluvun laskemiseen käytetään arvioituja lähtötietoja, jotka tulee olla voimassa 10 vuoden kuluttua tien käyttöönotosta. Kuormituskertalukuun vaikuttaa tien keskimääräinen vuorokausiliikenne, ajoneuvoyhdistelmien määrä vuorokaudessa ja muiden raskaiden ajoneuvojen määrä vuorokaudessa. Kuormituskertaluvun laskennassa huomioidaan myös täysien ja tyhjien ajoneuvoyhdistelmien määrä vuorokaudessa sekä tien leveys. (Tiehallinto, 2004)

Mitoitus Odemarkin laskukaavalla

Odemarkin laskentamenetelmä on toinen yleisimmin käytössä olevista tierakenteiden mitoitusmenetelmistä ja se perustuu tierakenteen kokonaiskantavuuden laskentaan. Mitoituksessa monikerrosrakenteen yksinkertaistetaan kaksikerrosrakenteeksi ja sen jälkeen homogeeniseksi ekvivalenttirakenteeksi. Tällöin kuormituksen aiheuttamien vasteiden laskemiseen voidaan käyttää homogeenisen puoliavaruuden mukaisia Boussinesq'n kaavoja. (Ehrola, 1996)

Lähtötiedoksi Odemarkin kuormituskestävyysmitoitukseen tarvitaan vaadittu päällystetyyppi, tavoitekantavuus ja päällystekerrosten vähimmäispaksuus, jotka määräytyvät liikennealueen kuormituksen, eli kuormituskertaluvun mukaan. Odemarkin kuormituskestävyysmitoituksen lähtötiedoiksi tarvitaan myös alusrakenteen kantavuus sekä rakenteessa käytettävien materiaalien jäykkyysmoduuliarvot, eli E-moduulit. Alusrakenteen kelpoisuusluokat ja mitoitusominaisuudet on annettu julkaisussa Tierakenteen suunnittelu. Rakennekerrosten moduulit on esitetty julkaisun Tietoa tiensuunnitteluun 71 D kulloinkin voimassa olevassa versiossa.

Laskenta etenee pohjamaan pinnalta kerroksittain rakenteen pinnalle. Ylemmän kerroksen päältä saavutettava kantavuus lasketaan alemman kerroksen kantavuuden sekä mitoitettavan kerroksen jäykkyysmoduulin, eli E-moduulin, sekä sen paksuuden perusteella.

Odemarkin mitoituskaavaa (kaava 7) käytettäessä laskettavien sitomattomien kerrosten sopiva kerrospaksuus on 200 – 300 mm ja lisäehto 1 käytettäessä 150 – 200 mm. Tätä paksummat kerrokset jaetaan laskennassa useampaan osaan.

$$E_P = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 * \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) * \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 * \left(\frac{h}{a}\right)^2} \left(\frac{E}{E_A}\right)^{\frac{2}{3}}}} \quad [7]$$

jossa:

E_A	on	mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus [MPa]
E_P		mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus [MPa]
E		mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuli [MPa]
h		mitoitettavan kerroksen paksuus [m]

Lisäehto 1: Sitomattoman kerroksen käyttökelpoinen E-moduuli on enintään $6 \times E_A$ ja osittain sidottujen enintään $n \times E_A$, missä kerroin n saadaan julkaisusta Tietoa tiensuunnitteluun 71 D.

Lisäehto 2: Yhteenliimaantuneet, ehjät bitumilla sidotut kerrokset, joiden $E \geq 1500$ MPa, lasketaan yhtenä kerroksena, jonka moduuliksi otetaan osakerrosten paksuuksilla painotettu moduulien keskiarvo. Ehto voi täyttyä vain kun AB-kerrosten bitumipitoisuus on vähintään 3,8 % ja massa on asemasekoitettua. Pelkästään PAB-päällysteitä sisältävissä rakenteissa bitumipitoisuuden pitää olla vähintään 3,1 % ja E-moduulin vähintään 1400 MPa. Samassa rakenteessa olevat PAB- ja AB-kerrokset eivät ole tässä mielessä yhteenliimaantuneita vaan ne lasketaan erillisinä kerroksina.

Massiivituhkarakenteiden kuormituskestävyyssmitoitus voidaan tehdä Odemarkin laskukaavaa käyttäen. Tällöin käytettävä E-moduuli ja Odemarkin lisäehdon 1 n-parametrin arvot muuttuvat tuhkan käyttöluokan mukaan. Suuntaa antavat E-moduulit ja n-parametrit on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1. Tuhkarakenteen kuormitusmitoituksessa Odemarkin laskukaavassa käytettävät tuhkien parametrit. (Tuhkakäsikirja, 2012)

Käyttöluokka	E-moduuli [MPa]	n	Huomautukset
LT1	600	10	28 d puristuslujuus ≥ 3 MPa, JS-kokeen* muutos < 20 %, routimaton
LT2	300	6	28 d puristuslujuus ≥ 3 MPa, JS-kokeen muutos < 30 %, routimaton
LT3	100	6	Lievästi routiva -> ei sovellu päällysrakenteeseen
LT4	50	6	Routiva -> ei sovellu päällysrakenteeseen
PT1	50	6	Suodatinkerroksen rakeisuus

* JS-kokeella tarkoitetaan jäädytys-sulatuskoetta, jolla testataan jäädytys-sulatussykliä vaikuttavasta materiaalin lujuuteen.

Myös kerrosstabiloituja tuhkarakenteita voidaan mitoittaa Odemarkin laskukaavan avulla ja tällöin stabiloidulle kerrokselle käytetään taulukossa 3.2 annettuja E-moduulin ja n-parametrin suuntaa antavia arvoja. Laskennassa ei käytetä lisäehtoa 2.

Taulukko 3.2. Kerrosstabiloitujen tuhkarakenteiden mitoituksessa Odemarkin kaavalla käytettävät parametrit. (Tuhkakäsikirja, 2012)

Käyttöluokka	E-moduuli [MPa]	n	Huomautukset
Kerrosstab. 1	1500	18	28 d puristuslujuus ≥ 3 MPa, JS-kokeen muutos < 20 %
Kerrosstab. 2	3500	35	28 d puristuslujuus ≥ 5 MPa, JS-kokeen muutos < 20 %

Odemarkin mitoituskaavalla tehtävässä tierakenteen mitoituksessa ei huomioida lainkaan materiaalien jäykkyyden jännitystilariippuvuutta. Tierakenteessa vallitseva jännitystila vaikuttaa rakenteen materiaaleihin siten, että mitä suurempi on pääjännitysten summa, sitä jäykempänä materiaali toimii. (Ehrola, 1996)

Mitoitus monikerroslaskennalla

Toinen suunnitteluohjeiden esittämä tapa mitoittaa tierakenteita on analyttinen monikerroslaskenta. Tierakenteiden mitoittaminen monikerroslaskennalla perustuu tietoko-

neohjelmien avulla tehtävään laskentaan. Ohjelmien avulla pystytään mallintamaan rakennekerrosten jäykkyyden riippuvuus muun muassa vallitsevasta jännitystilasta sekä materiaalien kuormituskestävyys erilaisin funktioin. Ohjelmien avulla pystytään määrittämään sidottujen kerrosten alapinnan väsymisen ja sitomattomien kerrosten deformaation perusteella laskettu rakenteen käyttöikä.

Markkinoilla on jonkin verran monikerroslaskentaohjelmia esimerkiksi APAS 3, Bisar ja Kenlayer. Tiehallinnon julkaisussa Tietoa tiesuunnitteluun nro 71D on annettu analyttisessä monikerroslaskennassa käytettävät materiaaliparametrit. Toistaiseksi tuhkamateriaaleille ei ole julkaistu monikerroslaskennassa käytettäviä materiaaliparametreja.

3.4.2 Routamitoitus

Routa on liikennealueiden ympäristökuormituksista selvästi merkittävin tekijä Suomessa ja yleensä maapallon pohjoisilla alueilla. Routaan ja sen tarkasteluun liittyvät yleisimmät peruskäsitteet ovat routaantuminen, routiminen ja routanousu. Maan ja tierakenteen routaantumisella tarkoitetaan niiden jäätymistä ja jäätyminen etenemistä maassa, eli maan katsotaan routaantuvan, kun sen huokosvesi jäätyy. Routimisella tarkoitetaan selkeästä maan routaantumista, jonka yhteydessä maan tilavuus kasvaa, eli jäätyminen yhteydessä tapahtuu maarakenteen pinnassa niin sanottua routanousua. Routanousun lisäksi, routimisen haitallisena ilmiönä tunnetaan sulamispehmeneminen.

Liikennealueiden routimiseen ja liikennealueiden pinnan routanousuun vaikuttavat alusrakenteen maalajiominaisuuksien lisäksi ilmastotekijät, routimisolosuhteet ja tien päällysrakenne. Routamitoituksen avulla pyritään juuri suunnittelemaan liikennealueen päällysrakenne niin että alusrakenne, ilmasto ja routimisolosuhteet huomioiden liikennealueen pinnan palvelutaso säilyy.

Kokonaan routimattoman tierakenteen laskennallinen routanousu (RN_{lask}) saadaan arvioidua kaavan 8 avulla. Laskenta perustuu siihen, että routanousu tapahtuu alusrakenteessa ja sen päällä oleva päällysrakenne toimii lämmöneristeenä ja näin vähentää roudan tunkeutumista pohjamaahan. Laskenta ja käytettävät parametrit on esitetty julkaisussa Tierakenteen suunnittelu.

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 - a_3 jne) * \frac{t}{100} \quad [8]$$

jossa:

S	on	mitoitusroudansyvyys [mm]
R_i		routimattoman kerroksen paksuus [mm]
a_i		materiaalin vastaavuus eristävyuden kannalta
t		alusrakenteen routaturpoama [%]

Rakenteen, jossa käytetään lievästi routivia materiaaleja, routanousu lasketaan kaavalla 9. Pohjamaan routaturpoaman lisäksi, laskennassa huomioidaan routivan rakennekerroksen turpoama.

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 - a_{rva} * R_{rva}jne) * \frac{t}{100} + R_{rva} * \frac{t_{rva}}{100} \quad [9]$$

jossa:

R_{rva} on routivan kerroksen paksuus [mm]
 a_{rva} routivan materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta
 t_{rva} routivan kerrosmateriaalin routaturpoama [%]

Materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta kertoo materiaalin ominaisuudesta estää lämmön poistuminen alapuolisista rakenteista. Taulukossa 3.3 on esitetty eri materiaalien vastaavuuksia eristävyiden kannalta. Taulukosta voidaan nähdä, että lentotuhkan eristävyys murskeeseen verrattuna on jopa noin 1,9 -kertainen. Arvot ovat kuitenkin suuntaa antavia.

Taulukko 3.3 Materiaalien vastaavuuksia eristävyiden kannalta. (Ramboll, 2012; Tiehallinto, 2004)

Kerrosmateriaali	Materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta, a_i
Hiekka	1,0
Murske	0,9
Louhe	0,8
Bitumilla sidottu	1,0
Lentotuhka	1,7
Pohjatuhka	1,2
Tuhkaseoksella sidottu	1
Suulakepuristettu polystyreeni (XPS) 0,7 m syvyydessä, XPS:n alla kuivatuskerros 0,15 m	20

Maalajin routimisominaisuuksia voidaan kuvata myös segregatiopotentiaalin avulla. Mitä suurempi materiaalin segregatiopotentiaali on, sitä suurempi on sen routivuus.

3.5 Tie- ja kenttärakenteiden vaurioituminen

Tie- ja kenttärakenteiden vauriot voidaan jaotella peruslähtökohdaltaan liikennekuormituksesta ja toisaalta ympäristökuormituksesta johtuviin vaurioihin. Kuitenkin käytännössä vaurioiden erottelu syntymekanismien mukaan ei ole selvää, koska osittain samanlai-

nen vaurio voi syntyä sekä liikenne- että ympäristökuormituksen aiheuttamana. Liikenneväylien rakenteelliset vauriot voidaan jaotella taulukon 3.4 mukaisesti halkeamiin, epätasaisuuksiin ja urautumiseen. (Ehrola 1996)

Taulukko 3.4. Liikenneväylien rakenteelliset vauriotyypit ja vaurioitumisen muodot. (Ehrola 1996; Belt 2002)

Vauriotyyppi	Vauriomuoto
Halkeama	Poikittaishalkeama Pituushalkeama Vinohalkeama Saumahalkeama Verkkohalkeama
Epätasaisuus	Painuma Kohouma (Pituussuuntainen tai poikkisuuntainen)
Urautuminen	Kuluminen Deformoituminen

Halkeamien syitä ovat muun muassa epätasainen routiminen ja painuminen sekä lämpötilamuutoksiin liittyvät jännitykset. Lisäksi liikennekuormituksen aiheuttamat rasitukset muodostavat päällysteeseen muodonmuutoksia ja sitä kautta halkeamia. (Belt 2002)

Pituussuuntainen epätasaisuus havaitaan yleensä erilaisina painaumuina tai heittoina. Pituussuuntaiset epätasaisuudet ovat usein merkki epähomogeenisesta tierakenteesta tai pohjaolosuhteiden muutoksista ja niiden syntyminen ja lisääntyminen ovat yhteydessä liikennekuormitukseen, tierakenteen omaan painoon ja routimiseen sekä tierakenteen laatuun ja toimintaan. Alempiluokkaisilla teillä routiminen on suurin pituussuuntaisten epätasaisuuksien aiheuttaja. (Belt 2002)

Deformaatiolla tarkoitetaan tien rakenteeseen muodostuvaa pysyvää muodonmuutosta, joka ilmenee mm. tien pinnan urautumisena. Tämä urautumien ei ole tien pinnan kulumisesta johtuvaa urautumista. Deformaatiota syntyy kaikkiin liikennealueiden rakennekerroksiin päällysteestä pohjamaahan. Sidotuissa kerroksissa deformaatio voi parhaimmillaan olla lähes olematonta, mutta sitomattomissa kerroksissa sitä esiintyy aina mitattavia määriä. (Tiehallinto 2004 b)

Stabiloitujen kerrosten deformaatioon vaikuttavat rakenteen kuormitustekijät, eli rakenteeseen muodostuva aksiaalinen- ja deviatoorinen jännitys. Lisäksi deformaatioon vaikuttavia tekijöitä ovat rakenteen tyhjätila ja tiiveys sekä kosteusvaihtelut ja muut perioodeissa vaihtuvat tekijät. Lisäksi rakenteen pisyvyys on suuresti vaikuttava tekijä. (Tiehallinto 2004 b)

4 KOEKOHTEET

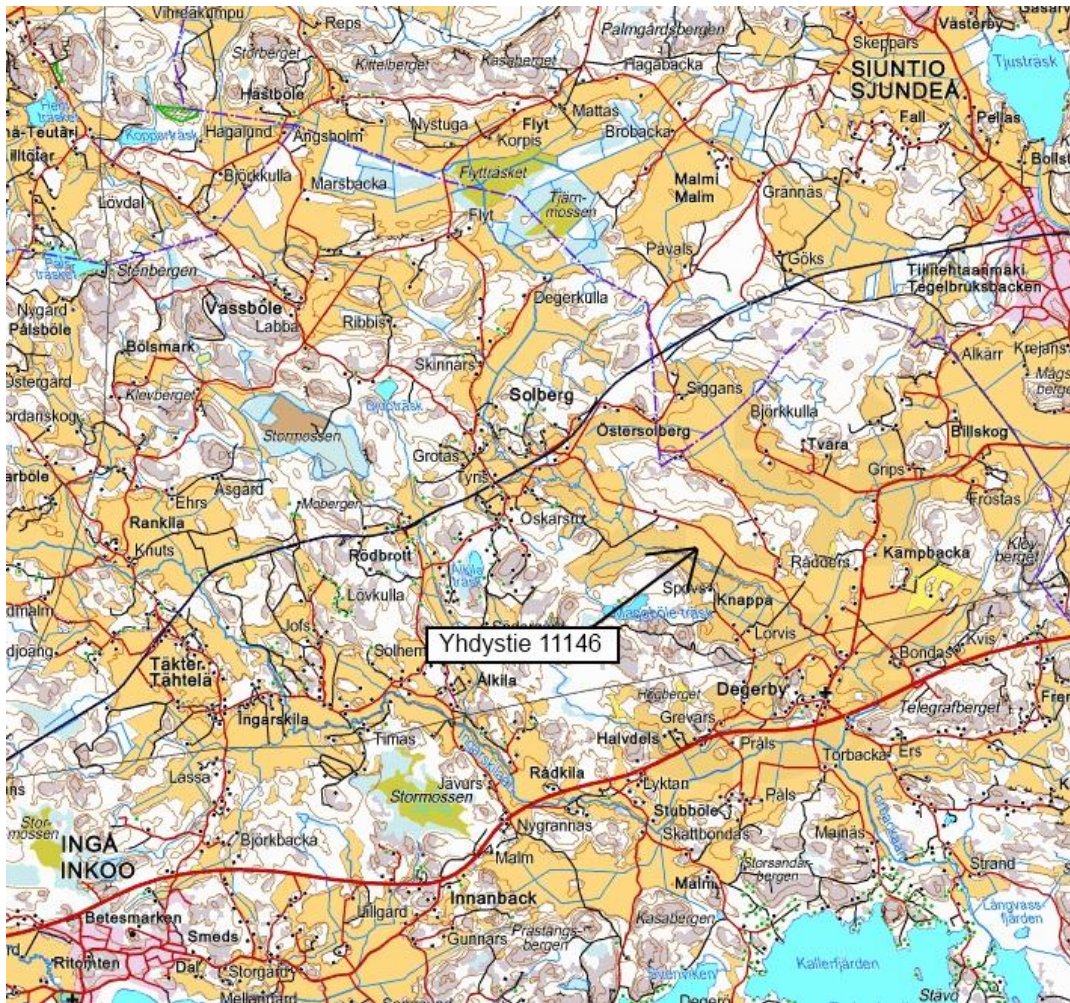
Työssä tutkittiin kuutta koekohdetta. Koekohteiden esittely pohjautuu pääsääntöisesti Harri Jyrävän ja Marjo Ronkaisen (Ramboll Finland Oy) arkistoista kerättyyn koekohteiden rakentamis- ja seurantadokumentteihin.

4.1 Inkoo

Inkoon Pilot -kohde rakennettiin vuonna 2000 ja kohteessa testattiin kahta erilaista kivihiilenpolton lentotuhkasta tehtyä rakennetta – massiivista lentotuhkakerrosta ja kerrostabilointia.

4.1.1 Koekohteen kuvaus

Inkoon Pilot-kohde sijaitsee Inkoon kunnassa sijaitsevalla Solbergintiellä välillä Degerby – Tyräs. Suomenkieliseltä nimeltään yhdystie 11146 on Päivöläntie. Inkoon koekohteen sijainti näkyy kuvassa 4.1.



Kuva 4.1 Inkoon koekohteen sijainti (kuva: paikkatietoikkuna)

Koetien Degerbyn puoleinen pää kulkee peltovainioiden keskellä. Tien vasemmalla puolella kulkee joki, joka on tien alkupäässä aivan tien vieressä. Vesipinta joessa on keskimäärin 3 metriä tienpinnan alapuolella, mutta keväisin joki saattaa tulvia tielle. Tien keskivaiheilla on metsäinen kumpare, jossa kallio nousee paikoin lähelle pintaa. Tien loppuosuus on taas peltojen ympäröimää. Alkutilanteessa vuonna 2000 tien alkupäässä päällysrakenne oli melko ohut ollen keskimäärin 0,5 m ja keskivaiheilla päällysrakenteen paksuus oli keskimäärin 0,7 m. Tien loppupäässä päällysrakennetta oli kunnostettu aikaisemmin ja päällysrakenteen paksuus oli noin 1,0 m. Pohjamaana alueella on savea tai silttiä ja päällysrakenteen alapinta oli osittain sekoittunut pohjamaahan. Tien perusongelmina ennen korjaamista oli kantavuuden puute, päällystevauriot sekä reunojen pettäminen. Myös puutteellinen kuivatus oli aiheuttanut tiellä ongelmia. Varsinaisia routavaurioita ei tiellä ollut esiintynyt. (Ahlqvist, 2000 ; Jyrävä, 2001 ; Jyrävä 2013)

4.1.2 Koerakenteet

Inkoon Pilot-hankkeen tuhkarakenteet toteutettiin 4.-27.10.2000 ja vaahtobitumistabilointi 2.-3.10.2000. Murskeesta tehdyt vertailurakenteet tehtiin vuoden 2000 marraskuussa. Koekohteen paalutus on sidottu tierekisterin mukaiseen paalutukseen ja koerakenteet on sijoitettu tieosan 01 paaluvälille 0 – 5400. Koekohteen alkupäähän paaluvälille 0 – 3000 tehtiin vanhan rakenteen stabilointeja sekoittamalla sideaine vanhaan tierakenteeseen ja loppuosalle koerakenteet rakennettiin vanhan rakenteen päälle. Paaluvälin 4400 – 5400 koerakenteet rakennettiin käyttäen kuitutuhkaa, joka on lentotuhkan ja kuitusaven sekoitus. Kuitutuhkarakenteet on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Koerakenteiden sijoittuminen, niillä tehdyt toimenpiteet sekä käytetyt materiaalit on esitetty taulukossa 4.1. (Ahlqvist, 2000 ; Jyrävä, 2001 ; Jyrävä 2013)

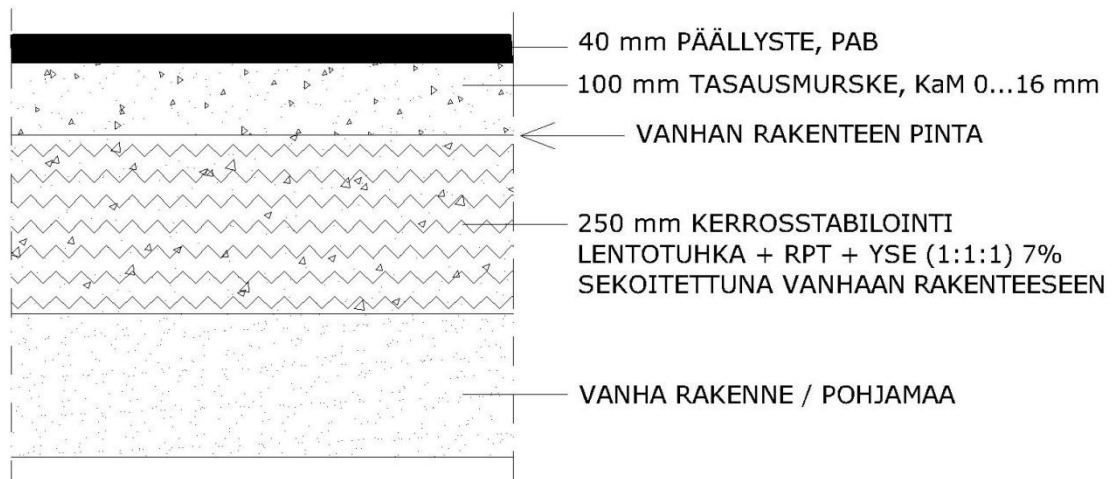
Taulukko 4.1 Inkoon koerakenteet.

Paaluväli	Rakennusaika	Toimenpide	Materiaalit
01/0 – 01/500, 01/1500 - 01/3000	10/2000 (asfaltointi 2001)	<u>Vaahtobitumistabilointi</u> -stabilointijyrsintä 150 mm syvyydeltä vanhaan rakenteeseen -päälle murske 70-100 mm ja asfaltointi 40 mm	Sideaineen määrä keskimäärin 3,2 %
01/500 - 01/1500	10/2000 (asfaltointi 2001)	<u>Vanhan rakenteen kerrostabilointi</u> -stabilointijyrsintä 250 mm syvyydeltä vanhaan rakenteeseen -päälle murske 100 mm ja asfaltointi 40 mm	Sideaineena Helsingin Energian kuiva lentotuhka + Helsingin Energian rikinpoiston lopputuote + YSe 1:1:1, 7% -kokonaissideainemäärä 40kg/m ²
01/3000 - 01/3940	10/2000 (asfaltointi 2001)	<u>Tuhkarakenne</u> -stabiloitu sivutuotekerros 200 mm + murske 100 mm + asfaltointi 40 mm	Espoon sähkön lentotuhka + Helsingin Energian rikinpoiston lopputuote 85:15 -sideaine CaO 5 %
01/3940 - 01/3980	10/2000 (asfaltointi 2001)	<u>Tuhkarakenne</u> -stabiloitu sivutuotekerros 20 mm + murske 100 mm + asfaltointi 40 mm	Espoon sähkön lentotuhka + Helsingin Energian rikinpoiston lopputuote 85:15 -sideaine YSe 5 %
01/3980 - 01/4400	10/2000 (asfaltointi 2001)	<u>Murskerakenne</u> -murske 250 mm + asfaltointi 40 mm	

Ennen rakentamista huonokuntoinen päällyste jyrsittiin koko osuudella vanhan tierakenteen sekaan. Vanhan rakenteen stabiloinnissa käytettiin Helsingin Energian kuivaa lentotuhkaa, rikinpoistolopputuotetta ja yleissementtiä. Kutakin sideainetta levitettiin tielle 13 kg/m², eli yhteensä noin 40 kg/m². Sideaineiden yhteismäärä oli 7 %, joka laskettiin

murskeen kuivapainoa käyttäen. Sideaineet jyrättiin 250 mm syvyydeltä vanhaan tierakenteeseen stabilointijyräsimellä. Vanhan rakenteen stabiloinnin teoreettinen rakenneleikkaus on esitetty kuvassa 4.2. Kerrostabiloinnissa käytetty lentotuhka ja rikinpoistolopputuote sekoitettiin kuivana valmiiksi seokseksi Helsingin Energian annoskoittimella ja kuljetettiin käyttöpaikalle. Sekoitus ja kuljetus sovitettiin rakennustyöhön siten, ettei välivarastointia tarvittu. (Ahlqvist, 2000 ; Jyrävä, 2001 ; Jyrävä, 2013)

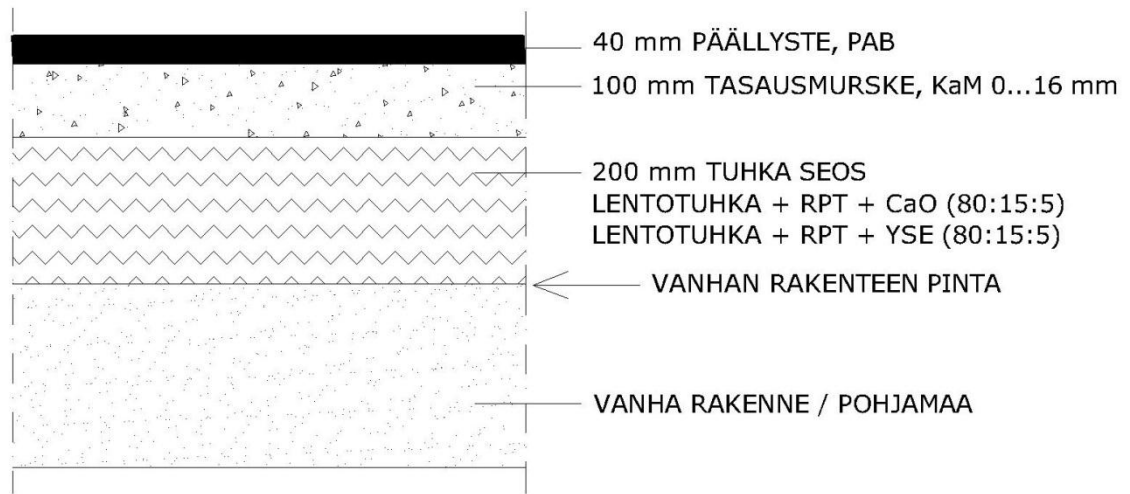
Vanhan rakenteen stabilointi



Kuva 4.2. Inkoon vanhan rakenteen kerrostabiloinnin rakenneleikkaus

Tuhkarakenteen runkomateriaalina oli Espoon Sähkön kostea lentotuhka, jonka stabiloinnissa käytettiin Helsingin Energian rikinpoistolopputuotetta ja kalkkia. Paaluvälillä 3940 – 3980 käytettiin kalkin sijasta yleissementtiä. Rikinpoistolopputuotetta oli seoksessa 15 % lentotuhkan kuivamassasta laskettuna ja kalkkia 5 % tuhka-RPT – seoksen kuivamassasta laskettuna. Ennen sivutuotekerroksen levittämistä tien vanha pintarakenne puskettiin tien reunoille 200 mm korkuisiksi tukivalleiksi. Tukivallien avulla estettiin tuhkerakenteen purkautuminen reunojiin ja kerros pystytettiin tiivistämään. Massiivisen tuhkarakenteen teoreettinen rakenneleikkaus on esitetty kuvassa 4.3. Tuhkarakenteessa käytetty tuhka välivarastoitiin peitettuihin aumoihin Siuntion Sunnevikissä olleelle varastointi- ja sekoituspaikalle, josta kuljetusmatkaa rakennuskohteelle oli noin 5 km. Sekoituspaikalla oli kolme 9 x 9 m² kaukaloa, joissa materiaalien sekoitus tapahtui vaa'alla varustetun pyöräkuormaajan sekä kaivinkoneeseen kiinnitetyn Maamyyrä -sekoittimen avulla. Maamyyrä -sekoittimessa sideaine puhalletaan paineilman avulla pyörivien terien viereen. Tuhka-seos kuljetettiin rakennuspaikalle kuorma-auton lavalla peitettynä. (Ahlqvist, 2000 ; Jyrävä, 2001 ; Jyrävä, 2013)

Tuhkarakenne



Kuva 4.3. Inkoon tuhkarakenteen rakenneleikkaus

Lopuksi kaikkien sivutuoterakenteiden päälle levitettiin vähintään 100 mm paksuinen suojakerros kalliomurskeesta $d = 0...16$ mm. Rakenteen lopullinen tiivistys tehtiin tämän murskekerroksen päältä, jolloin kerros toimi myös tasauserroksena myöhemmin tehtävää päällystystä varten. Tuhkarakenteen loppuosalla rakennetta jouduttiin vahvistamaan asentamalla tuhkerakroksen päälle suodatinkangas, koska kerros pehmeni rankkojen sateiden vuoksi. (Ahlqvist, 2000 ; Jyrävä, 2001 ; Jyrävä, 2013)

4.1.3 Aikaisemmat tutkimukset

Pilot-kohteessa on tehty kuntokartoituksia, kantavuuskokeita sekä näytteenottoja ennen rakennustöiden aloittamista ja rakennustöiden jälkeen. Tutkimukset aloitettiin ennen rakentamista keväällä 2000, jolloin kartoitettiin tien lähtötilanne. Koerakenteita seurattiin koko rakennustyön ajan ja kohteen varsinainen seuranta aloitettiin keväällä 2001. Viimeisimmät seurantatulokset ovat vuodelta 2004. Taulukossa 4.2 on esitetty koekohteessa tehdyt seurantatutkimukset vuosilta 2000–2004. Koekohteessa on suoritettu myös ympäristönäytteenottoa sekä pohjavesitutkimuksia, mutta niitä ei käsitellä tässä työssä. (Ahlqvist, 2000 ; Jyrävä, 2001 ; Jyrävä 2013)

Taulukko 4.2. Inkoon koekohteella vuosina 2000 - 2004 tehdyt tutkimukset

Vauriokartoitus	Kantavuusmittaus	Rakennetutkimus
kevät 2000	kevät 2000	kesä 2000
kevät 2001	kevät 2001	kesä 2001
kevät 2002	kevät 2002	
kevät 2003	kevät 2003	
kevät 2004	kevät 2004	kesä 2004

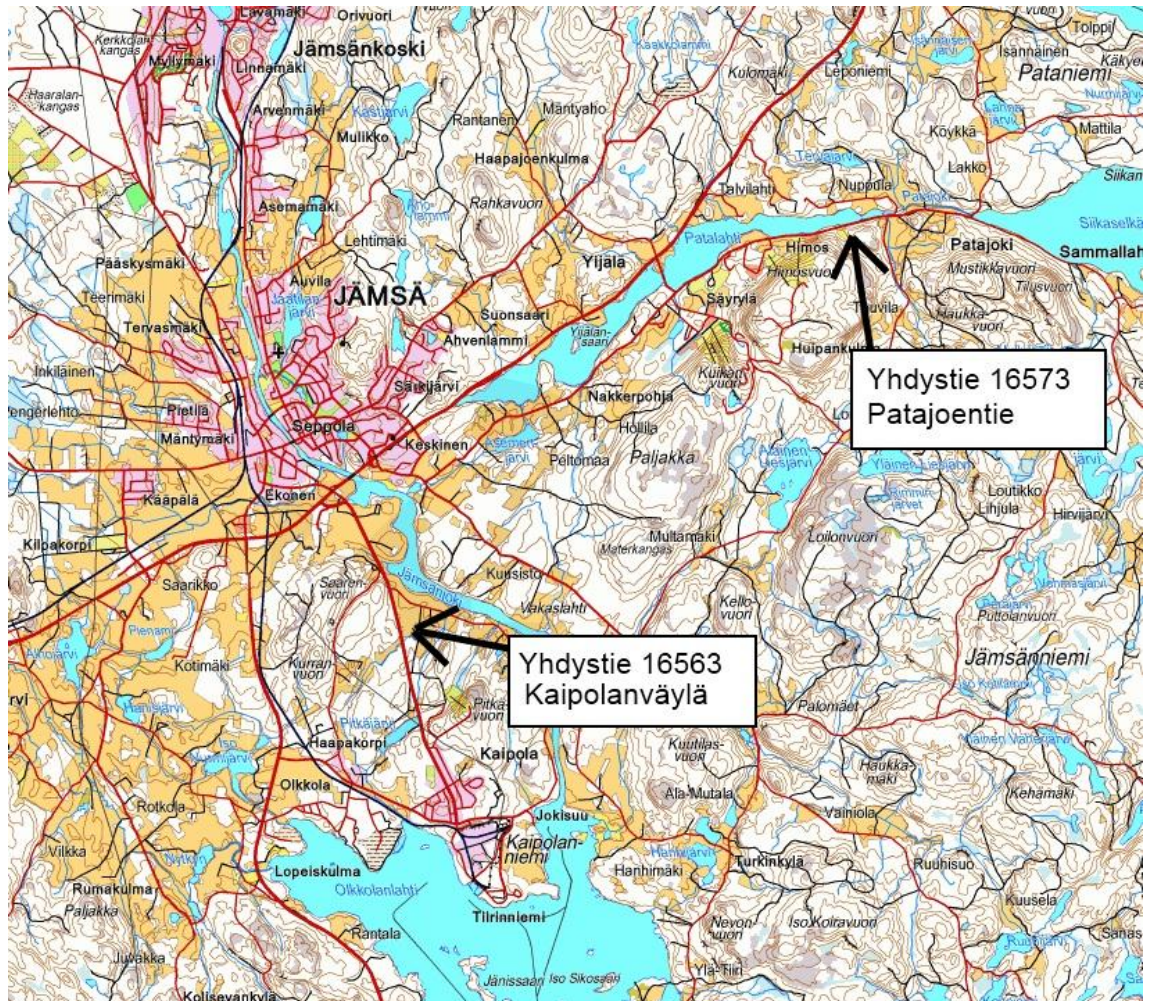
4.2 Jämsä

Keski-Suomen UUMA 2010 –kehitysohjelmaan kuului Jämsän alueen lentotuhkien laajamittainen kokeilu. Hankkeen puitteissa rakennettiin kesän ja syksyn 2010 aikana kaksi tuhkarakennuskohdetta Jämsään, tiet 16563 Kaipolanväylä ja 16573 Patajoentie. Rakentamisessa käytettiin seospolton lentotuhkaa ja käytettäviä rakenteita olivat vanhan rakenteen kerrosstabilointi sekä massiivituhkarakenteen ja kerrosstabiloinnin yhdistelmä.

4.2.1 Koekohteiden kuvaus

Yhdystie 16563 Seppola – Kaipola sijaitsee Jämsän kunnassa Keski-Suomessa, ja nimeltään tieosuus on Kaipolanväylä. Kaipolanväylä on kaksikaistainen asfaltoitu maantie, joka kulkee valtatie 9 ja Kaipolan kylän välillä. Tie on melko vilkasliikenteinen ja tiellä kulkee paljon raskasta liikennettä, sillä Kaipolassa sijaitsee muun muassa UPM-Kymmene Oyj:n paperitehdas. Kaipolanväylän sijainti on esitetty kuvassa 4.4. (Kiviniemi, 2010; Ronkainen, 2013)

Yhdystie 16573 Hiidenmäki – Vaheri sijaitsee myös Jämsän kunnassa Keski-Suomessa, ja nimeltään tieosuus on Patajoentie. Patajoentie on myös kaksikaistainen asfaltoitu maantie ja tiellä on melko paljon liikennettä, sillä tien varressa sijaitsee Himoksen las-kettelukeskus. Patajoentien sijainti on esitetty kuvassa 4.4. (Kiviniemi, 2010; Ronkainen, 2013)



Kuva 4.4. Jämsän koekohteiden sijainti (kuva: paikkatietoikkuna)

Kaipolanväylän koekohte

Kaipolanväylän koekohte alkaa valtatie 9 eteläisestä liittymästä, tierekisterin mukaisen tieosan 01 paalulta 300. Koekohteen alkupää kulkee peltojen keskellä ja Kaipolaa kohden mennessä tie nousee metsäisempään maastoon. Kaipolanväylän koekohte päättyy tierekisterin mukaiselle paalulle 4450, eli kohteena olevan tieosan pituus on 4150 metriä. Paalusta 4450 eteenpäin vanha rakenne oli vahvistettu teräsverkolla, joten stabiilointia ei voitu viedä tämän pidemmälle. Lähtötilanteessa vuonna 2010 maantie 16563 oli lievästi tai merkittävästi urautunut. Lievästi urautuneilla osuuksilla lähemmin tarkasteltuna tie pinta oli kauttaaltaan verkkohalkeillutta. Merkittävästi urautuneilla osuuksilla tien pinta oli ajourien kohdalta pitkien, yhtenäisten pituushalkeamien rikkomaa. Kuvassa 4.5 on esitetty tyypillinen näkymä tieltä 16563 ennen korjauksia. (Kiviniemi, 2010; Ronkainen, 2013)



Kuva 4.5. Tyypillinen näkymä tiellä 16563 ennen korjauksia. (kuva: Kiviniemi, 2010)

Patajoentien koekohde

Patajoentien koekohde alkaa Säyrylänsalmentien ja Patajoentien risteyksestä, tierekisterein mukaisen tieosan 02 alusta, paalulta 0. Koekohde on 4670 m pituinen, eli kohde loppuu tieosan 03 paalulle 108. Patajoentie kulkee Patalahden rantaa Himosvuorta kiertäen ja tie on lähes koko matkalta rakennettu poikittain rinteeseen siten, että maasto nousee tien oikealle puolelle ja laskee vasemmalle puolelle. Koekohteen alkupuoliskolle Patajoentien vasemmalle puolelle, paaluvälille 0-2000, on rakennettu kevyenliikenteenväylä, joka on erotettu viherkaistalla autotiestä. Alkutilanteessa Patajoentie oli pääosin kantavuudeltaan riittämätön ja selvästi urautunut. Kolmannes koekohteesta oli myös merkittävien routahalkeamien vaurioittama. Kuvassa 4.6 on esitetty tyypillinen näkymä tieltä 16573 ennen korjauksia. (Kiviniemi, 2010; Ronkainen, 2013)



Kuva 4.6. Tyypillinen näkymä tieltä 16573 ennen korjauksia. (kuva: Kiviniemi, 2010)

4.2.2 Koerakenteet

Kaipolanväylän koerakenteet

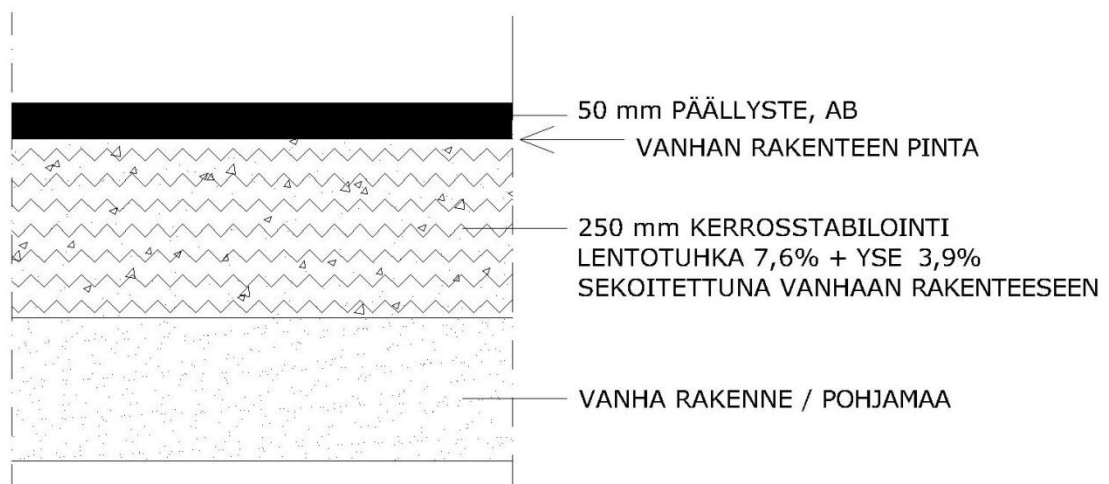
Yhdystie 16563 parannustoimenpiteeksi suunniteltiin vanhan rakenteen kerrosstabilointi ja se toteutettiin syyskuun aikana vuonna 2010. Kohteen rakennustyöt aloitettiin 20.9.2010 vanhan rakenteen jyrinnällä ja 30.9.2010 stabilointi oli valmis. Kerrosstabilointirakenteet toteutettiin käyttämällä UPM-Kymmene Oyj:n Kaipolan ja Jämsänkosken tehtailta peräisin olevaa lentotuhkaa, joka oli loppukesällä varastoitu aumoihin Pitkäniemen kaatopaikka-alueelle. Molempien tehtaiden voimalaitosten polttoaineina käytetään pääosin puupohjaisia polttoaineita ja Kaipolassa poltetaan myös siistauslietettä. Käytetty sementti oli Finnsementti Oy:n Paraisten tehtaalta valmistamaa yleissementtiä (CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N). Koerakenteiden sijoittuminen, tehdyt toimenpiteet sekä käytetyt materiaalit on esitetty taulukossa 4.3. (Kiviniemi, 2010; Ronkainen, 2013)

Taulukko 4.3. Yhdystielle 16563 tehdyt koerakenteet sekä niiden sijoittuminen ja käytetyt materiaalit

Paaluväli	Rakennusaika	Toimenpide	Materiaalit
01/300 – 01/4450	09/2010	<u>Vanhan rakenteen kerrosstabilointi</u> -stabilointijyrästä 200 mm syvyydeltä vanhaan rakenteeseen -päälle murske 100 mm + päällyste AB 50 mm	Sideaineena UPM-Kymmene Oyj:n Kaipolan ja Jämsänkosken lentotuhka (7,6 %) + YSe (3,9 %) -kokonaissideainemäärä 63,6 kg/m ²

Kaipolanväylän kerrosstabilointirakenteen teoreettinen rakenneleikkaus on esitetty kuvassa 4.7. Kerrosstabiloinnissa käytetty lentotuhkasta ja sementistä sekoitettu sideaineseos valmistettiin Andament Oy:n asemasekoittimella ja kuljetettiin työkohteisiin peitettynä kuorma-auton lavalla. Kaipolanväylällä sideaineseosta käytettiin yhteensä 2411 tonnia ($w = 20\%$). Sideaine levitettiin kertaalleen jyrityn tierakenteen pintaan asfalttilevittäjällä ja tämän jälkeen rakenne jyrättiin toiseen kertaan. Stabilointijyrityksen jälkeen rakenne tiivistettiin täryjyrällä. Uuden rakenteen myötä tien taseaus nousi vain uuden päällysteen paksuuden verran, sillä kerrosstabiloinnin päälle ei ajettu taseuskerrosta kiviaineksesta. Uusi asfaltointi tehtiin suoraan stabiloidun kerroksen yläpintaan. (Kiviniemi, 2010; Ronkainen, 2013)

Vanhan rakenteen stabilointi



Kuva 4.7. Kaipolanväylän parannustoimenpiteen teoreettinen rakenneleikkaus.

Patajoentien koerakenteet

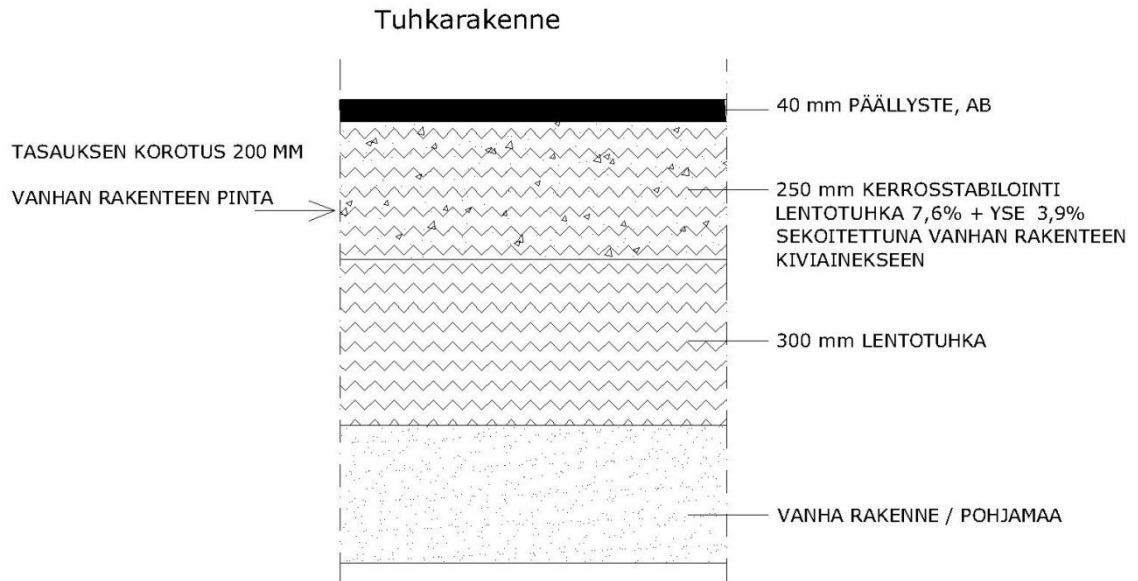
Yhdystien 16573 parannusvaihtoehdoiksi suunniteltiin vanhan päällysrakenteen kerrosstabilointia sekä yhdistelmärakennetta, jossa kerrosstabiloidun kantavan kerroksen alapuolelle rakennettiin ensin kostutetusta kasalentotuhkasta jakava kerros. Suunnitellut rakenteet toteutettiin siten, että massiivituhkarakenteet rakennettiin 30.8. – 22.9.2010 välisenä aikana ja kerrosstabiloinnit 4. – 9.10.2010 välisenä aikana. Yhdyksiellä 16573 käytettyjen koerakenteiden materiaalit, toimenpiteet sekä sijoittuminen on esitetty taulukossa 4.4. (Kiviniemi, 2010; Ronkainen, 2013)

Taulukko 4.4. Yhdystielle 16573 tehdyt koerakenteet sekä niiden sijoittuminen ja käytetyt materiaalit

Paaluväli	Rakennusaika	Toimenpide	Materiaalit
02/0 – 02/290 02/675 – 02/975 02/2050 – 02/2365	10/2010	<u>Vanhan rakenteen kerrosstabilointi</u> -stabilointijyrsintä 250 mm syvyydeltä vanhaan rakenteeseen -päälle asfaltti 40 mm	Sideaineena UPM-Kymmene Oyj:n Kaipolan ja Jämsänkosken lentotuhka (7,6 %) + YSe (3,9 %) -kokonaissideainemäärä 55 kg/m ²
02/290 – 02/675 *(02/975 – 02/1284) 02/1284 – 02/1950 02/2365 – 02/3605 02/3750 – 02/4375 02/4475 – 02/4562 03/0 – 03/108	08-09/2010	<u>Yhdistelmä tuhkarakenne</u> -sivutuotekerros 300 mm + murske 250 mm -stabilointijyrsintä tuhkarakenteen ja murskeen päältä. (Sama toimenpide kuin vanhan rakenteen kerrosstabilointi) *(osa massiivirakenteesta korvattiin kalliomurskeella d = 0...32 mm)	Kaipolan ja Jämsänkosken lentotuhka -ei sideainetta -osin vanhaa kasatuhkaa ja osin noin 8 kk vanhaa peltokäyttöön tarkoitettua tuhkaa (50:50) -kerrosstabiloinnissa samat sideaineet kuin vanhan rakenteen kerrosstabiloinnissa
02/1950 – 02/2050 02/3605 – 02/3750 02/4375 – 02/4475		<u>Pelkkä päällystys</u> - uusi päällyste 40 mm	

Patajoentien vanhan rakenteen kerrosstabilointi toteutettiin samalla tavalla kuin Kaipolanväylällä, ainoana erona oli hieman ohuempi päällyste stabiloidun kerroksen päällä. Sideaineseosta Patajoentien kerrosstabilointeihin kului yhteensä 1427 tonnia (w = 20 %).

Massiivituhkarakenne toteutettiin siten, että vanhaa tierakennetta leikattiin 390 mm ja leikkauspinnan päälle tiivistettiin 300 mm kerros lentotuhkaa. Massiivituhkarakenteessa käytettiin vanhaa kasatuhkaa sekä noin 8 kk vanhaa peltolevitykseen tarkoitettua tuhkaa, jotka sekoitettiin keskenään ja kostutettiin aumasekoittimella varastoalueella. Kaikkien tuhkien alkuperä oli sama. Massiivituhkarakenteeseen kului kokonaisuudessa 11152 tonnia kostutettua lentotuhkaa (w = 30...50%). Patajoentien massiivituhkarakenteen periaateleikkaus on esitetty kuvassa 4.8.



Kuva 4.8. Patajoentiellä käytetyn tuhkarakenteen teoreettinen rakenneleikkaus

4.2.3 Aikaisemmat tutkimukset

Koekohteiden lähtötilanteet kartoitettiin 18.5. – 20.5.2010 välisenä aikana. Lähtötilanteen kartoituksessa Kaipolanväylälle ja Patajoentielle tehtiin vauriokartoitukset. Kohteita seurattiin koko rakentamisen ajan ja kohteisiin on tehty seurantatutkimukset vuosina 2011 ja 2012. Taulukossa 4.5 on esitetty Kaipolanväylälle tehdyt seurantatutkimukset ja taulukossa 4.6 Patajoentielle tehdyt tutkimukset. (Kiviniemi, 2010; Kiviniemi, 2011; Kiviniemi, 2012; Ronkainen, 2013)

Taulukko 4.5. Kaipolanväylälle tehdyt seurantatutkimukset

Vauriokartoitus	Kantavuusmittaus	Rakennetutkimus
kevät 2010		
kevät 2011	kevät 2011	kesä 2011
kevät 2012	kevät 2012	kesä 2012

Taulukko 4.6. Patajoentielle tehdyt seurantatutkimukset

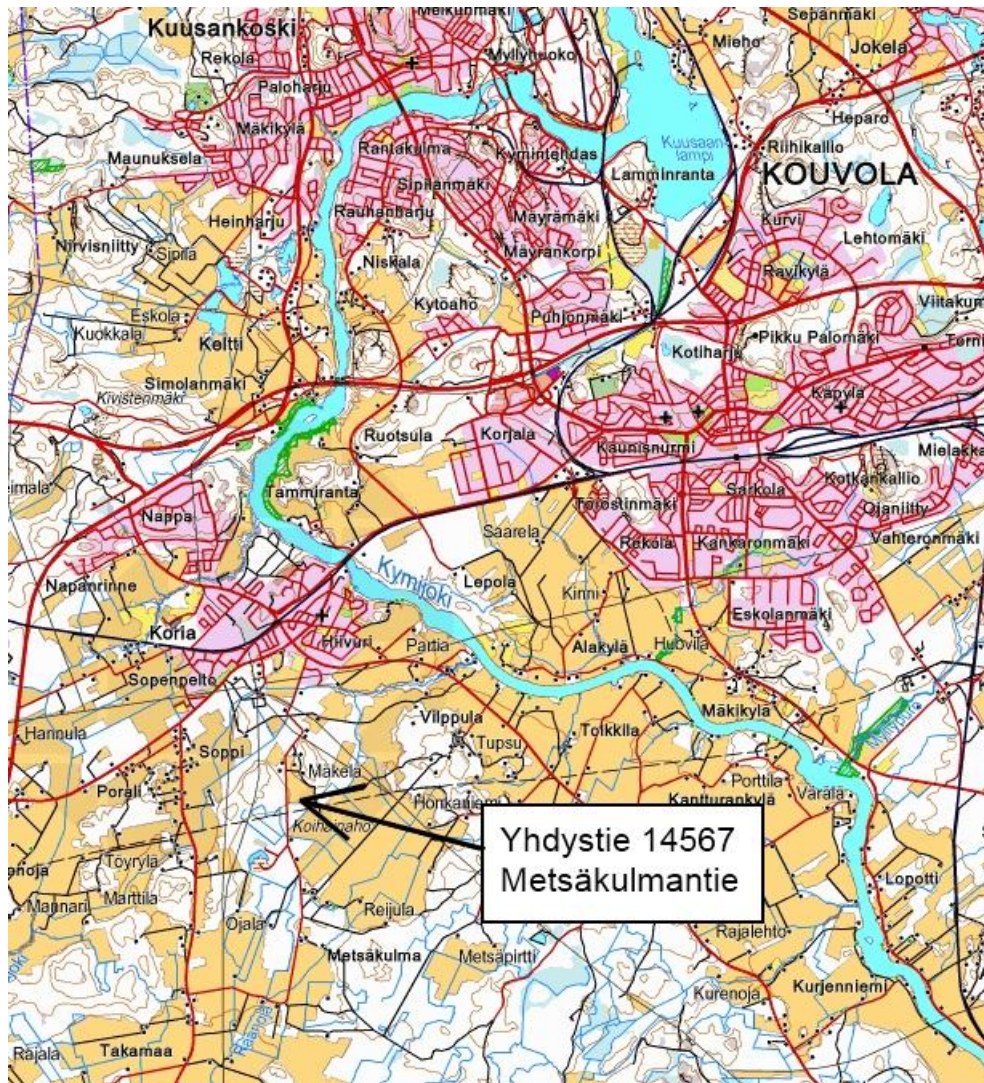
Vauriokartoitus	Kantavuusmittaus	Rakennetutkimus
kevät 2010		
kevät 2011	kevät 2011	kesä 2011
kevät 2012	kevät 2012	kesä 2012

4.3 Korja

Korian tuhkarakenteet on rakennettu kahdessa vaiheessa. Ensimmäinen vaihe toteutettiin vuonna 1998 osana laajempaa hanketta, jolloin kohteeseen rakennettiin seospolton lentotuhkilla massiivisia tuhkarakenteita ja vertailuksi myös synteettisiä geovahvistarakenteita sekä teräsverkkorakenne. Toinen vaihe toteutettiin vuonna 2001, jolloin kohteeseen rakennettiin kivihiilenpolton lentotuhkasta massiivirakennetta sekä vertailuksi murskerakenteita.

4.3.1 Koekohteen kuvaus

Koria on yksi Kouvolan kaupunginosista ja se sijaitsee Kouvolan lounaispuolella. Korian koerakenteet sijaitsevat yhdystiellä 14567, joka on nimeltään Metsäkulmantie. Kohteen sijainti on esitetty kuvassa 4.9.



Kuva 4.9. Korian koekohteen sijainti (kuva: paikkatietoikkuna)

Korian koerakennuskohde sijoittuu tien 14567 tierekisterin mukaisen tieosan 01 paaluvälille 500 – 2550. Metsäkulmantie on sorapäälysteinen, noin 7 m levyinen yhdystie. Kohde sijoittuu melko tasalaatuiselle alueelle, jossa pohjamaa on savista silttiä. Pehmeä kerros ulottuu kohteessa vuonna 1998 tehtyjen kairausten perusteella yli kymmen metrin syvyyteen miltei koko rakennusalueella. Vuonna 2001 tehtyjen kairausten perusteella paaluvälillä 500 – 1500 tien päällysrakenteen paksuus on noin 0,5...0,7 m. Rakenteessa on käytetty soraa ja hiekkaa. Pääasiallisena ongelmana kohteessa ennen koerakenteiden rakentamista oli ollut heikon kevätkantavuuden lisäksi tien leviäminen ojiin päin sekä heikot reunakantavuudet yleensäkin. Lisäksi rakennekerrokset olivat sekoittuneet vähitellen pohjamaahan. (Jyrävä, 1999; Jyrävä, 2013)

4.3.2 Koerakenteet

Vuonna 1998 Metsäkulmantielle rakennettiin seitsemän erilaista tierakennevaihtoehtoa paaluvälille 1500 – 2550. Neljän erilaisen tuhkarakenteen lisäksi kohteeseen rakennettiin paaluvälille 2385 - 2550 vertailurakenne perinteistä murskerakennetta käyttäen. Lisäksi Metsäkulmantielle paaluvälille 1500 - 1695 rakennettiin rakenteita teräsverkkoa sekä synteettisiä geolujitteita käyttäen. Vuonna 2001 Metsäkulmantielle rakennettiin tuhkarakenne paaluvälille 1000 – 1500. Samalla rakennettiin myös vertailurakenne murskeesta paaluvälille 500 – 1000. Ensimmäiset tuhkarakenteet rakennettiin 2.9. – 7.9.1998 ja toiset elokuussa 2001. Tuhkarakenteiden sijoittuminen tielinjalla, käytetyt materiaalit ja menetelmä on selvitetty taulukossa 4.7. (Jyrävä, 1999; Jyrävä, 2013)

Taulukko 4.7. Korian koekohteen tuhkarakenteet.

Paaluväli	Rakennusaika	Toimenpide	Materiaalit
01/1000 – 01/1500	08/2001	<u>Tuhkarakenne 1</u> -stabiloitu sivutuotekerros 200 mm + murske 100-150 mm -sivutuotekerroksen leveys 6 metriä	Espoon sähkön lentotuhka + Helsingin Energian rikinpoiston lopputuote 85:15 -sideaine (CaO + YSe 1:1) 5 %
01/1695 – 01/1840	09/1998	<u>Tuhkarakenne 2</u> -stabiloitu sivutuotekerros 200 mm + murske 100 mm	Lahden lämpövoima Oy:n lento- tuhka -sideaineena Nordkalkin FT2 6%
01/1860 – 01/2000	09/1998	<u>Tuhkarakenne 3</u> -stabiloitu sivutuotekerros 200 mm + murske 100 mm	Kymenso Oy:n Anjalankosken lentotuhka -sideaineena YSe 3%
01/2135 – 01/2250	09/1998	<u>Tuhkarakenne 4</u> -sivutuotekerros 200 mm ilman sideainetta + murske 100 mm	UPM Oyj Voikkaan lentotuhka -ei sideainetta
01/2250 – 01/2385	09/1998	<u>Tuhkarakenne 5</u> -stabiloitu sivutuotekerros 250 mm + murske 100 mm	Myllykoski Paper Oy:n arinatuh- ka -sideaine YSe 6%

Vanhan tierakenteen pinta höylättiin tiehöylällä ennen tuhkarakenteen rakentamista taiseksi ja pintakerros aurattiin tien reunoihin tuhkarakenteen tukipenkereiksi. Vuonna 1998 tuhkan, sideaineen ja veden sekoitus tehtiin Korian kaatopaikalla asemasekoittimella ja kuljetettiin käyttövalmiina massana kuorma-autolla kohteeseen. Vuonna 2001 käyttövalmis tuhcaseos valmistettiin silloisen LT-Tuhkimo Oy:n sekoitusasemalla Koriolla. Tuhcaseos levitettiin tielle tukipenkereiden väliin tiehöylällä ja esitiivistettiin höylän renkailla. Lopullinen tiivistys tehtiin hinattavalla täryvalssijyrällä. Kuvassa 4.10 on esitetty tiehöylän toimintaa tukipenkereiden rakentamisessa sekä tuhkan levityksessä. (Jyrävä, 1999; Jyrävä, 2013)



Kuva 4.10. Tiehöylän toimintaa tuhkarakenteen rakentamisessa Metsäkulmantiellä. (Kuva: Jyrävä, H.)

Metsäkulmantiellä tuhkarakenteissa käytettiin vuonna 1998 valmiita tuhcaseoksia seuraavasti:

- paaluvälille 1695 – 1840 käytettiin 278,5 tonnia tuhcaseosta, jonka keskimääräinen vesipitoisuus oli 19 %
- paaluvälille 1860 – 2000 käytettiin 280,1 tonnia valmista tuhcaseosta, jonka vesipitoisuus oli keskimäärin 26 %
- paaluvälille 2135 – 2250 käytettiin noin 205 tonnia tuhkaa, jonka vesipitoisuus oli keskimäärin noin 22 %
- paaluvälille 2250 – 2385 käytettiin noin 211,7 tonnia valmista seosta, jonka vesipitoisuus oli keskimäärin noin 51 %

4.3.3 Aikaisemmat tutkimukset

Metsäkulmantien koerakenteita on seurattu aikaisemmin vuosina 1999 – 2003. Alkutilanteiden kartoitukset on toteutettu vuosina 1998 ja 2001. Kohteeseen tehdyt seuranta-tutkimukset on esitetty taulukossa 4.8. (Jyrävä, 1999; Jyrävä, 2013)

Taulukko 4.8. Metsäkulmantien seuranta-tutkimukset vuosina 1998 - 2003.

Vauriokartoitus	Kantavuusmittaus	Rakennetutkimus
kevät 1998	kevät 1998	
kevät 1999	kevät 1999	kevät 1999
kevät 2000	kevät 2000	
kevät 2001	kevät 2001	
kevät 2002	kevät 2002	kevät 2002
kevät 2003	kevät 2003	

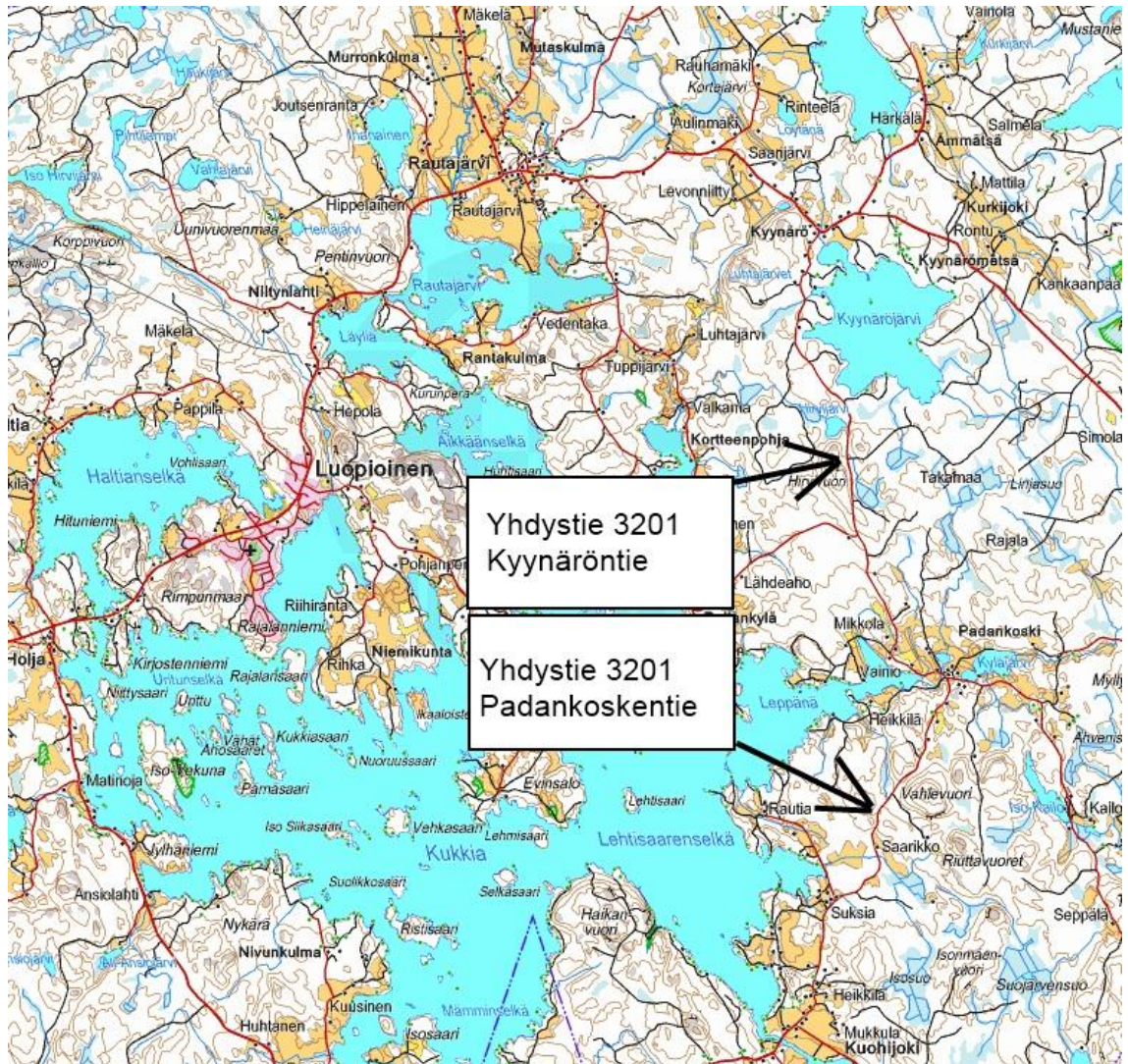
Kohteen tuhkarakenteisiin on tehty myös instrumentointeja, joiden avulla on seurattu rakenteiden lämpötiloja ja siirtymiä, mutta näitä tuloksia ei käsitellä tässä työssä.

4.4 Kukkia

Kukkia Circler –hanke on demonstraatioprojekti, jossa on tutkittu teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämiseen perustuvia ympäristömyönteisiä menetelmiä soratieverkon ylläpitämiseen ja kunnostukseen. Hanke on koostunut useasta osatehtävästä, joista tässä työssä tarkastellaan Pilot 2002 – osuutta. Hanke toteutettiin vuonna 2002 ja kohteessa testattiin kolmea erilaista kerrosstabilointia, joissa oli käytetty seospolton lentotuhkia erilaisin aktivaattorein.

4.4.1 Koekohteen kuvaus

Kukkian Pilot 2002 koekohde sijaitsee Pälkäneen Luopioisissa Pirkanmaalla, yhdystiellä 3201 välillä Kuohijoki – Kyynärö. Tieräkisterin mukaisesti koekohde sijaitsee tien 3201 tieosan 03 paalulta 1058 paalulle 5851 ja tieosan 04 paalulta 0 paalulle 7356. Kohteen rakentamisessa on käytetty omaa paalutusta (plv. 0 – 12180), jolloin kohteen 0-paalu on tieräkisterin mukaisen tieosan 03 paalulla 1058. Koetien alkupää on nimeltään Padankoskentie ja Padankosken kylän kohdalla tien nimi muuttuu Kyynäröntieksi. Kohteen sijainti on esitetty kuvassa 4.11. (Jyrävä, 2013)



Kuva 4.11. Kukkian kohteen sijainti. (kuva: paikkatietoikkuna)

Padankoskentie ja Kynnäröntie ovat sorapäällysteisiä noin 7 m levyisiä maanteitä. Tiet palvelevat paikallisliikennettä ja jonkin verran maataloudesta sekä metsätaloudesta aiheutuvaa liikennettä. Koetie kulkee vaihtelevassa metsämaastossa, jossa pohjamaa on pääsääntöisesti moreenia tai silttiä. Koetiellä on myös kallioisia kohtia, joissa kallion pinta nousee lähelle tien pintaa. Alkutilanteessa Padankoskenttiellä ja Kynnäröntiellä on aiheuttanut heikko kantavuus ja tien routivuus. (Jyrävä, 2013)

4.4.2 Koerakenteet

Kukkian koekohteeseen rakennettiin kerrosstabilointirakennetta, jossa sideaine sekoitettiin 200 mm syvyydeltä vanhaan tien pintarakenteeseen. Tien pinnassa olevat maakivet harattiin ensin pois kaivinkoneella, jotta ne eivät häiritse stabilointijyrsintää. Stabiloinnissa käytettiin kolmea erilaista sideaineseosta, joista kaikki seokset sisälsivät lentotuhkaa. Käytetyt tuhkat olivat biopolton tuhkia ja peräisin pääasiassa UPM-Kymmene

Oyj:n Jämsänkosken tehtaalta. Tuhkarakenteiden sijoittuminen tielinjalla, käytetyt materiaalit ja menetelmä on selvitetty taulukossa 4.9. (Jyrävä, 2013)

Taulukko 4.9. Kukkian koekohteen tuhkarakenteet.

Paaluväli	Rakennusaika	Toimenpide	Materiaalit
2850 – 4350 7640 – 8690 10340 – 12180	08/2002	<u>Vanhan rakenteen kerrosstabilointi</u> -stabilointijyrsintä 200 mm syvyydeltä vanhaan rakenteeseen -päälle murske 100 mm	Sideaineena Jämsänkosken/Kaipolan lentotuhka + YSe 3:2, 10% -kokonaissideainemäärä 44kg/m ²
5800 – 7640 8690 – 9320	08/2002	<u>Vanhan rakenteen kerrosstabilointi</u> -stabilointijyrsintä 200 mm syvyydeltä vanhaan rakenteeseen -päälle murske 50 mm ja suotojätämurskeseos 50 mm	Sideaineena Jämsänkosken lentotuhka + FTC (Nordkalk) 3:2, 10% -kokonaissideainemäärä 44kg/m ²
9320 – 10340	08/2002	<u>Vanhan rakenteen kerrosstabilointi</u> -stabilointijyrsintä 200 mm syvyydeltä vanhaan rakenteeseen -päälle murske 50 mm ja suotojätämurskeseos 50 mm	Sideaineena Jämsänkosken lentotuhka + Helsingin Energian rikinpoiston lopputuote + YSe 3:3:4, 10% -kokonaissideainemäärä 44kg/m ²

Rakenteessa, jossa sideaineena lentotuhkan lisäksi käytettiin yleissementtiä, käytettiin myös Kaipolan lentotuhkaa. Kaipolan ja Jämsänkosken tuhkaa ei kuitenkaan sekoitettu keskenään eikä Kaipolan lentotuhkaa käytetty kahdessa muussa stabilointirakenteessa. Lentotuhka ja muut sideaineet sekoitettiin keskenään asemasekoittimella Luopioisten Rankkimäessä ja kuljetettiin levityspaikalle kuorma-autolla. Sideaineseos levitettiin vanhan tien pintaan asfalttilevittimellä ja jysyttiin stabilointijyrsimellä vanhan rakenteen sekaan. Sideaineseosta sekoitettiin murskeeseen 10 % murskeen teoreettisesta märkämässasta ja levityksessä kokonaissideainemäärä oli 44 kg/m². Sideaineseoksen vesipitoisuutena pyrittiin pitämään 15 %. Stabilointityön laatua tarkkailtiin koko rakentamisen ajan. Kukkian koekohteeseen rakennettiin vertailurakenteita perinteisiä murskerakenteita käyttäen. Paaluvälille 1400 – 2850 tehtiin 20 mm korotus kulutuskerrokseen murskeesta (d = 0...16 mm). Paaluvälille 0 – 1400 tehtiin kelirikkokunnostus lisäämällä vanhan rakenteen päälle suodatinkangas, 300 mm mursketta d = 0...32 mm ja 20 mm mursketta d = 0...16 mm. Vertailurakenteeksi rakennettiin myös suotojäterakennetta, jossa vanhan rakenteen päälle levitettiin 50 mm mursketta d = 0...32 mm ja 50 mm suotojäte-murske -seosta. Suotojätevertailurakennetta rakennettiin paaluväleille 4350 – 5800 ja 9150 – 9320. (Jyrävä, 2013)

4.4.3 Aikaisemmat tutkimukset

Kukkian Pilot-2002 –hankkeen koerakenteita on seurattu aikaisemmin vuosina 2003 ja 2004. Alkutilanteen kartoitus tehtiin vuosina 2000 ja 2002. Tehdyt seurantatutkimukset on esitetty taulukossa 4.10. (Jyrävä, 2013)

Taulukko 4.10. Kukkian koekohteen seurantatutkimukset

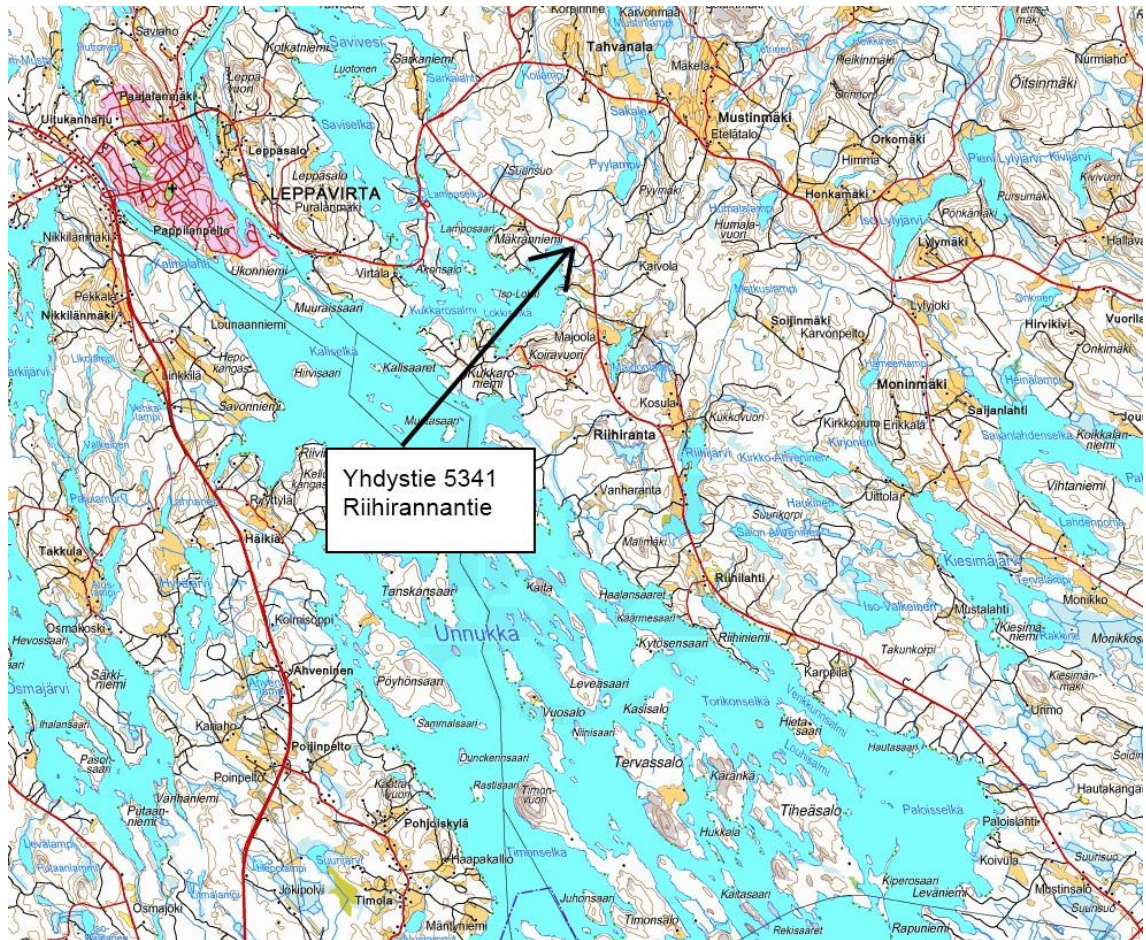
Vauriokartoitus	Kantavuusmittaus	Rakennetutkimus
kevät 2002	kevät 2000	
kevät 2003	kevät 2002	kesä 2003
kevät 2004	kevät 2004	kesä 2004

4.5 Leppävirta

Leppävirran Pilot -kohde rakennettiin vuonna 2002 ja kohteessa testattiin kahta erilaista lentotuhkarakennetta – massiivista lentotuhkakerrosta ja kerrosstabilointia. Käytetyt lentotuhkat olivat puunpolton/seospolton lentotuhkaa.

4.5.1 Koekohteen kuvaus

Leppävirran koekohde sijaitsee yhdystiellä 5341, välillä Mustinsalo – Sarkalahti. Koerakenteet on rakennettu tierekisterin mukaisen tieosan 04 paaluvälille 760 – 2300. Koekohde on nimeltään Riihirannantie, joka on noin 7 m levyinen soratie. Riihirannantie on noin 20 km pituinen yhdystie, joka kulkee Joensuuntieltä (vt 23) Heinävedentielle (st 534). Koekohde alkaa noin 15,7 km päästä Joensuuntieltä ja on 1540 m pituinen. Koekohteen sijainti on esitetty kuvassa 4.12. (Jyrävä, 2013)



Kuva 4.12. Leppävirran koekohteen sijainti. (kuva: paikkatietoikkuna)

Riihirannantie kulkee metsäisessä, vaihtelevassa maastossa, jossa pohjamaa on kivistä silttimoreenia. Ongelmana tiellä on ollut kantavuuden puute ja routiminen sekä tien urautuminen. Tiessä on ollut myös runsaasti maakiviä.

4.5.2 Koerakenteet

Leppävirran koerakenteet rakennettiin 9.9 – 16.9.2002 välisenä aikana. Koekohteen paaluväleille 760 – 1040 ja 1900 – 2300 tehtiin vanhan rakenteen kerrosstabilointi, jossa sideaineena käytettiin Varkauden Stora Enso Oyj:n kuorikattilan lentotuhkaa sekä yleisementtiä. Paaluvälille 1040 – 1900 rakennettiin stabiloitu tuhkarakennekerros käyttäen samaa tuhkaa ja sideainetta kuin kerrosstabiloinnissakin. Leppävirran koekohteen tuhkarakenteiden sijainti, tehdyt toimenpiteet ja käytetyt materiaalit on selitetty taulukossa 4.11. (Jyrävä, 2013)

Taulukko 4.11. Leppävirran koekohteeseen tehdyt tuhkarakenteet.

Paaluväli	Rakennusaika	Toimenpide	Materiaalit
04/760 – 04/1040 04/1900 – 04/2300	09/2002	<u>Vanhan rakenteen kerrosstabilointi</u> -stabilointijyrsintä 200 mm syvyydeltä vanhaan rakenteeseen -päälle murske 100 mm	Sideaineena Stora Enso Oyj:n kuorikattilan lentotuhka + YSe 2:1, 9% -kokonaissideainemäärä 40,5 kg/m ² , kun w = 10 %
04/1040 – 04/1900	09/2002	<u>Tuhkarakenne</u> -stabiloitu sivutuotekerros 200 mm +murske 100 mm	Stora Enso Oyj:n kuorikattilan lentotuhka -sideaineena YSe 3%

Kerrosstabiloinnissa ja tuhkarakenteessa käytetyt tuhkaseokset sekoitettiin Varkaudessa, Taipaleen kanavan varrella sijaitsevalla varastoalueella. Sekoitukseen käytettiin asema-sekoitinta, jonka avulla tuhka, sementti ja vesi sekoitettiin keskenään. Varastoalueelle varastoitu kuiva lentotuhka pyrittiin kustuttamaan mahdollisimman myöhäisessä vaiheessa, jotta kustutetun lentotuhkan ominaisuuksien heikkeneminen olisi mahdollisimman vähäistä. Tuhkaseos kuljetettiin kohteeseen kuorma-autoilla ja kuljetusmatkaa kertyi keskimäärin noin 32 km. Kohteessa stabilointityö tehtiin asfalttilevittimen, vesiauton ja stabilointijyrsimen koneketjulla. Tuhka-yleissementti -seosta, jonka vesipitoisuus oli 10 %, levitettiin vanhan, haratun ja kertaalleen jyrityn tierakenteen päälle. Tämän jälkeen seos sekoitettiin vanhan rakenteen sekaan ja tiivistettiin. Massiivinen tuhkarakenne tehtiin samoin kuin esimerkiksi Korialla. Tuhkamassan laskennallinen tavoitevesipitoisuus oli 35 %. (Jyrävä, 2013)

4.5.3 Aikaisemmat tutkimukset

Leppävirran koekohteessa tien alkutilanne kartoitettiin ennen rakennustöitä vuonna 2002. Tuhkarakenteiden laatua seurattiin koko rakentamisen ajan ja rakentamisen jälkeen tuhkarakenteiden kunto kartoitettiin vuonna 2003. Vuonna 2003 koekohteessa tehtiin silmämääräinen kuntokartoitus, kantavuuskokeet sekä rakennetutkimus. (Jyrävä, 2013) Taulukossa 4.12 on esitetty kohteessa tehdyt seurantatutkimukset.

Taulukko 4.12. Leppävirran koekohteen seurantatutkimukset.

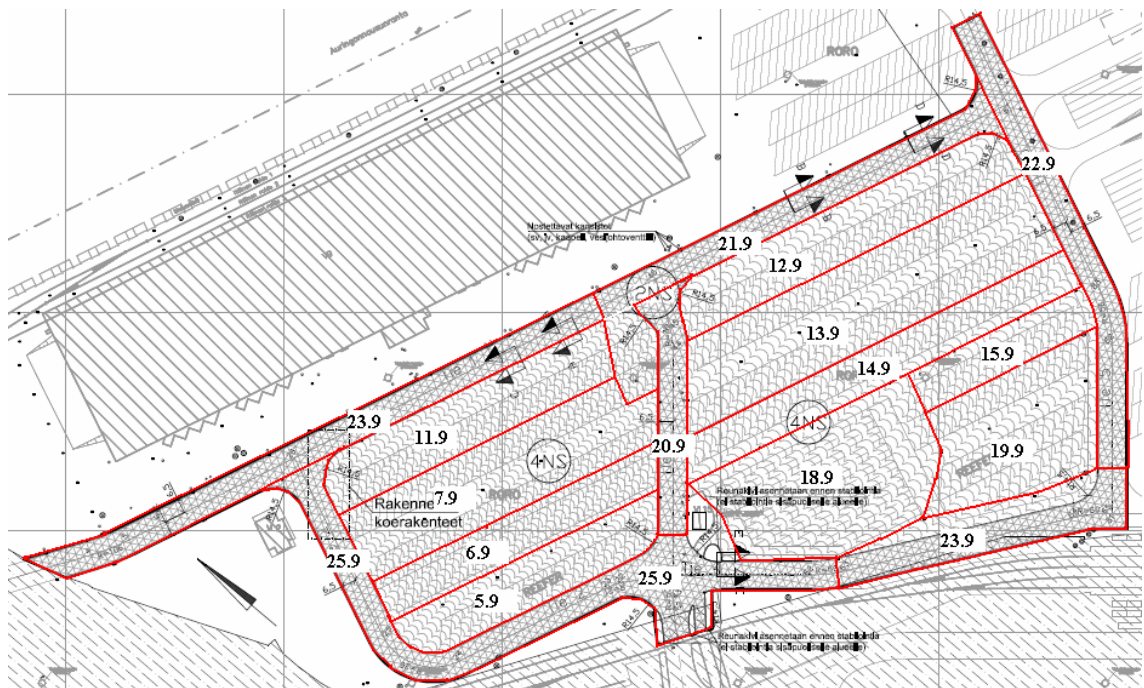
Vauriokartoitus	Kantavuusmittaus	Rakennetutkimus
kevät 2002	kevät 2002	
kevät 2003	kevät 2003	

4.6 Vuosaari

Vuosaaren satamassa toteutettiin vuonna 2006 noin 6 hehtaarin kokoisen satamakentän kantavan kerroksen kerrosstabilointi. Kohteessa käytettiin kantavan kerroksen murskeen stabilointiin kivihiilen pölypolton lentotuhkaa.

4.6.1 Koekohteen kuvaus

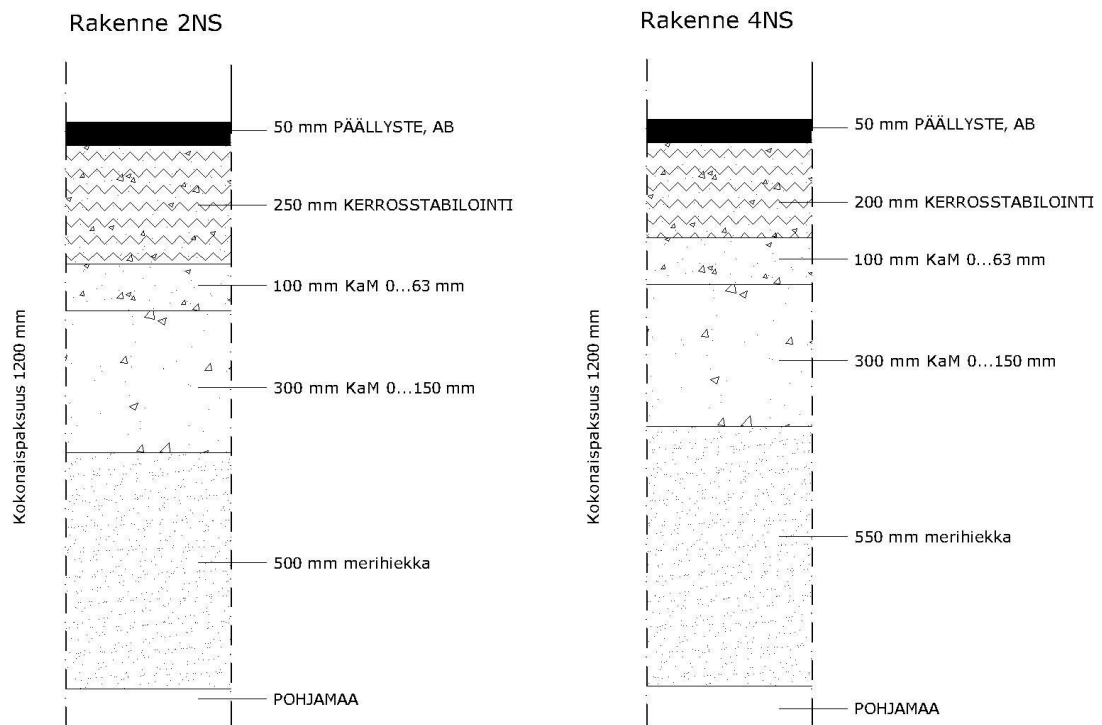
Koekohde sijaitsee Vuosaaren satama-alueen itäosassa. Stabiloidut alueet sekä stabilointipäivämäärät on esitetty kuvassa 4.13.



Kuva 4.13. Vuosaaren satama-alueen kerrosstabiloidut koalueet. (kuva: Ronkainen, 2007b)

4.6.2 Koerakenteet

Koerakenteet toteutettiin käyttäen sideaineseoksella kerrosstabiloitua kantavaa kerrosta. Sideaineseos koostui Yleissementistä CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N ja masuunikuonajauheesta KJ 400 sekä Helsingin Energian Hanasaaren B-voimalaitoksen lentotuhkasta ja rikinpoistolopputuotteesta, suhteessa 1:1:2:2. Näistä sementti ja kuonajauhe olivat kaupallisia tuotteita ja lentotuhka sekä rikinpoistotuote teollisuuden sivutuotteita. Runkoaineeseen sekoitettiin 12 painoprosenttia sideaineseosta materiaalien kuivamassoista laskettuna. Kerrosstabiloidun kantavan kerroksen runkoaineena toimi paikalla murskattu kalliomurske $D = 0 \dots 31$ mm. Alue on raskaasti kuormitettua aluetta ja siksi rakenteiden kantavuusvaatimukset ovat suuret. Alueen 2NS kantavuusvaatimukseksi päällysteen päältä oli asetettu 550 MPa ja alueen 4NS vaatimukseksi 470 MPa. Alueille 2NS ja 4NS suunnitellut rakenteet on esitetty kuvassa 4.14. (Ronkainen, 2007; Ronkainen, 2013)



Kuva 4.14. Vuosaaren satamakentän koerakenteiden rakennetyypit. (Ronkainen, 2007b)

Käytettävän sideaineen laskennallinen kokonaismassamäärä kuivana oli 3120 tonnia ja toteutuneella vesipitoisuudella laskennallinen kokonaismassamäärä 3698 tonnia. Urakoitsijan ilmoittama käytetyn sideaineen kokonaismassamäärä oli 4222 tonnia, joka sisälsi limitykset. Sekoitettun murske-sideaine –seoksen vesipitoisuuden tavoitearvo oli 6,5 % ja toteutuneet vesipitoisuudet vaihtelivat välillä 5,2 -8,5 %. (Ronkainen, 2007a; Ronkainen, 2013)

4.6.3 Aikaisemmat tutkimukset

Tuhkarakenteiden laatua seurattiin koko rakentamisen ajan ja rakentamisen jälkeen tuhkarakenteiden kunto kartoitettiin vuonna 2007 ja 2009. Vuonna 2007 koekohteessa tehtiin silmämääräinen kuntokartoitus, kantavuuskokeet sekä rakennetutkimus. Vuonna 2009 kohteessa havaittiin päällystevaurioita, joiden syntymekanismien selvittämiseksi kohteessa tehtiin silmämääräinen kuntokartoitus, kantavuuskokeet sekä rakennetutkimus. Tällöin asfalttipäällysteen paksuus todettiin osittain suunniteltua pienemmäksi. (Ronkainen, 2007b; Ronkainen, 2009; Ronkainen, 2013)

Taulukko 4.13. Vuosaaren sataman seuranta tutkimukset.

Vauriokartoitus	Kantavuusmittaus	Rakennetutkimus
2007	2007	2007
2009	2009	2009

5 TUHKARAKENNUSKOHTEILLE VUONNA 2013 TEHDYT SEURANTATUTKIMUKSET

5.1 Kenttätutkimukset

Kenttätutkimuksina koekohteilla tehtiin kantavuusmittaukset, rakennetutkimukset ja kuntokartoitukset.

5.1.1 Kantavuusmittaukset

Tien rakenteen ja sen kerrosten materiaalien käyttäytymistä liikennekuormituksen alaisena kuvaa tien pinnan pystysuora siirtymä, eli taipuma. Liikennekuormitusta pystytään simuloimaan pudotuspainolaitteella, jolla mitataan koetilanteessa tiehen kohdistuva voima ja sen aiheuttama tien pinnan taipuma. (Spoof, 2000)

Koekohteilla tehtiin kantavuusmittaukset KUAB FWD 50 pudotuspainolaitetta käyttäen. Kohteiden mittaukset teki West Coast Road Masters Oy. Tiekohteiden mittaukset tehtiin 3.6. - 5.6.2013 välisenä aikana ja Vuosaaren satamakentän kantavuusmittaukset 2.10.2013.

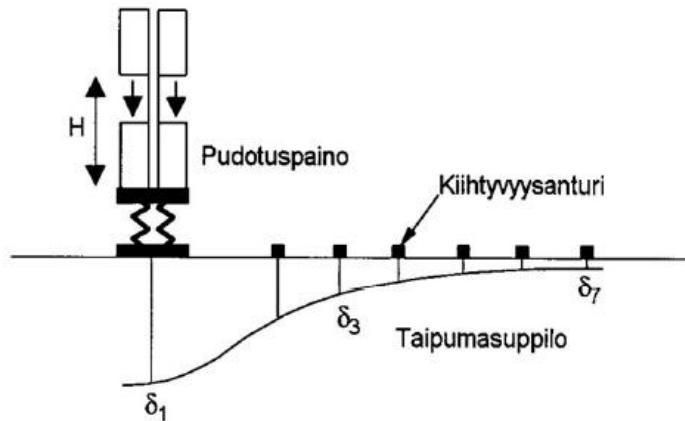
Koemenetelmä

Pudotuspainolaitteella kuormitustapahtuma on dynaaminen. Kuormituksessa kuormitusyksikön pudotusmassan annetaan pudota vapaasti kumivaimentimille, joiden välityksellä kuormitus siirtyy kuormituslevylle ja siitä tutkittavaan rakenteeseen. Yleensä kuormituslevy on 300 mm halkaisijaltaan oleva pyöreä levy. Pudotuskorkeus ja painon suuruus on säädettävissä ja näin myös tiehen kohdistuvan kuorman suuruus on säädettävissä. Yleisimmin käytetään 50 kN suuruista voimaa, joka vastaa levyn alla 10 tonnin akselipainoa. (Spoof, 2000) Pudotuspainon aikaansaaman kuormituspulssin kesto on normaalisti 20 - 60 ms, joka vastaa hyvin normaalinopeudella 70 – 80 km/h liikkuvan kuorma-auton tien pintaan kohdistamaa kuormituspulssia. (Ehrola, 1996) Tämän työn puitteissa suoritetuissa kantavuusmittauksissa käytettiin 300 mm kuormituslevyä ja 50 kN voimaa sekä noin 22 ms kuormitusaikaa.

Kokeessa tien pinnan pystysuoraa siirtymää mitataan useasta pisteestä eri etäisyyksiltä kuormituslevystä. Mittauspisteitä tulee olla vähintään kuusi kappaletta ja niiden etäisyydet voivat vaihdella välillä 0 - 2500 mm, kuitenkin siten, että anturien etäisyyksiä 0, 300, 600 ja 900 mm tulisi aina käyttää. (Spoof, 2000) Tulosten perusteella voidaan mää-

rittää kuormituksen rakenteen pintaan aiheuttaman taipumakuvion muoto. Taipumakuviosta käytetään nimitystä taipumasuppilo (kuva 5.1). Tämän työn puitteissa tehdyissä kantavuusmittauksissa käytettiin seitsemää mittaussanturia, joiden etäisyydet kuormituslevystä olivat 0, 200, 300, 450, 600, 900 ja 1200 mm.

Kuvassa 5.1 on esitetty pudotuspainolaitteen toimintaperiaate ja taipumasuppilon mitta-



Kuva 5.1. Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate ja taipumasuppilon mitta-
us (kuva: Ehrola, 1996)

Teoriaa tulosten tulkinnasta ja merkityksestä

Pudotuspainolaitteella mitattu taipumasuppilo kuvastaa koko tierakennetta ja sen avulla voidaan laskea tien eri rakennekerrosten kuntoa kuvaavia taipumasuppiloparametrejä sekä pintamoduuleja. (Spoof, 2000) Esitetyn teorian (Liimatta, 1989) mukaan taipumasuppilon muoto kuormituslevyn läheisyydessä kuvastaa päällysrakenteen yläosan olosuhteita ja taipumat etäällä kuormituslevystä alusrakenteen laatua. Taulukossa 5.1 on esitetty yhteenveto pudotuspainolaitteella mitattujen taipumien avulla laskettavista liikennealueen rakenteen jäykkyyttä kuvaavista parametreistä.

Taulukko 5.1. Pudotuspainolaitteella mitatusta taipumasuppilosta laskettavat parametrit. (Spoof, 2000; Liimatta, 1989)

Nimi	Merkintä	Yksikkö	Käyttötarkoitus
Keskitaipuma	d_0	μm	Kuvaa koko rakenteen ja pohjamaan jäykkyyttä
Taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä	d_r	μm	Kuvaa ekvivalenttisyvyydellä r olevan kerroksen jäykkyyttä
Surface curvature index, SCI	$d_0 - d_r$ $(d_0 - d_1)^*$	μm	Kuvaa päällysrakenteen yläosan kuntoa
Base curvature index, BCI	$d_{n-1} - d_n$ $(d_6 - d_7)^*$	μm	Kuvaa päällysrakenteen alaosan kerrosten / pohjamaan kuntoa
Base damage index, BDI	$d_1 - d_r$	μm	Kuvaa päällysrakenteen kuntoa
Spreadability, SP-%	$[\sum d_r / (n_g * d_0)] * 100$	%	Kuvaa sidottujen päällysrakenteiden laattavaikutusta sekä päällysrakenteen kykyä jakaa kuormitusta

* Suluissa ilmoitettu minkä antureiden taipumista tunnusluvut on tässä työssä laskettu.

Taulukossa 5.1 käytetyllä symbolilla d_0 tarkoitetaan kuormituslevyn alta mitattua taipumaa, eli pinnan maksimitaipumaa. Symboli d_r kuvaa tien pinnan taipumaa etäisyydellä r kuormituslevystä ja esitetyn teorian (Spoof, 2000) mukaan se kuvaa myös rakenteen taipumaa vastaavasta ekvivalenttisyvyydestä alaspäin. Monikerroksisessa rakenteessa, jossa kerroksilla on eri E-moduulit, tulee rakenne muuttua homogeeniseksi ekvivalenttisyysteemiksi. Monikerroksisen rakenteen ekvivalenttipaksuus saadaan laskettua kaavalla 10. (Liimatta, 1989)

$$h_e = n \left[\left(h_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \right) + \left(h_2 * \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} \right) + \dots + \left(h_{m-1} * \sqrt[3]{\frac{E_{m-1}}{E_m}} \right) \right] \quad [10]$$

jossa:

- h_e on ekvivalenttipaksuus [m]
 E_i rakennekerroksen i moduuli [MPa]
 h_i rakennekerroksen i paksuus [MPa]
 E_m alimman rakennekerroksen moduuli [MPa]
 n kerroin, $n = 0,8 - 1,0$

Taulukossa 5.1 käytetty Symboli d_n kuvaa taipumaa kauimpana kuormituslevystä olevalla ja d_{n-1} toiseksi kauimpana kuormituslevystä olevalla anturilla mitattuna. Merkinällä d_1 tarkoitetaan lähimpänä kuormituslevyä olevalla anturilla mitattua taipumaa. (Spooft, 2000) SP-% on keskimääräisen taipuman osuus maksimitaipumasta prosentteina. Taulukossa 5.1 esitetyllä muuttujalla n_g tarkoitetaan antureiden lukumäärää. (Liimata, 1989)

Yleisesti pudotuspainolaitemittauksesta lasketaan kahden ensimmäisen mittaasanturin taipumaero eli SCI ja kahden viimeisen mittaasanturin välinen taipumaero BCI. Voidaan todeta, että parametrien SCI, BCI kasvaessa tarkastellun rakenteen kunto ja materiaalien laatu heikkenevät.

Pintamoduuli kuvaa rakenteen muodonmuutosmoduulia anturin etäisyyttä r vastaavalta syvyydeltä alaspäin. Näin yleisesti tien tai kentän kantavuudeksi kutsutaan kuormituslevyn alla tapahtuvan taipuman d_0 perusteella määritettyä pintamoduulin arvoa. Kantavuus kuormituslevyn alla lasketaan kaavalla 11.

$$E_o = \left[\frac{2*(1-\nu^2)*\sigma_0*a}{d_0} \right] \quad [11]$$

jossa:

E_o	on	kantavuusarvo [MPa]
σ_0		kosketuspaine [MPa]
ν		poissonin luku, $\nu = 0,35 \dots 0,5$
a		kuormituslevyn säde [m]
d_0		taipuma kuormituslevyn alla [m]

5.1.2 Kuntokartoitus

Koekohteiden kunto kartoitettiin kesän 2013 aikana silmämääräistä arviointia käyttäen.

Tutkimusmenetelmä

Silmämääräisessä kuntokartoituksessa tien mahdolliset vauriot havainnoidaan visuaalisesti tien pintaa ja luiskia tarkastellen. Päälystetyillä teillä pinnan vauriot on helpommin havaittavissa ja päälystettyjen teiden kuntoarvioinnissa käytetäänkin vauriosumman laskentaa. Vauriosumman laskennassa vauriot kirjataan kaistakohtaisesti ja yhteenlaskettu vauriosumma lasketaan aina sadan metrin matkalle. Summan laskennassa käytetään taulukon 5.2 mukaisia yksiköitä ja kertoimia.

Taulukko 5.2. Vauriosumman laskennassa käytettävät vauriotyypit ja niiden yksiköt sekä käytettävät kertoimet

Vaurio	Yksikkö	Kerroin
Pituushalkeama, kapea	m	0,3
Pituushalkeama, leveä	m	1
Saumahalkeama, kapea	m	0,1
Saumahalkeama, leveä	m	0,5
Poikkihalkeama, pakkaskatko	m	0
Poikkihalkeama, muu kapea	m	2,5
Poikkihalkeama, muu leveä	m	5
Verkkohalkeama	m ²	1
Purkauma	m ²	1
Reikä	kpl	1
Reunapainuma	kpl	1

Sorapäälysteisten teiden kuntokartoituksessa voidaan myös käyttää vauriosumman laskentaa jos vauriot ovat selvästi näkyvissä. Tämän työn puitteissa sorateiden kunto kartoitettiin ilman vauriosumman laskentaa. Kunto ilmoitettiin vain sanallisesti ja valokuvaamalla.

5.1.3 Rakennetutkimus

Koekohteissa tehtiin tuhkarakenteiden rakennetutkimukset kesän 2013 aikana. Rakennetutkimuksilla pyrittiin selvittämään tuhkarakenteen nykytila.

Tutkimusmenetelmä

Rakennetutkimuksissa tuhkarakenteen pinta kaivettiin esiin kaivinkoneella toiselta kaistalta, noin 2 x 3 m² alueelta. Päälystetyillä teillä asfaltin leikkaus pyrittiin minimoimaan ja tutkimukset tehtiin mahdollisimman pienestä kaivannosta. Tuhkarakenteesta pyrittiin poraamaan timanttikoralla noin 100 mm halkaisijaltaan olevat, lieriön muotoiset näytekappaleet. Jokaisesta tutkimuskohteesta tutkittiin kaikki erilaiset tuhkarakenteet ja näytekappaleita yritettiin porata kolme kappaletta jokaiselta tutkimuspaalulta. Tutkimuspaalulla poraukset pyrittiin sijoittamaan siten, että kaistan keskiosalta (keskilinja + 0,5 m) porattiin kaksi näytettä ja reunasta (keskilinja + 2,5 m) yksi näyte. Samalla arvioitiin silmämääräisesti tuhkarakenteen kuntoa ja lujuutta. Rakennetutkimusten yhteydessä tutkimuspaaluille kaivettiin tien luiskaan koekuopat, josta otettiin ympäristönäytteet 40 cm ja 80 cm sivutuotekerroksen alapuolelta. Samalla pystyttiin arvioimaan tierakenteessa olevia kerroksia ja niiden paksuuksia sekä pohjamaan laatua. Kuvassa 5.2 on esitetty rakennetutkimusten periaatetta sekä niissä käytettyä kalustoa.



Kuva 5.2. Rakennetutkimusten tekoa kesällä 2013

5.2 Laboratoriotutkimukset

Laboratoriotutkimuksilla määritettiin rakennetutkimuksissa porattujen koekappaleiden puristuslujuudet sekä Vuosaaren koekohteesta saaduista näytteistä määritettiin myös niiden pH-arvo sekä sähkönjohtavuus.

5.2.1 Yksiakselialinen puristuslujuus

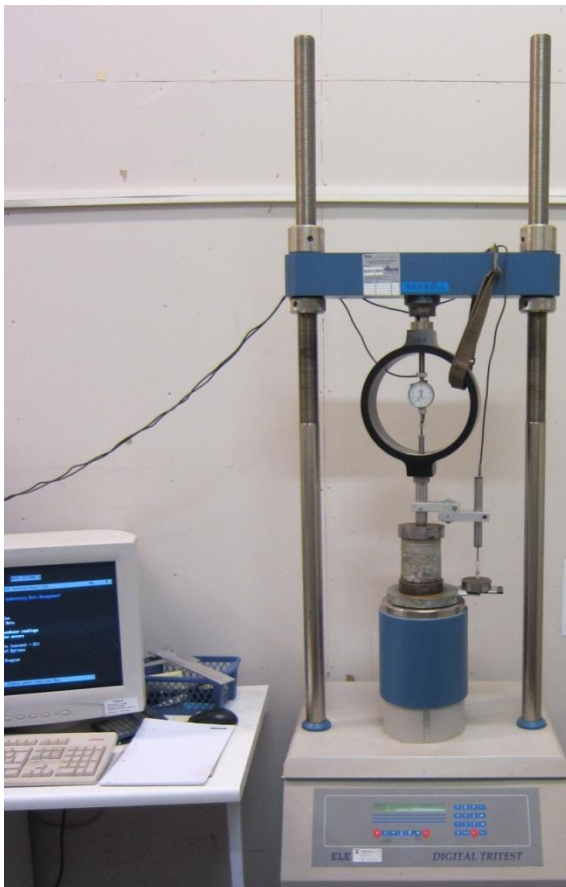
Tutkimusmenetelmä

Koekappaleen puristuslujuus määritettiin käyttäen yksiakselialista puristuskoetta. Puristuskoe tehtiin standardin SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-7:fi mukaisesti. (SFS ry, 2008) Eripituiset porakappaleet katkaistiin koetta varten siten, että puristuskappaleen korkeus oli sama kuin kappaleen halkaisija. Samalla koekappaleiden päät tasattiin pika-laastia käyttäen, jotta puristus tulisi tasaisesti koko lieriölle. Kuvassa 5.3 on esitetty koekappaleiden valmistelua kokeeseen. Jos koerakenteesta ei rakennetutkimuksissa saatu porattua ehjiä puristuskappaleita, muotoiltiin saaduista paloista säännöllisen muotoisia puristuskappaleita.



Kuva 5.3. Koekappaleiden valmistelua puristuslujuuden määrittämiseen.

Puristuskokeet tehtiin Ramboll Finland Oy:n Luopioisten toimipisteessä, jossa puristuskokeet tehtiin ELE Internationalin valmistamalla digitaalisella koekuormituslaitteistolla. Kuvassa 5.4 on esitetty puristuskokeessa käytetty kalusto.



Kuva 5.4. Puristuslujuuden määrittämiseen käytetty laitteisto.

Aksiaalisessa puristuskokeessa koekappaletta kuormitetaan yksiakiaalisesti pystysuoralla voimalla. Kappaleen sisäisen voimajakauman tiheyttä eli intensiteettiä sanotaan poikkileikkauspinnan normaalijännitykseksi ja tässä tapauksessa puristusjännitykseksi, koska sen suunta on leikkauspintaan päin. Puristusjännitystä merkitään symbolilla σ ja sen yhteys voimaan (F) ja poikkileikkauspintaan (A) on esitetty kaavassa 12. Jännityksen perusyksikkö on pascal (Pa) Tässä koetilanteessa jännityksen suuruusluokka on kuitenkin sellainen, että on luontevampaa käyttää kerrannaisyksikköä MPa.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \left[\frac{N}{m^2} \right] = [Pa] \quad [12]$$

Puristusvoiman lisäksi kokeessa mitattiin jännityksen kappaleeseen aiheuttamaa muodonmuutosta. Puristuskokeen tuloksena pystytään määrittämään jännitysmuodonmuutos –kuvaaja.

5.2.2 pH-mittaus ja sähkönjohtavuus

Vuosaaren satamakentän rakennetutkimuksessa osasta tutkimuspisteitä saatiin pelkätään mursketta muistuttavat näytteet. Näytteistä määritettiin niiden pH ja sähkönjohtavuus, jotta saataisiin selville sisäisivätkö näytteet lentotuhkaa.

Tutkimusmenetelmä

Tutkittaviksi näytteiksi otettiin pelkkää mursketta muistuttaneet näytteet sekä vertailunäytteiksi selvästi stabiloitunut koekappale sekä pelkkä kalliomurskenäyte. Tutkittavia näytteitä oli yhteensä seitsemän kappaletta.

Tutkittavat näytteet hienonnettiin noin 8 mm maksimiraekokoon. Selvät 8 mm raekokoa isommat kivet poistettiin näytteistä ja varmistuttiin siitä että lujittuneet palaset on murskattu. Murskatusta materiaalista punnittiin 100 gramman näyte joka lietettiin 100 grammaan ioninvaihdettua vettä. pH ja sähkönjohtavuus mitattiin lietetyistä näytteistä 2 tuntia ja 24 tuntia sekoittamisen jälkeen.

5.3 E-moduulin takaisinlaskenta

E-moduulit takaisinlaskettiin sekä puristuskokeiden että kantavuusmittausten tuloksista. Takaisinlaskenta kantavuusmittausten tuloksista tehtiin käyttäen Odemarkin laskentakaavaa, joka on esitetty kohdassa 3.3.1. Takaisinlaskenta puristuskokeiden tuloksista tehtiin käyttäen Hooken lain mukaisia laskentakaavoja.

5.3.1 Odemarkin laskentakaavan käyttö takaisinlaskennassa

Odemarkin laskentakaavan käyttö tierakenteen mitoituksessa on esitetty kohdassa 3.3.1. Laskentakaavan avulla voidaan myös takaisinlaskea tierakenteessa olevien materiaalien E-moduuleja. Tämä edellyttää kohteessa tehtyjä kantavuusmittauksia rakenteen pinnalta

sekä tietoa rakennekerrosten materiaaleista ja rakennepaksuuksista. Myös pohjamaan kantavuus tulisi tietää.

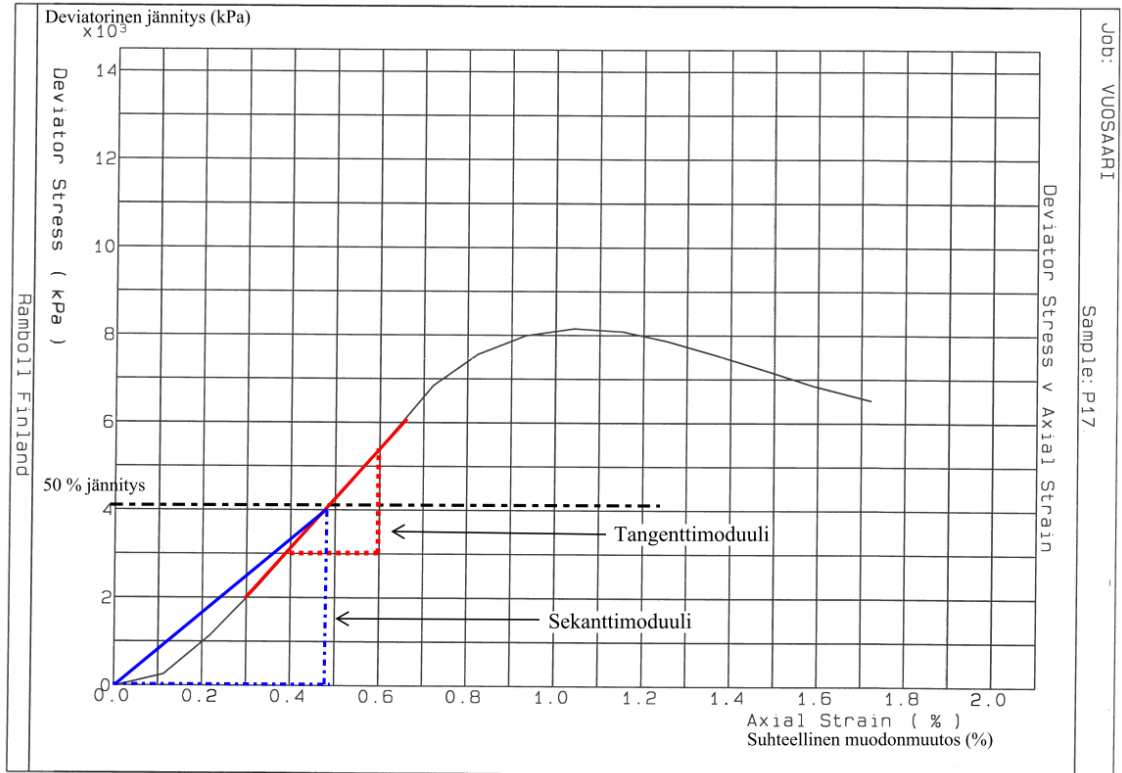
Odemarkin laskentakaavan käyttö edellyttää paljon laskijan tekemiä oletuksia. Takaisinlaskennan tuloksia tulee näin tarkastella kriittisesti.

5.3.2 Takaisinlaskenta käyttäen Hooken lakia

Yleisimpiä rakennusmateriaaleja, kuten puuta, betonia ja terästä käytettäessä rakenteet suunnitellaan siten, että niiden käyttäytyminen voidaan olettaa lineaarisesti kimmoiseksi. Tällöin yhteys jännityksen ja venymän välillä voidaan esittää yksinkertaisella yhtälöllä 13. (Outinen, 2004)

$$\sigma = E\varepsilon \quad [13]$$

Koekappaleiden puristuskokeissa saaduista $\sigma\varepsilon$ -käyristä nähdään, että puristuskokeen alussa materiaali käyttäytyy myötölujittuvasti. Tämä saattaa johtua koejärjestelyistä, esimerkiksi koekappaleiden pinnoissa olevista pienistä epätasaisuuksista sekä kuormituslaitteiston mahdollisista välyksistä, eikä mahdollisesti vastaa materiaalin ominaisuuksia. Materiaalin E_{50} -moduuli määritetään tavanomaisesti sekanttimoduulina 0 – 50 % jännityksen väliltä Hooken lain mukaisesti. Kuitenkaan materiaalin käyttäytyminen ei ole puristuksen alussa lineaarisesti kimmoista. Vertailun vuoksi moduuli määritetään myös käyrän keskialueelta eli 50 % jännityksen tangenttimoduulina. Takaisinlaskennassa sekanttimoduulista käytetään merkintää $E_{50\text{-sek}}$ ja tangenttimoduulista merkintää $E_{50\text{-tan}}$. Kuvassa 5.5 on esitetty E_{50} -moduulien määrittämisperiaatteet.



Kuva 5.5 E_{50} -moduulien määrittämissääntöjen mukaisesti.

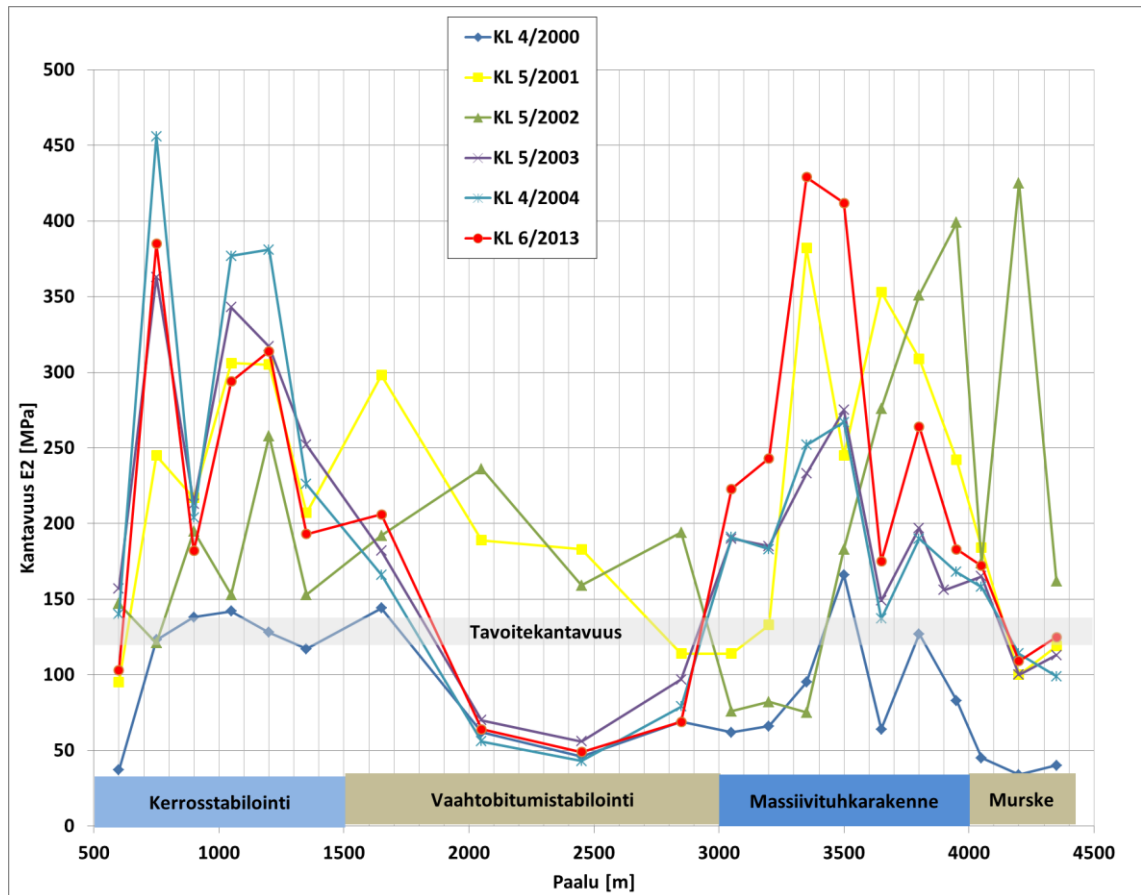
6 TUHKARAKENNUSKOHTEIDEN SEURANTATUTKIMUSTULOKSET JA NIIDEN VERTAILU

Seuraavassa on esitetty koekohteisiin kesällä 2013 tehtyjen seurantatutkimusten tulokset kohteittain. Kesän 2013 tuloksia on verrattu aikaisemmin tehtyyn seurantaan, jonka tulokset on koottu Harri Jyrävän ja Marjo Ronkaisen keräämästä aineistosta.

6.1 Inkoo

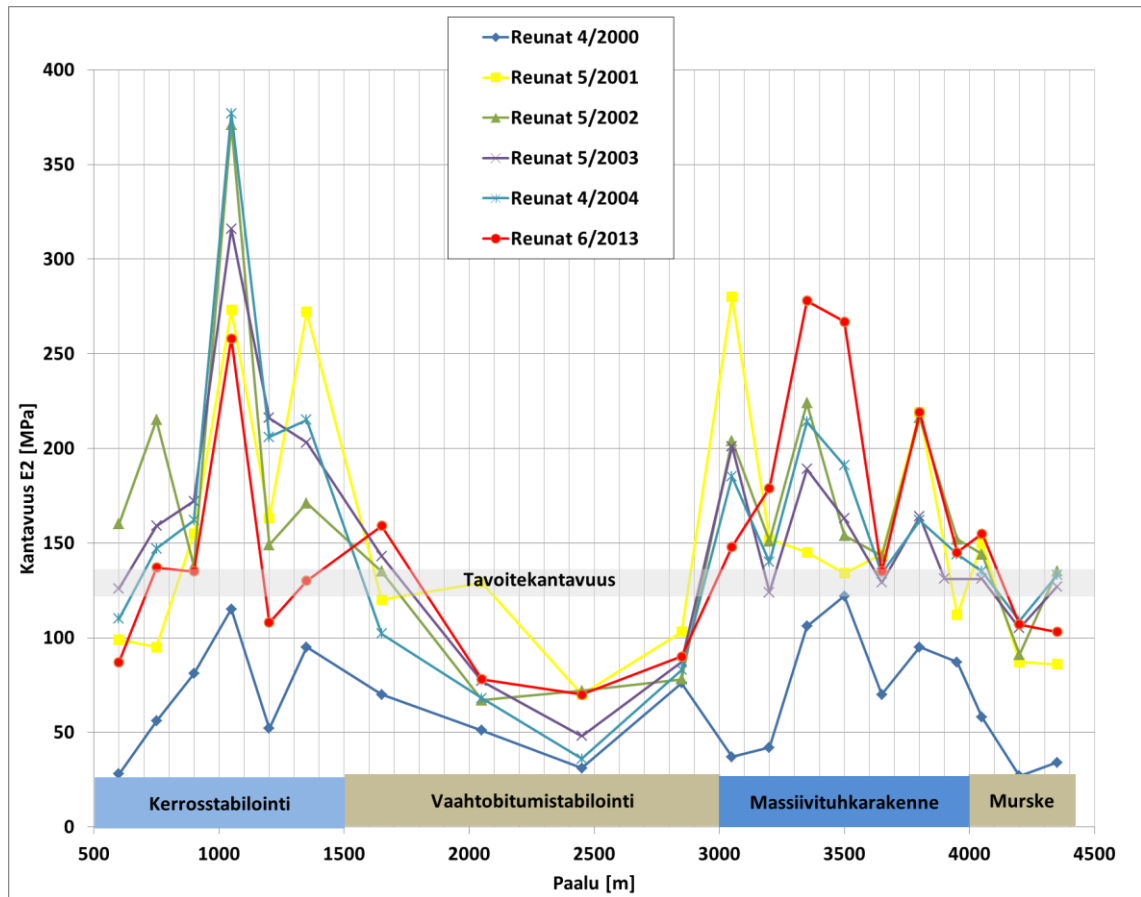
6.1.1 Kantavuudet

Kantavuusmittaus tehtiin pudotuspainolaitteella 3.6.2013. Kuvassa 6.1 on esitetty Inkoon koekohteesta tien keskilinjalta seurantatutkimuksissa mitatut kantavuudet. Kuvasta nähdään miten kantavuudet ovat kehittyneet tien eri osuuksilla. Kantavuudet on mitattu vuosina 2000 – 2004 ja vuonna 2013. Kuvissa vaaka-akselilla on tien paalulukema metreinä ja pystyakselilla kantavuusarvo E_2 , jonka yksikkönä on MPa. Kuvissa mitattujen kantavuuksien tulospisteet on selvyyden vuoksi yhdistetty yhtenäisellä viivalla. Viivat eivät kuvasta todellista kantavuutta mitattujen pisteiden välillä.



Kuva 6.1. Inkoon koekohteen tien keskilinjän kantavuuksien kehitys

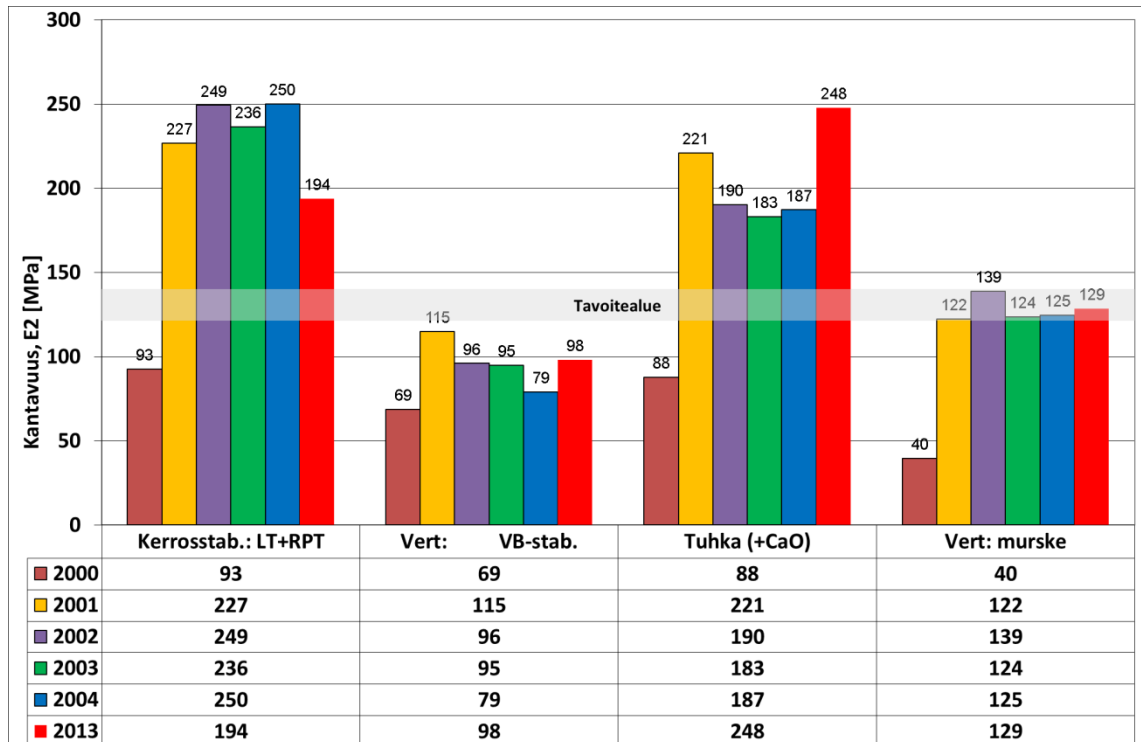
Kuvasta 6.1 nähdään selvä kantavuuksien vaihtelu eri rakenteiden välillä. Vaahdotitumistabiloinnin alueella kantavuudet ovat laskeneet lähelle alkutilanteen kantavuuksia, kun tuhrakarakenteiden osalla kantavuudet on edelleen selvästi alkutilannetta parempia. Tuhrakarakenteiden avulla oli tavoitteena parantaa tien kantavuutta ja tavoitteeseen on selvästi päästy. Kuvassa 6.2 on esitetty Inkoon koekohteen seurantamittauksissa määritetyt tien reunakantavuudet.



Kuva 6.2. Inkoon koekohteen tien reunakantavuuksien kehitys

Kuvasta 6.2 nähdään, että myös reunakantavuuksien osalta lentotuhkarakenteilla on parannettu tien kantavuutta. Reunakantavuudet ovat kerrostabiloinnin alueella hieman laskeneet aikaisemman seurannan tuloksista, mutta kantavuudet ovat kuitenkin tavoitteiden yläpuolella. Massiivituhrakarakenteen alueella reunakantavuudet ovat parantuneet. Tavoitteena oli parantaa rakenteen kantavuutta.

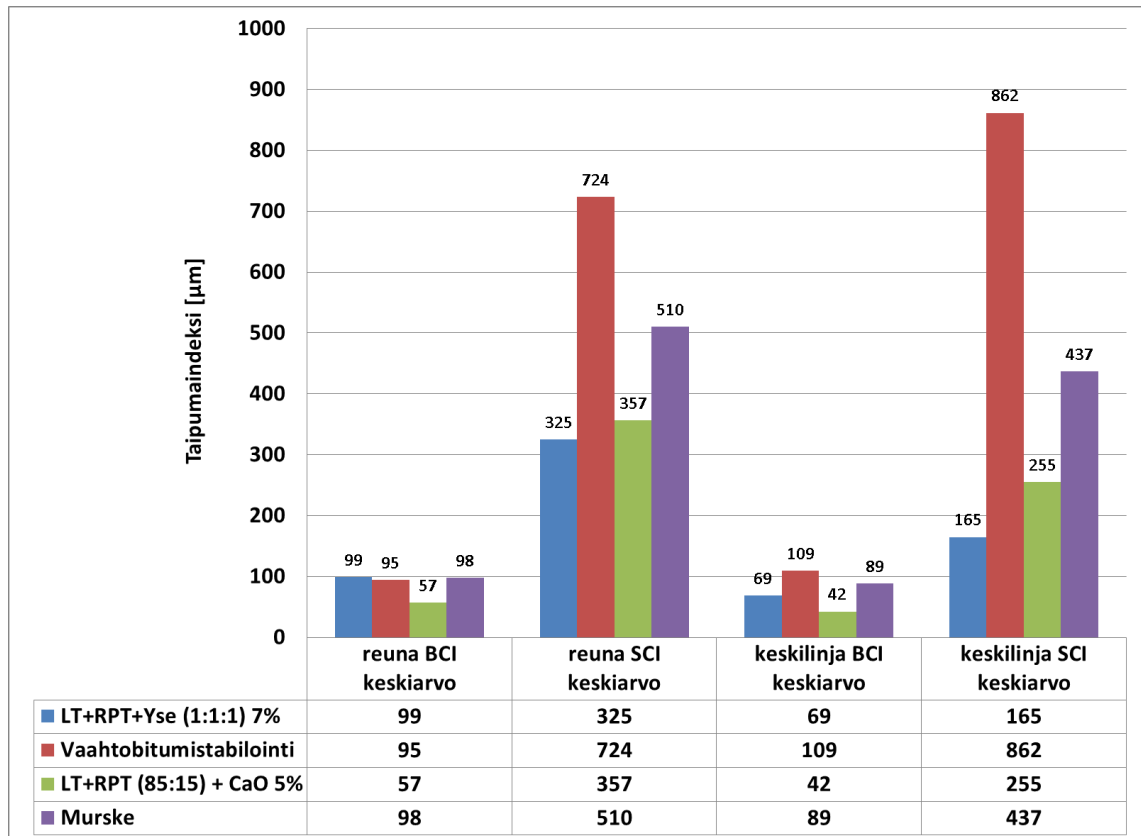
Kuvassa 6.3 on esitetty Inkoon koekohteen seurannassa saadut kantavuustulosten keskiarvot eri rakenteille. Lentotuhkarakenteiden kantavuuden kehityksen vertailukohtaksi kuvassa on esitetty vaahtobitumistabiloinnin ja murskerakenteen alueelta mitatut kantavuudet.



Kuva 6.3. Inkoon koekohteesta mitattujen kantavuuksien keskiarvot rakenteittain

Kuvasta 6.3 nähdään, että kerrosstabiloidun rakenteen kantavuuksien keskiarvo on laskenut noin 50 MPa 9 vuotta sitten tehtyyn seurantaan verrattuna. Kantavuusarvo on kuitenkin noin 100 MPa lähtötilannetta parempi ja noin 50 MPa tavoitteen yläpuolella. Massiivituhkarakenteen kantavuus on parantunut edellisestä mittauksesta noin 60 MPa. Vertailumurskeen ja vaahtobitumistabiloinnin kantavuudet ovat pysyneet melko tasaisesti samalla tasolla. Vaahtobitumistabiloinnin ja vertailumurskeen alueilla jo lähtötilanteen kantavuus oli keskimäärin hieman heikompi kuin tuhkarakenteiden alueilla, joten pohjaolosuhteet näillä alueilla ovat mahdollisesti hieman huonommat kuin tuhkarakenteiden alueilla. Asfalttipäällysteen iän ja kunnon vaikutusta kantavuustuloksiin ei ole huomioitu eikä myöskään kantavuusmittausten aikana sekä niitä edeltävänä aikana vallinneiden erilaisten sääolosuhteiden vaikutusta.

Pudotuspainolaitteella saatujen tierakenteen taipuma-arvojen avulla pystytään arvioimaan rakenteen eri osien jäykkyyttä. Kuvassa 6.4 on esitetty vuonna 2013 tehtyjen mitausten perusteella laskettujen tien keskilinjan ja reunan taipumaindeksien BCI ja SCI keskimääräiset arvot rakenteittain. Mitä pienempi taipumaindeksin arvo on, sitä jäykempi rakenne on kyseessä. Suuri jäykkyys ei kuitenkaan aina takaa rakenteen toimivuutta.

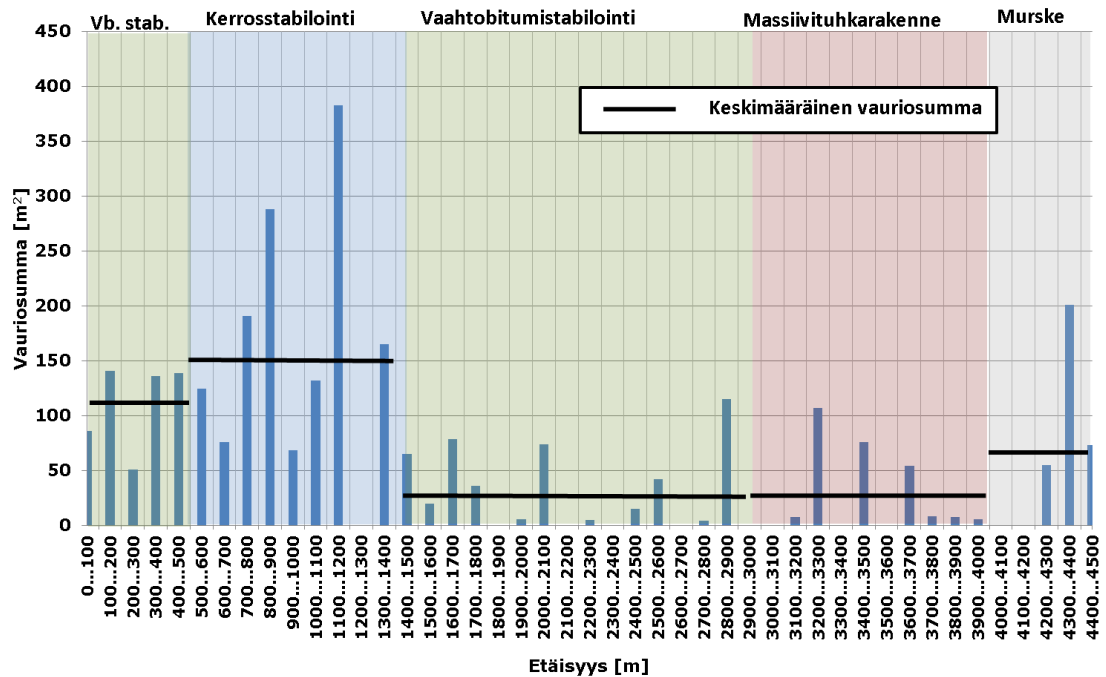


Kuva 6.4. Inkoon koekohteen tierakenteen taipumaindeksit rakenteittain vuodelta 2013

Kuvasta nähdään sama tulos, joka oli nähtävillä jo kantavuuksien tuloksessa. Tuhkarakenteet ovat keskimäärin selvästi jäykemmät kuin vertailurakenteina käytetyt vaahtobitumistabilointi sekä murskerakenne.

6.1.2 Kuntokartoitus ja rakennetutkimus

Inkoon Päivöläntien kunto kartoitettiin 25.6.2013. Samana päivänä kohteessa tehtiin rakennetutkimukset neljältä tutkimuspaalulta. Vauriokartoitus tehtiin tien 11146 tieosan 1 paaluvälille 0 – 4500. Vauriosumman keskiarvoksi koko paaluvälille tuli noin 65 m²/100 m, jonka mukaan koko paaluväli on melko pahasti vaurioitunut. Rakenteittain jaotellut vauriosummien keskiarvot on nähtävissä kuvassa 6.5. Eniten vaurioita oli tien alkupäässä paaluvälillä 0 – 1400, jossa rakenteina on vaahtobitumistabilointi ja kerrostabilointi. Yleisin vaurio oli kapea pituushalkeama ja verkkohalkeama. Lisäksi tieosalla oli jonkin verran reunapainumia. Kuvassa 6.5 on esitetty Päivöläntien vauriokartoituksen tulos. Kuvassa on esitetty jokaiselle sadalle metrille laskettu vauriosumma sekä vauriosummien keskiarvot rakenneosuksittain.



Kuva 6.5. Inkoon koekohteen, Päivöläntien, vauriokartoituksen tulos 2013.

Huomionarvoista vauriokartoituksessa on, että kerrosstabiloinnin alueella oli havaittavissa enemmän vaurioita kuin vaahdotbitumistabiloidulla alueella. Kantavuusmittausten tulokset olivat kuitenkin kerrostabiloinnin alueelta paremmat kuin vaahdotbitumistabiloinnin alueelta. Tämän vuoksi on syytä todeta, ettei kantavuutta ja tien jäykkyyttä voida aina pitää toimivuuden mittarina. Tulosta arvioidessa tulee myös huomioida, ettei tutkimuksessa ole voitu huomioida tiellä mahdollisesti tehtyjä korjauksia.

Yleisesti koekohteessa oli havaittavissa puutteita tien rungon kuivatuksessa. Reunaojat olivat melkein koko koealueella matalat ja umpeen kasvaneet. Lisäksi tiellä oli useassa kohtaa havaittavissa, että reunaojan pohja tai tien luiska oli selvästi noussut ja ajoradan reuna painunut. Tiellä oli siis havaittavissa routimis- ja kantavuusongelmia. Kuvissa 6.6 ja 6.7 on esitetty tyypillisiä vaurioita koekohteesta. Kuva 6.6 on otettu paalulta 770 nol-lapaalun suuntaan ja kuvassa näkyy paalun 760 rakennetutkimuspiste. Kuvassa näkyy myös tyypillisiä tien routavaurioita. Kuva 6.7 on otettu paalulta 3410 oikean ajoradan oikeanpuoleisesta ajourasta. Kuvassa on nähtävissä pohjamaan deformaation aiheuttamaa loivareunaista urautumista ja alkavaa pituushalkeamaa ajourassa.



Kuva 6.6. Tyypillistä routavauriota tien 11146 paalulta 770, nollapaalun suuntaan.



Kuva 6.7. Pohjamaan deformaation aiheuttamaa urautumista paalulta 3410.

Kohteessa tehtiin rakennetutkimus neljästä pisteestä, paaluilta 760, 910, 3410 ja 3820. Paaluilla 760 ja 910 porattiin kerrosstabiloidusta kantavasta kerroksesta näytekappaleet suoraan päällysteen läpi. Paalulla 760 tutkimus tehtiin oikealta kaistalta noin 0,5 m keskilinjasta ja paalulla 910 vasemmalta kaistalta noin 0,5 m keskilinjasta. Tutkimuspisteissä päällysteen paksuus oli noin 50 mm. Pisteistä 760 ja 910 ei pystytty poraamaan ehjiä, lieriön muotoisia koekappaleita. Näytekappaleiksi saatiin vain pieniä stabiloidun kerroksen kappaleita. Porareiästä oli hankala määrittää stabiloidun kerroksen paksuutta tarkkaan, mutta poratun reiän syvyys oli noin 150 mm oletetusta stabiloidun kerroksen pinnasta. Kuvassa 6.8 on esitetty paalulle 910 tehty porausreikä.



Kuva 6.8. Paalulle 910 tehty kerrosstabiloidun kantavan kerroksen tutkimusreikä.

Paalulle 910 vasempaan luiskaan tehdystä koekuopasta voitiin nähdä, että päällysrakenteen paksuus oli arviolta vain 300 – 400 mm ja sen alla oli silttinen pohjamaa. Reunasta päällysteen alta oli hankala erottaa stabiloitua kerrosta. Kuvassa 6.9 on esitetty paalulle 910 vasempaan luiskaan tehty koekuoppa. Kuvan yläreunassa näkyy asfaltti ja sen alla oleva noin 300 – 400 mm paksuinen päällysrakenne.



Kuva 6.9. Paalulle 910 vasempaan luiskaan tehty koekuoppa. Mittakaavana mittalatta, jossa numeroasteikko 100 mm välein. Päälyysrakenteen paksuus noin 300 - 400 mm.

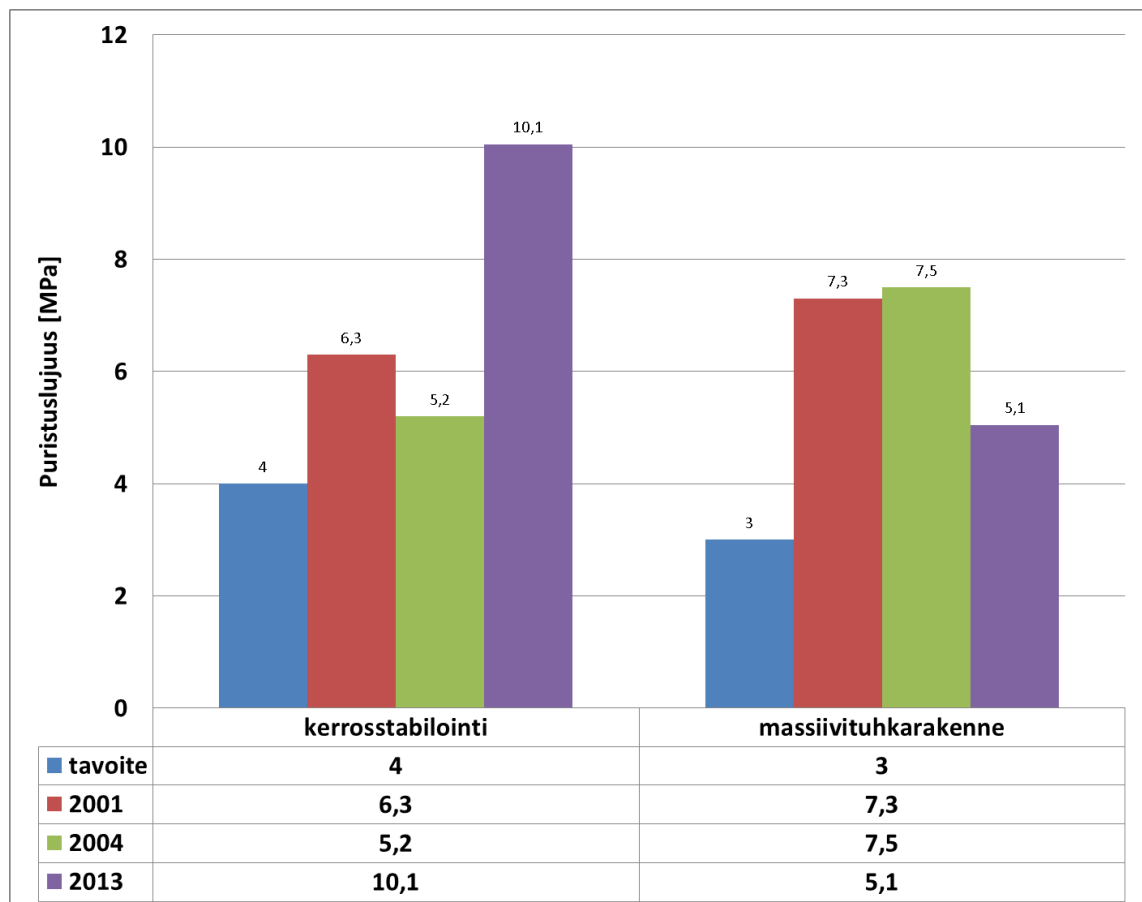
6.1.3 Puristuslujuus

Inkoon koekohteesta 25.6.2013 porattujen koekappaleiden puristuslujuudet testattiin 19.7.2013. Kohteesta ei saatu porattua kokonaisia porakappaleita. Massiivituhkaosuu- den puristetut koekappaleet olivat liuskemaisista kiekkoista / murskemaisista rakeista muotoiltuja pieniä särmiöitä. Kerrostabiloinnin osuuden koekappaleet olivat hieman isompia, suuremmista porakappaleiden jäämistä muotoiltuja särmiöitä. Taulukossa 6.1 on esitetty puristuskoekappaleiden dimensiot ja kokeen tulokset.

Taulukko 6.1. Inkoon tuhkarakenteista 19.7.2013 saadut puristuslujuudet

Paalu	Kappaleen mitat		
	Halk. (mm)	Kork.(mm)	Puristuslujuus (Mpa)
760 KL	24	34	11,0
910 KL	34	65	9,1
3410 KL	15	18	6,3
3820 KL	15	18	3,8

Kuvassa 6.1 on esitetty Inkoon koekohteen rakennetutkimuksissa saatujen koekappaleiden keskimääräiset puristuslujuudet. Pienistä koekappaleista saadut puristuskoetulokset eivät kuitenkaan välttämättä anna oikeaa kuvaa koko tuhkarakenteen lujuudesta ja näin tuloksia ei voida verrata aikaisemmin kokonaisista puristuskappaleista (halkaisija 90 - 100 mm ja korkeus \geq 90 mm) saatuihin tuloksiin. Massiivituhrakenteessa oli jo vuonna 2004 havaittavissa poikkisuuntaista halkeilua, joten vuosien 2004 ja 2013 puristuslujuuden määritykset on tehty liuskamaisista kappaleista. Kerrosstabiloidussa rakenteessa oli vuonna 2004 havaittavissa pientä hiushalkeilua mutta rakenteesta saatiin vielä ehjiä kokonaisia kappaleita. Vuonna 2013 rakenteesta ei saatu kokonaisia kappaleita.



Kuva 6.10. Inkoon koekohteen rakennetutkimuksissa porattujen koekappaleiden keskimääräiset puristuslujuudet rakenteittain

Kuvassa 6.11 on esitetty massiivituuhkarakenteesta paalulta 3820 porattuja liuskamaisia näytekappaleita. Kuvasta nähdään rakenteessa olevat vallitsevat vaakasuuntaiset halkeamat.



Kuva 6.11. Inkoon koekohteen massiivituuhkarakenteesta vuonna 2013 paalulta 3820 porattu näyte

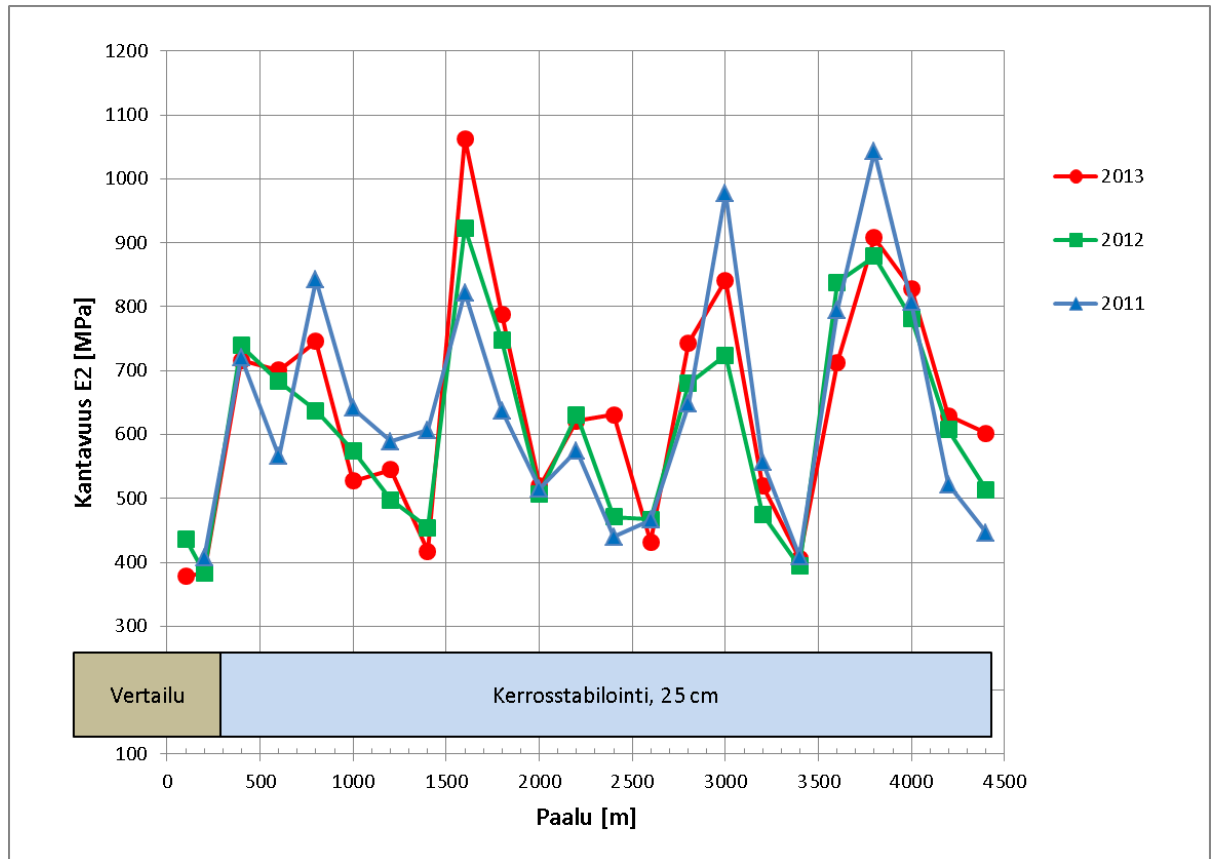
Vaakasuuntaiset halkeamat erottuvat poratusta kappaleesta selvästi, koska kappale on rikkoutunut porauksessa. Tierakenteessa oleva massiivituuhkarakenne on kuitenkin ehjän kaltainen ja halkeamat ovat hiusmaisia. Puristuksessa pinnat pysyvät tiiviisti vasten toisiaan ja jakavat kuormaa. Halkeamien syntymekanismia on hankala sanoa varmaksi sillä mahdollisia aiheuttajia on useita. Halkeamat voivat syntyä fysikaalisista tai kemiallisista kuormituksista.

6.2 Jämsä

6.2.1 Kantavuudet

Tie 16563

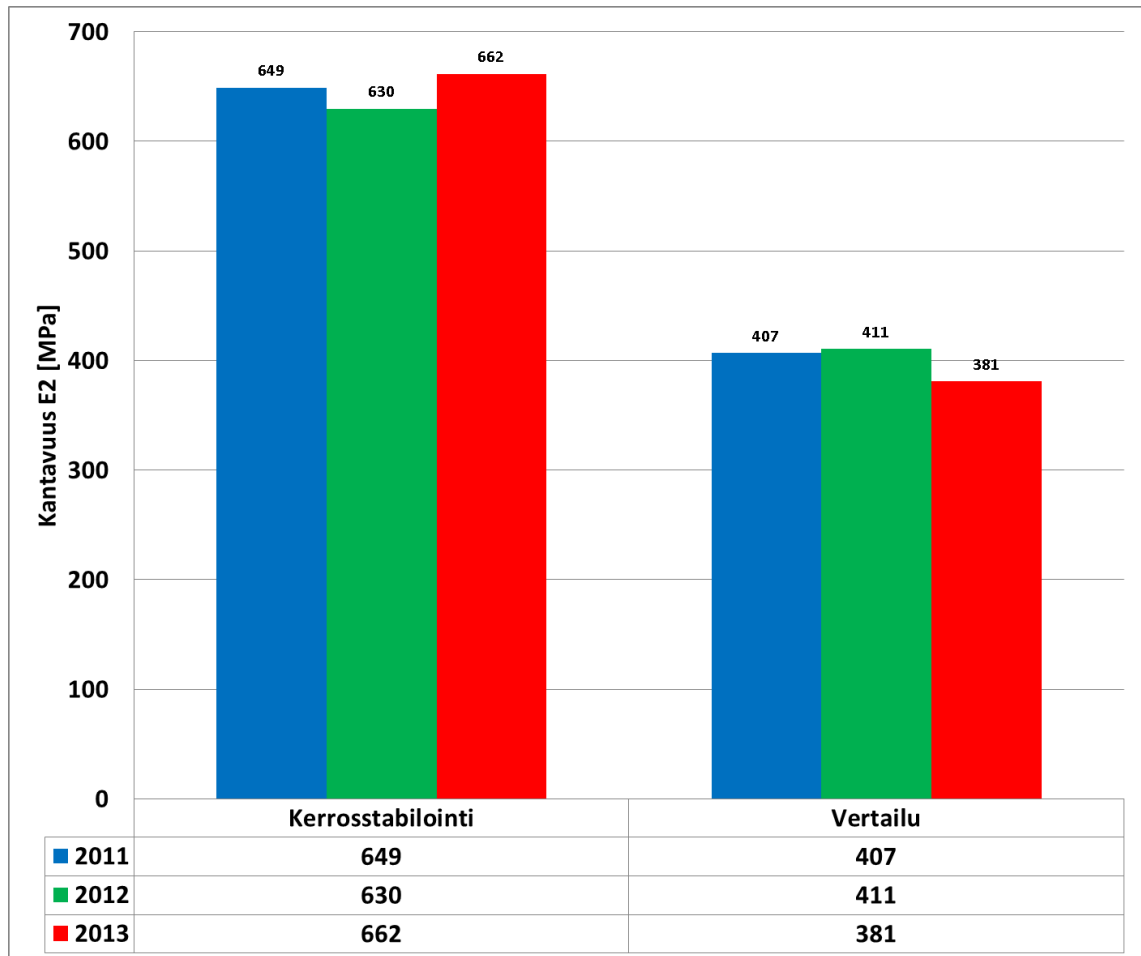
Jämsän toisen koekohteen, tien 16563, kantavuusmittaus tehtiin oikealta kaistalta 5.6.2013. Kuvassa 6.12 on esitetty vuosina 2011, 2012 ja 2013 tehtyjen kantavuusmittausten tulokset. Kuvassa vaaka-akselilla on tien tierekisterin mukainen paalulukema ja pystyakselilla kantavuus. Aikaisempien vuosien tulokset on otettu Keski-Suomen UUMA seurantatutkimusraporteista (Kiviniemi 2012, Kiviniemi 2011).



Kuva 6.12. Jämsän tien 16563 kantavuusmittausten tulokset vuosilta 2011, 2012 ja 2013

Kuvasta nähdään, että kantavuusarvot eivät ole suuresti kolmen vuoden aikana muuttuneet. Kokonaisuudessaan tieosuuden kantavuuksien keskiarvot ovat vuosina 2011, 2012 ja 2013 olleet 637 MPa, 611 MPa ja 638 MPa. Keskimääräiset kantavuudet täyttävät selvästi kuormitusluokan 10,0 tielle asetetun kantavuusvaatimuksen 490 MPa. Huomionarvoista on, että kantavuusvaatimuksen mukaisen rakenteen päällysteen kokonaispaksuus on 130 mm ja koekohteessa päällyste on vain 50 mm paksu.

Kuvassa 6.13 on esitetty kantavuuksien keskiarvot rakenteittain.

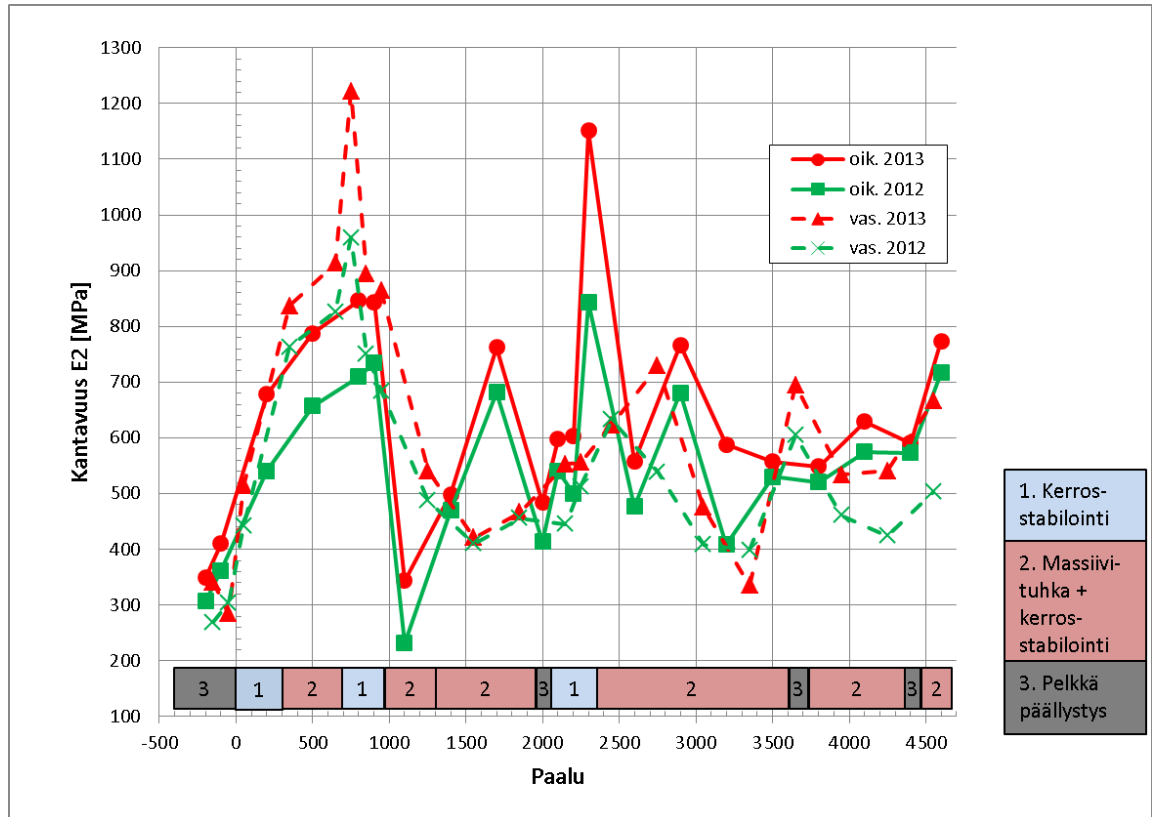


Kuva 6.13. Jämsän tien 16563 kantavuuksien keskiarvot rakenteittain vuosilta 2011, 2012 ja 2013

Kuvasta nähdään, että Kaipolanväylällä kerrosstabiloidulla alueella kantavuuden keskiarvo on pysynyt kolmen vuoden aikana lähes samana. Myös vertailurakenteen alueella tilanne on pysynyt lähes samana. Keskimääräiset kantavuudet ovat sekä tuhkarakenteen että vertailurakenteen alueella varsin korkeat.

Tie 16573

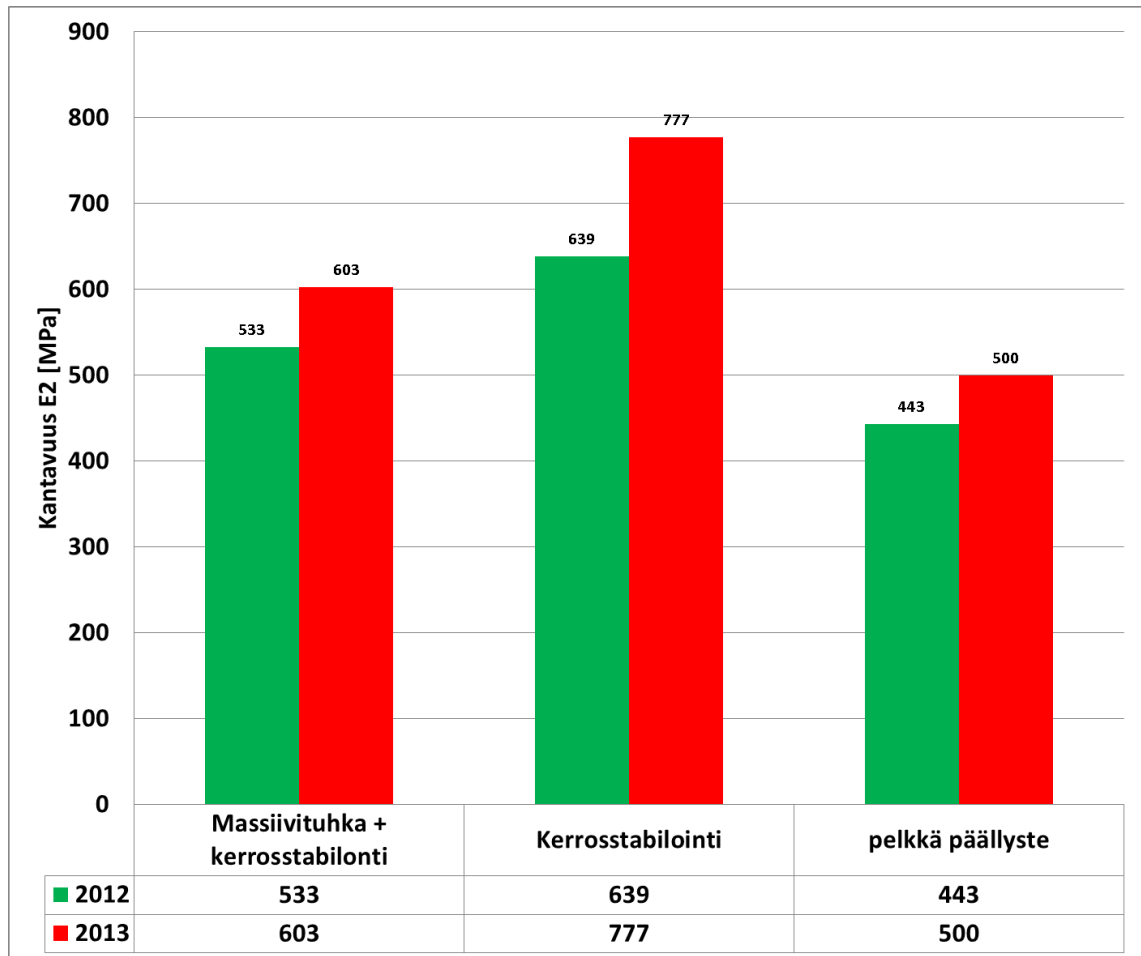
Tiellä 16573 tehtiin kantavuusmittaus oikealta ja vasemmalta kaistalta 5.6.2013. Kuvassa 6.14 on esitetty vuosina 2012 ja 2013 tehtyjen kantavuusmittausten tulokset. Aikaisempien vuosien tulokset on otettu Keski-Suomen UUMA seuranta tutkimusraporteista (Kiviniemi 2012, Kiviniemi 2011).



Kuva 6.14. Jämsän tien 16573 kantavuusmittausten tulokset vuosilta 2012 ja 2013

Kuvasta nähdään, että kantavuudet ovat parantuneet hieman vuoden aikana. Vuonna 2012 koko tieosuuden kantavuuden keskiarvo oli 542 MPa ja vuonna 2013 628 MPa. Kantavuuksissa on tapahtunut noin 15 % kasvu. Tavoitekantavuus kuormitusluokan 0,8 tiellä on suurimmillaan 230 MPa, päällysteen paksuuden ollessa 80 mm. Kohde täyttää tavoitekantavuuden vaatimukset 50 mm päällysteellä.

Kuvassa 6.15 on esitetty kantavuuksien keskiarvot rakenteittain vuosina 2012 ja 2013.



Kuva 6.15. Jämsän tien 16573 kantavuuksien keskiarvot rakenteittain vuosilta 2012 ja 2013

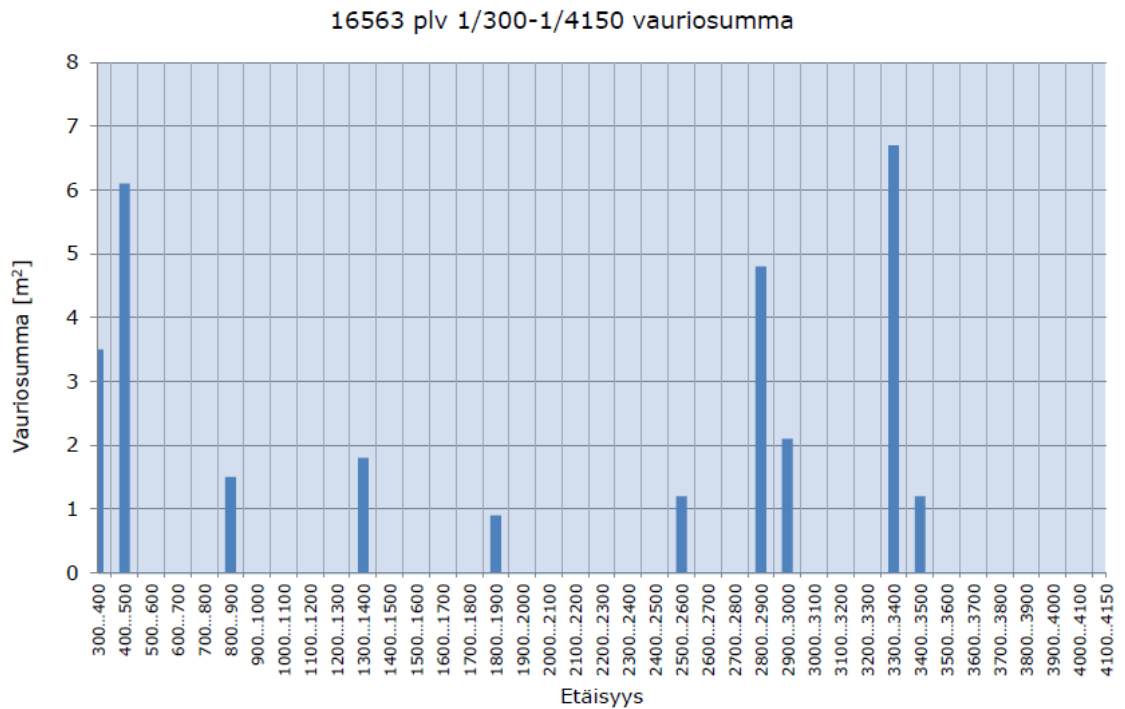
Kuvasta nähdään, että kaikkien rakenteiden alueelta on mitattu vuonna 2013 suuremmat kantavuudet kuin vuonna 2012. Kuitenkin kerrosstabiloidulla alueella kantavuus on parantunut noin 22 %, kun vertailuosuudella muutos on ollut noin 12 %.

6.2.2 Kuntokartoitus ja rakennetutkimus

Jämsän koekohteiden kuntokartoitus toteutettiin 22.5.2013 osana Keski-Suomen UUMA –projektia. Kuntokartoituksesta on tehty erillisraportti Keski-Suomen ELY-keskukselle heinäkuussa 2013. Jämsän koekohteiden rakennetutkimukset tehtiin 25.7.2013.

Tie 16563

Tien 16563 Seppola – Kaipola vauriokartoitus tehtiin paaluvälille 1/300 – 1/4150 ja kartoituksen mukaan tie on lähes vauriottomassa kunnossa. Vauriokartoituksessa havaittiin muutamia lyhyitä ja kapeita pitkittäishalkeamia sekä tämän lisäksi runsaasti ohuita poikkisuuntaisia halkeamia, eli pakkaskatkoja. Pakkaskatkot eivät vaikuta vauriosummaan. (Mäkinen 2013) Kuvassa 6.16 on esitetty tien 16563 paaluvälin 1/300 – 1/4150 vauriosummat sadan metrin osuuksille.



Kuva 6.16. Tien 16563 vauriosummat vuonna 2013 (kuva: Mäkinen 2013)

Kuvasta 6.16 nähdään, että tieosuus on vauriosumman mukaan erinomaisessa kunnossa. Vauriosumma on varsin pieni, mutta se on kuitenkin kolminkertaistunut edellisvuoteen verrattuna. Edellisvuonna havaitut kapeat pituushalkeamat olivat hieman kasvaneet pituussuunnassa ja myös uusia halkeamia oli päällysteeseen syntynyt. (Mäkinen 2013)

Kuvassa 6.17 on esitetty havaittu pituushalkeama tieltä 16563. Halkeama on kapea ja sijaitsee kaistalla luiskan puoleisessa ajourassa. Ajouran pohjassa oleva halkeama voi johtua päällysrakenteen pysyvistä muodonmuutoksista tai halkeama voi olla routahalkeama. Koska tiellä ei ole havaittavissa urautumista, on todennäköistä, että kyseessä on routahalkeama, joka tien leveydestä johtuen sijoittuu tien reunaosille.



Kuva 6.17. Tiellä 16563 havaittu pituushalkeama (kuva: Mäkinen, 2013)

Tien 16563 rakennetutkimus tehtiin 25.7.2013. Tutkimuksessa porattiin näytekappaleet rakenteesta kahdelta tutkimuspaalulta, paalulta 900 oikealta kaistalta ja paalulta 3325 vasemmalta kaistalta. Poranäytteitä otettiin kolme kappaletta molemmilta tutkimuspaaluilta, eli yhteensä 6 kappaletta. Sivusuunnassa porauspisteet sijaitsivat 1,0 m ja 2,5 m etäisyydellä tien keskilinjasta ja lähempää keskilinjaa porattiin kaksi näytekappaletta.

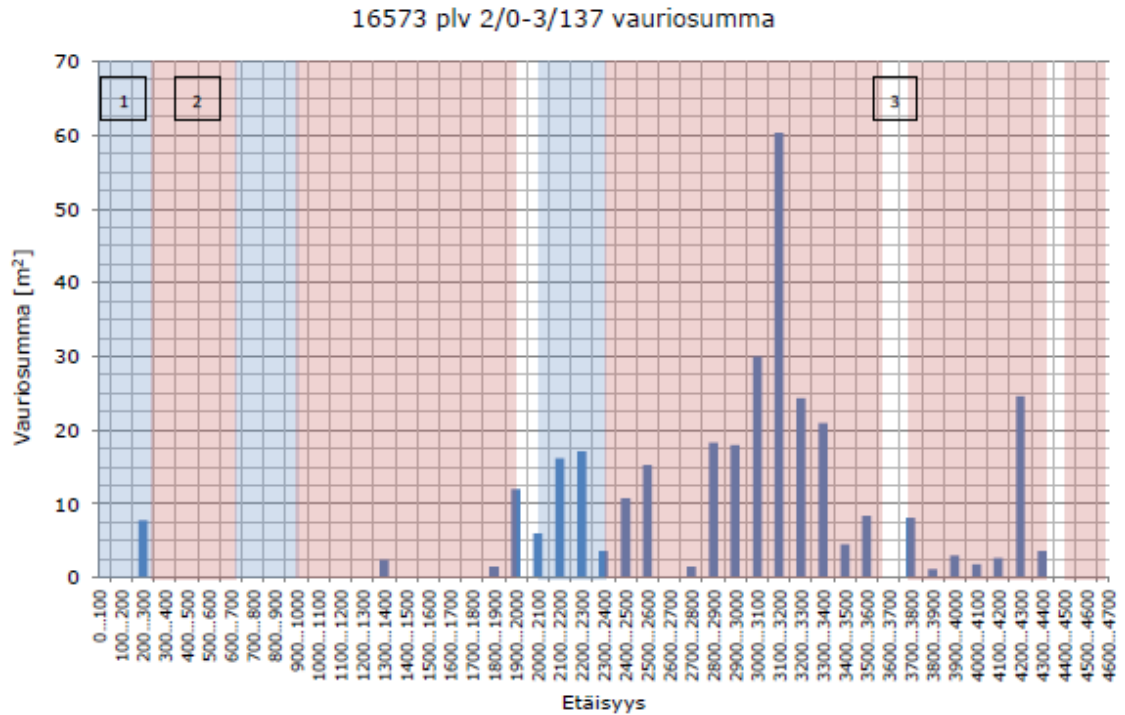
Tutkimuksessa tuhkarakenne todettiin hyväkuntoiseksi ja kaikki porakappaleet pysyivät ehjinä poratessa. Päällyste irtosi paalulla 900 kaikista kappaleista, mutta paalulla 3325 päällyste pysyi kiinni stabiloinnissa porauksen ajan. Kuvassa 6.18 on esitetty paalulta 3325 poratut näytekappaleet, joissa päällyste pysyi kiinni porauksen ajan. Paalulla 900 stabiloidun kerroksen alaosa oli hieman harvemman näköistä kuin kerroksen yläosa. Aikaisempina vuosina tehdyissä tutkimuksissa oli myös havainnoitu, että kerroksen alaosa oli harvempaa kuin yläosa ja alaosasta muokatun puristuskappaleen puristuslujuus oli yläosaa huonompi. Tämä johtunee kerroksen epätasaisesta tiivistymisestä rakentamisen aikana, mikä on tyypillistä yhtenä kerroksena tiivistetyille stabiloinneille.



Kuva 6.18. Tieltä 16563 paalulta 3325 vuonna 2013 poratut näytekappaleet, joissa päällyste pysyi kiinni stabiloinnissa porauksen ajan. (Kuva: Mäkinen, 2013)

Tie 16573

Tien 16573 Hiidenmäki – Vaheri vauriokartoitus tehtiin paaluvälille 2/0 – 3/142, yhteensä 4700 metrin matkalle. Kuntokartoituksen perusteella lasketun vauriosumman mukaan tieosuus on varsin hyvässä kunnossa. Lasketut vauriosummat 100 m osuuksille on esitetty kuvassa 6.19.



Kuva 6.19. Tien 16573 tieosalle 2 tehdyn vauriokartoituksen tulos vuonna 2013. Raste-roinnit: 1) kerrosstabilointi, 2) massiivituikka + kerrosstabilointi, 3) pelkkä päällystys (kuva: Mäkinen, 2013)

Tieosan alkupäässä paaluvälillä 0 – 1900 vaurioita oli havaittavissa erittäin vähän. Tieosuuden keskiosalla sekä loppuosalla oli havaittavissa hieman enemmän pituus- ja poikkihalkeamia. Suurimmat vauriosummat laskettiin paaluväliltä 2800 – 3400, jossa oli eniten kapeaa pituushalkeamaa. Suurin yksittäinen vaurio oli paaluvälillä 3137 – 3155 havaittu pituushalkeama (kuva 6.20), joka oli leveimmillään noin 40 – 50 mm. Vuoden 2011 tutkimuksissa kyseiselle paikalle oli havainnoitu reunapainuma ja vuonna 2012 jäljellä oli kapea pituushalkeama (kuva 6.21). Halkeama saattaa kuitenkin olla routanousun seurauksena syntynyt, koska alueella ei ole enää havaittavissa reunapainumaa. Kuvassa 6.20 on esitetty 2013 havaittu pituushalkeama paalulla 3110 ja kuvassa 6.21 sama halkeama vuotta aiemmin. Kuvista voidaan nähdä, että halkeama on hieman leventynyt vuoden aikana. (Mäkinen 2013, Kiviniemi 2012, Kiviniemi 2011) Alueen maaston muoto, eli oikealle nouseva rinne saattaa edesauttaa oikean kaistan reu-nassa tapahtuvaa epätasaista routanousua ja näin lisätä vauriota tiessä.



Kuva 6.20. Tiellä 16573 paalulla 3110 vuonna 2013 havaittu pituushalkeama (kuva: Mäkinen, 2013)



Kuva 6.21. Tiellä 16573 paalulla 3110 vuonna 2012 havaittu pituushalkeama (kuva: Kiviniemi, 2012)

Tien 16573 rakennetutkimus tehtiin 25.7.2013 neljältä tutkimuspaalulta. Paaluilla 800 ja 2150 tutkittiin kerrosstabiloitua tuhkarakennetta sekä paaluilla 1500 ja 4000 massiivituuhkarakenteen ja kerrosstabiloidun rakenteen yhdistelmää. Poranäytteitä pyrittiin otta-

maan kolme kappaletta kaikilta tutkimuspaaluilta, eli yhteensä 9 kappaletta. Sivusuunnassa porauspisteet sijaitsivat 1,0 m ja 2,0 m etäisyydellä tien keskilinjasta ja lähempää keskilinjaa porattiin kaksi näytekappaletta.

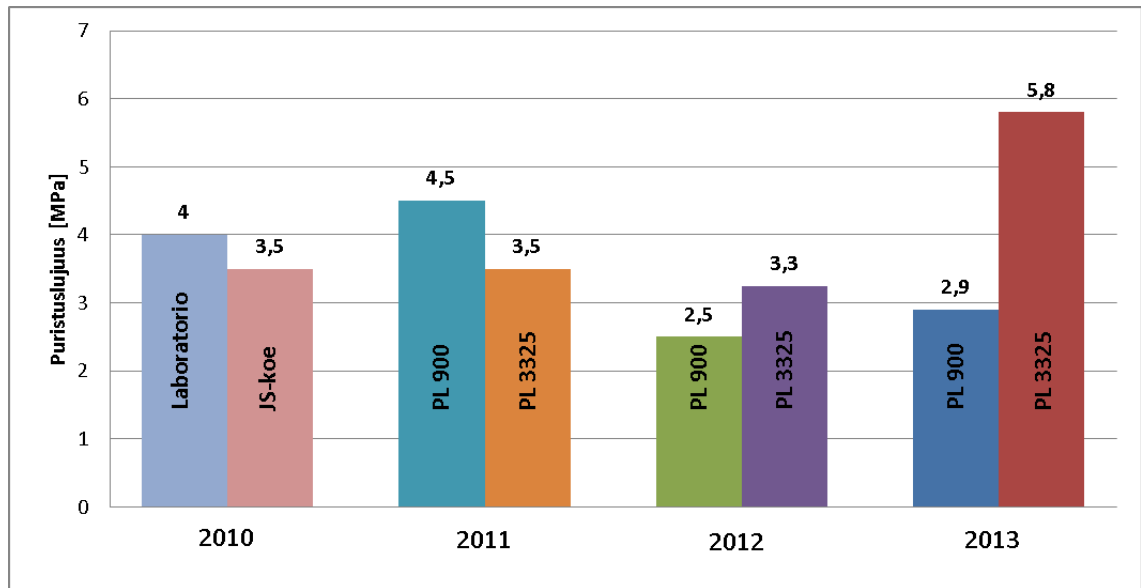
Jokaiselta tutkimuspaalulta saatiin porattua ehjät puristuskappaleet, mutta tuhkarakenteet olivat hieman haastavampia porattavia. Ainostaan paalulta 4000 saatiin porattua kolme ehjää puristuskappaletta, kun muilla paaluilla vähintään yksi porausyritys johti hajonneeseen koekappaleeseen. Tutkimuspaalulla 2150 saatiin ainoastaan tien keskilinjalta yksi ehjä kappale. Aikaisempina vuosina kohteessa on ollut sama tilanne, eli että rakenteesta ei ole saatu porattua ehjiä kappaleita, mutta rakenne on kuitenkin ehjän näköinen ja hyväkuntoinen. Vuosiin 2011 ja 2012 verrattuna vuonna 2013 rakenteesta saatiin porattua enemmän ehjiä kappaleita kuin aikaisemmin. (Kiviniemi 2012, Kiviniemi 2011)

6.2.3 Puristuslujuus

Tie 16563

Kuvassa 6.22 on esitetty tien 16563 tuhkarakenteesta rakennetutkimusten yhteydessä porattujen näytekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvot. Vertailukohteeksi kuvassa on esitetty kohteen materiaaleista laboratoriossa valmistetun tuhkarakennekappaleen puristuslujuus 28 päivän iässä sekä jäädytys-sulatus-kokeen jälkeen. Aikaisempien vuosien tulokset on otettu Keski-Suomen UUMA seurantatutkimusraporteista (Kiviniemi 2012, Kiviniemi 2011).

Koska paaluilla 900 ja 3325 on sama tuhkarakenne, voidaan tuhkarakenteen vuoden 2013 keskimääräiseksi puristuslujuudeksi laskea 4,35 MPa. Vuoden 2013 tulos on 1,5-kertainen vuoden 2012 keskimääräiseen puristuslujuuteen verrattuna ja noin 9 % vuoden 2011 tulosta suurempi. Myös kantavuusmittausten keskimääräisessä tuloksessa oli vuonna 2012 pieni notkahdus, mutta suhteellisesti kantavuuden muutokset ovat olleet paljon pienemmät.

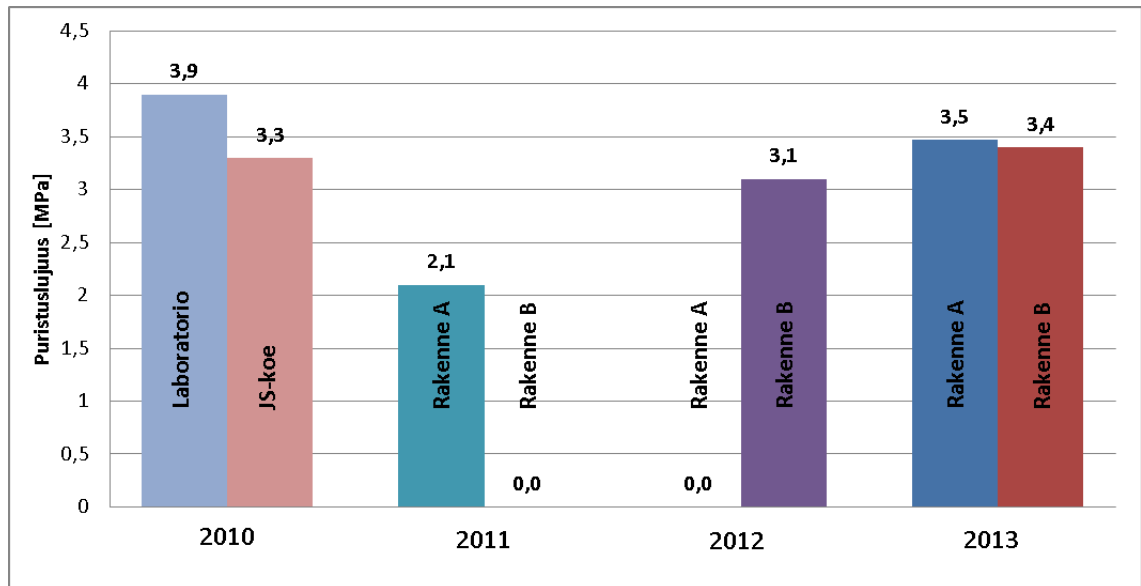


Kuva 6.22. Tieltä 16563 porattujen näytekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvot vuosilta 2011 - 2013 sekä laboratoriossa ennen rakentamista määritetty tavoitelujuus.

Tie 16573

Kuvassa 6.23 on esitetty tien 16573 tuhkarakenteesta rakennetutkimusten yhteydessä porattujen näytekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvot. Rakenne A on pelkästään kerrosstabiloitu rakenne ja rakenne B on massiivituuhkarakenteen sekä kerrosstabiloinnin yhdistelmä. Vertailukohteeksi kuvassa on esitetty kohteen materiaaleista laboratoriossa valmistetun tuhkarakennekappaleen puristuslujuus 28 päivän iässä sekä jäädytys-sulatus-kokeen jälkeen. Aikaisempien vuosien tulokset on otettu Keski-Suomen UUMA seurantatutkimusraporteista (Kiviniemi 2012, Kiviniemi 2011).

Vuoden 2013 tulokset ovat paremmat kuin aikaisimpina vuosina saadut tulokset. Vuonna 2011 rakenteesta B ei saatu ehjää näytettä ja vuonna 2012 rakenteen A kanssa oli sama tilanne. Tähän verrattuna vuonna 2013 tilanne oli paljon parempi, koska molempien rakenteiden alueelta saatiin näytteitä puristettavaksi. Vuonna 2013 saadut keskimääräiset puristuslujuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin ennen rakentamista laboratoriossa jäädytys-sulatus-kokeen jälkeen määritetyt puristuslujuudet. Vuoden 2013 kantavuusmittausten tulos oli noin 15 % parempi kuin vuoden 2012 tulos, eli myös kantavuusmittausten tulos antaa viitteitä rakenteen lujuuden parantumisesta.

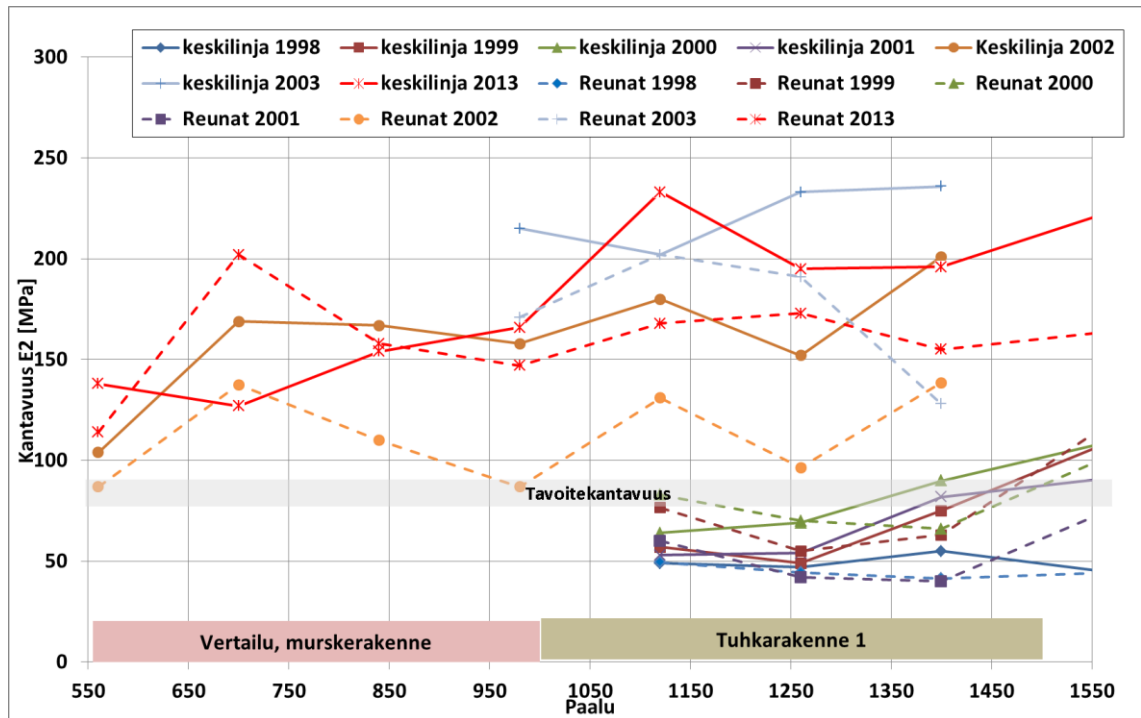


Kuva 6.23 Tieltä 16573 porattujen näytekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvot vuosilta 2011 - 2013 sekä laboratoriossa ennen rakentamista määritetty tavoitelujuus.

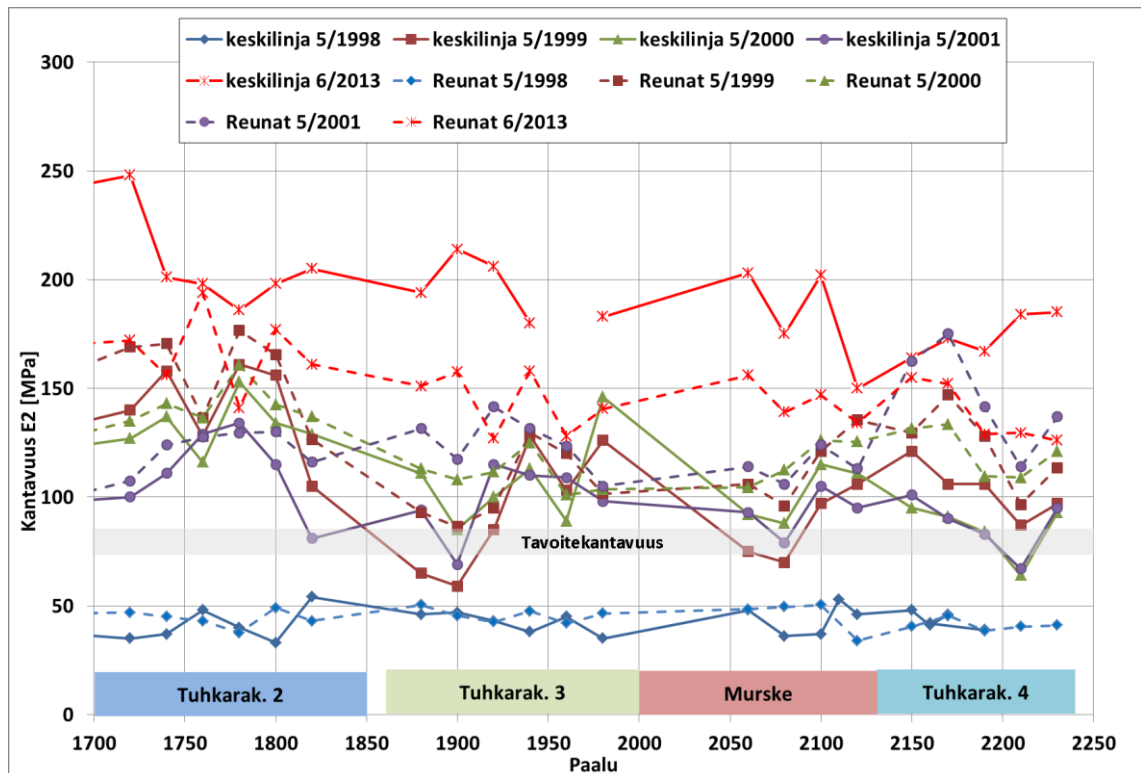
6.3 Korja

6.3.1 Kantavuudet

Korian koekohteen, tien 14567 tuhkarakenteiden kantavuusmittaus tehtiin pudotuspainolaitteella 3.6.2013. Kuvassa 6.24 on esitetty tuhkarakenteen 1, eli vuonna 2002 rakennetun massiivituhkarakenteen, sekä vertailumurskerakenteen 2 kantavuusmittausten tulokset ennen rakentamista ja rakentamisen jälkeen. Kuvassa 6.25 on esitetty aikaisemmin, vuonna 1998, rakennettujen tuhkarakenteiden 2, 3 ja 4 sekä murskerakenne 1:n kantavuusarvot ennen rakentamista ja rakentamisen jälkeen. Kuvissa vaaka-akselilla on tien paalulukema metreinä ja pystyakselilla kantavuusarvo E_2 , jonka yksikkönä on MPa. Kuvissa 6.24 ja 6.25 keskilinjalta mitattujen kantavuuksien tulos pisteet on selvyiden vuoksi yhdistetty yhtenäisellä viivalla ja reunalinjalta mitattujen kantavuuksien tulos pisteet on yhdistetty katkoviivalla. Viivat eivät kuvasta todellista kantavuutta mitattujen pisteiden välillä.



Kuva 6.24. Korian koekohteen tuhkarakenne 1:n kantavuudet vuosina 1998 – 2013

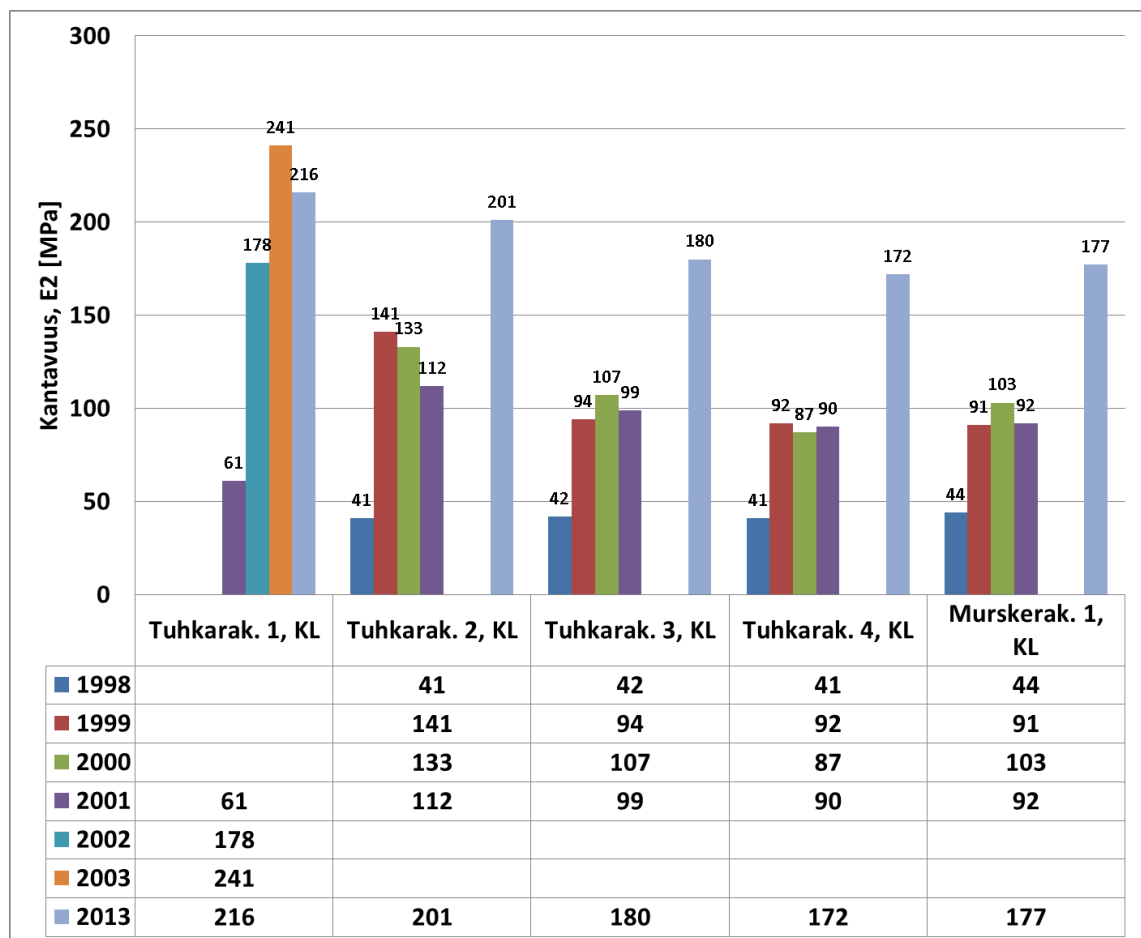


Kuva 6.25. Korian koekohteen tuhkarakenteiden 2, 3 ja 4 kantavuuksien kehitys 1998 – 2013

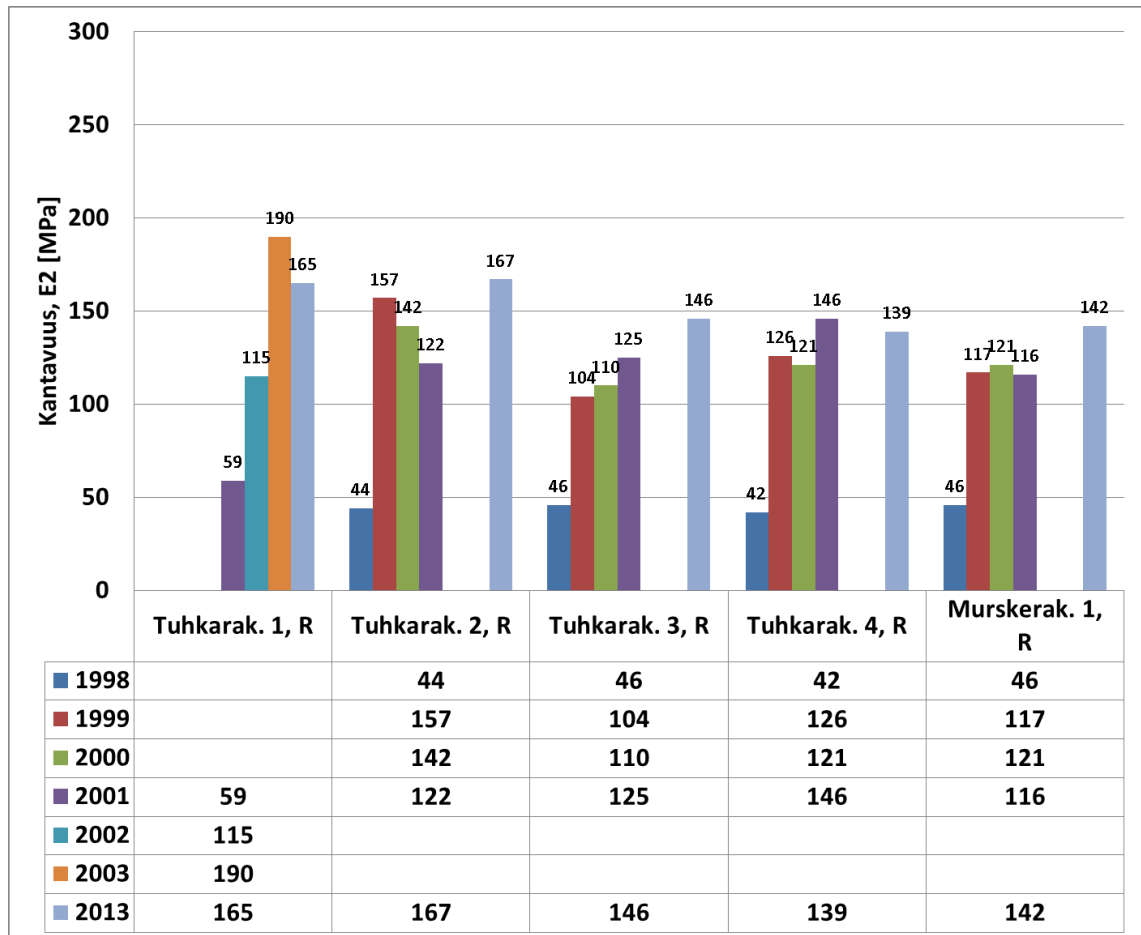
Kuvassa 6.26 on esitetty eri rakenteiden tien keskijanjalta mitattujen kantavuuksien keskiarvot eri vuosina. Kuvassa 6.27 on esitetty reunakantavuuksien keskiarvot eri vuosina.

Tuhkarakenteiden 2, 3 ja 4 kantavuuksia ei ollut mitattu vuosina 2002 ja 2003, eli kuvista puuttuvat nämä arvot.

Kuvista 6.24 – 6.27 nähdään, että tielinjan kantavuus ennen korjaustoimenpiteitä on ollut hyvin alhainen ja se on keskimäärin alittanut 80 MPa minimitavoitteen selvästi. Korjaustoimenpiteiden jälkeen sekä murskerakenteen että tuhkarakenteen alueella kantavuudet ovat selkeästi parantuneet ja ne täyttävät selvästi tavoitekantavuuden 80 MPa. Vuoden 2013 mittauksien perusteella tien keskilinjan keskimääräiset kantavuudet ovat pääsääntöisesti parantuneet entisestään. Poikkeuksena tuhkarakenne 1, jonka alueella keskilinjan keskimääräinen kantavuus on heikentynyt noin 10 % vuodesta 2003. Tuhkarakenteiden 2, 3 ja 4 sekä murskerakenteen alueilla vuonna 2013 mitatut kantavuudet poikkeavat edellisten vuosien mittauksista huomattavasti. Tämä saattaa johtua esimerkiksi erilaisista mittausolosuhteista tai erilaisista ympäristöolosuhteista mittauksia edeltäneenä ajanjaksona. Reunakantavuudet ovat normaaliin tapaan alhaisemmat kuin keskilinjan kantavuudet, mutta kehityssuunta reunakantavuuksissa on sama kuin keskilinjalla. Verrattaessa vuosien 2003 ja 2013 tuloksia, reunakantavuuksien keskiarvot ovat nousseet hillitysti tuhkarakenteissa 2 ja 3, ja laskeneet hieman tuhkarakenteissa 1 ja 4.

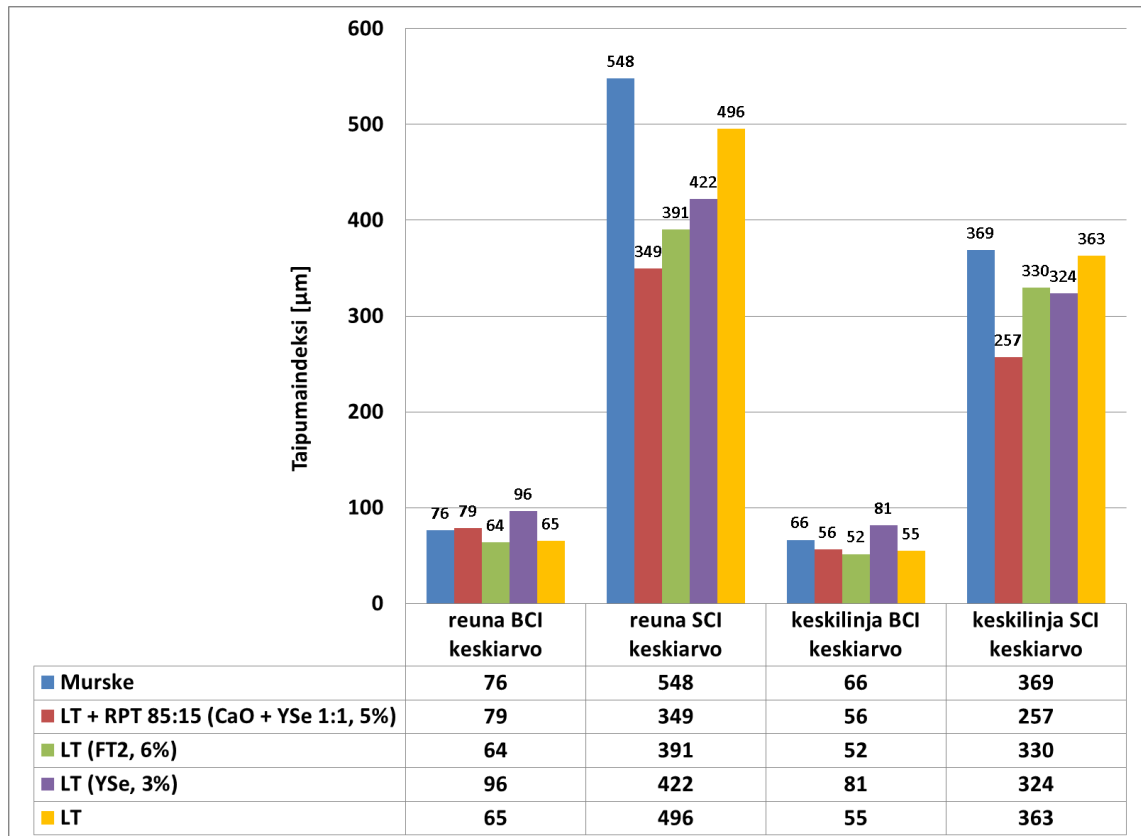


Kuva 6.26. Korian koekohteen tuhkarakenteiden tien keskilinjalta mitattujen kantavuuksien keskiarvojen kehitys vuosina 1998 – 2013



Kuva 6.27. Korian koekohteen tuhkarakenteiden reunakantavuuksien keskiarvojen kehitys vuosina 1998 – 2013

Pudotuspainolaitteella saatujen tierakenteen taipumaindeksien avulla voidaan arvioida tierakenteen jäykkyyttä. Kuvassa 6.28 on esitetty Korian koekohteen tierakenteiden taipumaindeksit rakenteittain vuodelta 2013.



Kuva 6.28. Korian koekohteen tierakenteen jäykkyyttä kuvaavat keskimääräiset taipumaindeksit rakenteittain vuodelta 2013

Kuvasta nähdään, että tuhkarakenteen 1 eli vuonna 2002 rakennetun kivihiilenpolton lentotuhkarakenteen alueella tien pintarakenteen jäykkyys on keskimäärin paras. Kuvasta nähtävät jäykkyyksien suhteet ovat nähtävissä myös kantavuusarvoissa.

6.3.2 Kuntokartoitus ja rakennetutkimus

Korian Metsäkulmantien tuhkarakennetien kuntokartoitus sekä tuhkarakenteiden rakennetutkimus tehtiin 20.8.2013. Metsäkulmantien kunto todettiin kuntokartoituksessa hyväksi ja tieosuudella ei havaittu puutteita tien palvelutasossa tai selviä vaurioita tiessä. Puutteita havaittiin muutamassa kohtaa kuivatuksessa ja tien reunakaltevuudessa. Puutteellinen tien rungon kuivatus aiheuttaa kantavuusongelmia sekä lisää tien routimista. Puutteellisen sivukaltevuuden vuoksi sadevesi jää tielle ja tämä edesauttaa kuoppien muodostumista tien pintaan. Paaluvälillä 1060 – 1120 tien vasemmassa reunassa oli havaittavissa lievää reunapainumaa ja reunapalteen muodostumista. Kuva 6.29 on otettu paalulta 1100 paalun 1200 suuntaan, ja kuvassa tien vasemmassa reunassa on havaittavissa lievää reunapainumaa. Kuvaa katsoessa ja vauriota tulkitessa on hyvä tietää, että tie kaartaa kuvaajan selän takana jyrkästi oikealle, joten mutkaa lähestyvät autot ajavat normaalisti lähellä tien reunaa ja jarruttavat, joten tien reunalle muodostuu hieman enemmän kuormitusta.



Kuva 6.29. Korian Metsäkulmantiien paalulla 1100 tuhkarakenteen 1 alueella tien vasemmassa reunassa vuonna 2013 havaittua lievää reunapainumaa

Rakennetutkimukset tehtiin neljässä tutkimuspisteessä paaluilla 1245, 1400, 1735 ja 1935. Kaksi ensimmäistä tutkimuspistettä olivat tuhkarakenne 1:n alueella, seuraava tuhkarakenne 2:n alueella ja viimeisellä pisteellä tutkittiin tuhkarakennetta 3. Jokaisella tutkimuspisteellä tuhkarakenteen päällä oli noin 100 – 170 mm kulutuskerros murskeesta. Murske siirrettiin kaivinkoneella sivuun ja tuhkarakenne otettiin esiin koko kaistan leveydeltä. Jokaisella tutkimuspisteellä tuhkarakenne oli selvästi omana kerroksenaan sekoittumattomana pintarakenteeseen tai pohjamaahan ja kaivinkoneella kaivettaessa se erottui selvästi kovempaan kerrokseen. Tuhkarakenteista porattiin näytekappaleet, mutta kokonaisia ehjiä näytekappaleita ei saatu mistään tutkimuspisteestä. Tuhkarakenteissa oli havaittavissa paljon poikkihalkeilua ja porattaessa näytekappaleet irtoilivat noin 20 mm paksuisina kiekkoina tai karkeaa mursketta muistuttavana materiaalina. Kuvassa 6.30 on esitetty rakennetutkimuksissa esiin kaivettu tuhkarakenne ja porauksen tulos paalulla 1245 tien keskialueella.



Kuva 6.30. Korian koekohteessa paalulla 1245, tuhkarakenteen 1 alueella tehdyssä rakennetutkimuksessa saatuja koekappaleita

Kuvassa on nähtävissä tuhkarakenteen päällä oleva noin 170 mm murskekerros sekä porauksessa tuhkarakenteesta irronnut materiaali. Paalulla 1735, tuhkarakenteen 2 alueella tuhkarakenne rikottiin kaivinkoneella ja tuhkarakenteesta yritettiin irrottaa suurempaa näytekappaletta, josta olisi voitu muotoilla 100 mm puristuskappaleen. Rakenne rikkoutui kuitenkin kaivettaessa ja irtosi karkeata liuskemaista sepeliä muistuttavana materiaalina. Kuvassa 6.31 on esitetty poikkileikkaus rikkikaivetusta tuhkarakenteesta 2. Kuvassa näkyy tuhkarakenteessa vallitseva vaakasuuntainen halkeilu ja mittakaavana mittalatta, jossa asteikko 10 mm välein.



Kuva 6.31. Tuhkarakenteen 2 poikkileikkaus Metsäkulmantiellä paalulla 1735

6.3.3 Puristuslujuudet

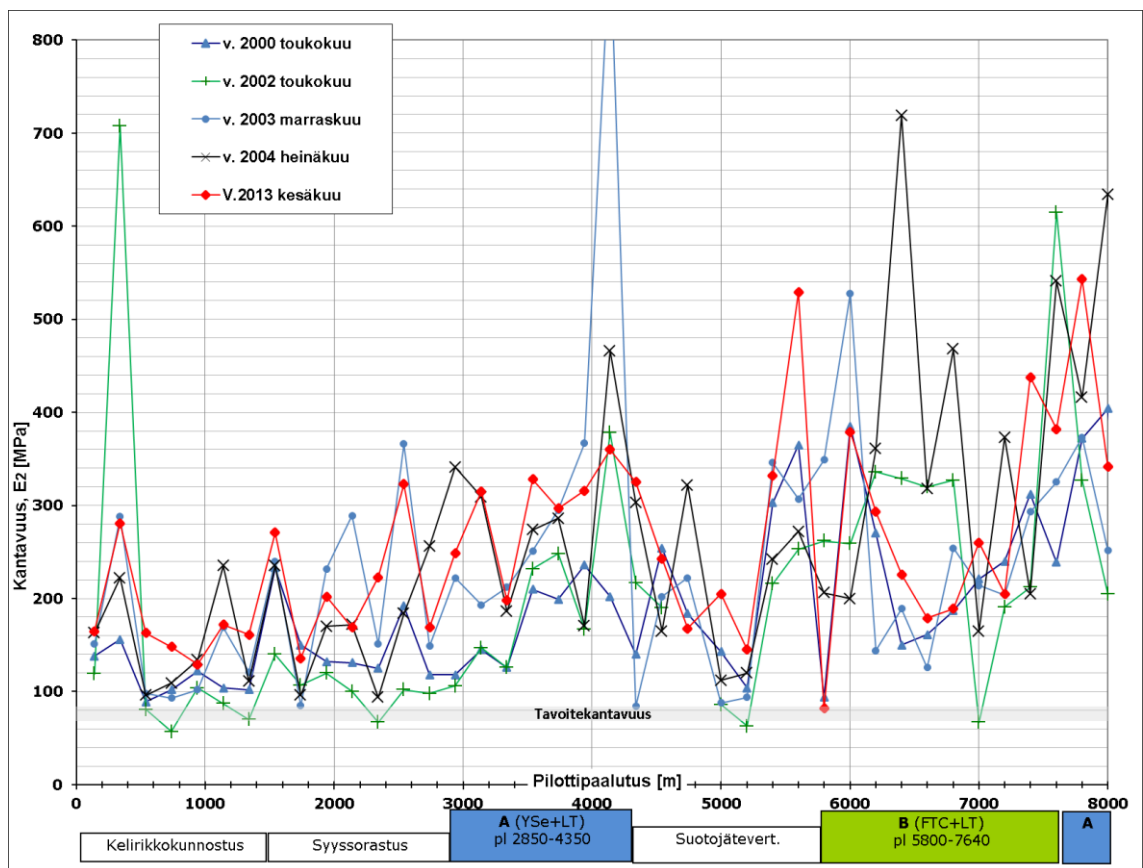
Edellinen rakennetutkimus Metsäkulmantiellä tehtiin vuonna 2002, jolloin vuonna 2001 rakennetusta tuhkarakenteesta saatiin porattua kunnolliset puristuskoekappaleet. Tuolloin paalulta 1150 porattujen koekappaleiden puristuslujuudet olivat tien keskiosalla 5,8 – 9,5 MPa ja reunaosalla 3,4 – 4,3 MPa. Paalulta 1360 porattujen koekappaleiden puristuslujuudet olivat tien keskiosalla 4,4 – 5,3 MPa ja reunaosalla 5,7 MPa. Tuhkarakenteen 1 puristuslujuus oli vuonna 2002 noin 6,5 MPa. Vuonna 2013 tuhkarakenteesta 1 ei saatu porattua 100 mm korkuisia puristuskoekappaleita, mutta poratuista kappaleista muotoiltiin 25 mm x 25 mm oleva puristuskappale, jonka puristuslujuudeksi saatiin 8,7 MPa. Puristuslujuudet eivät ole suoraan verrattavissa keskenään, mutta tulos antaa kuitenkin viitteitä tuhkarakenteen lujuusominaisuuksien säilyvyydestä.

Tuhkarakenteissa 2, 3 ja 4 havaittiin jo vuonna 2002 vaakasuuntaista halkeilua ja näyte-kappaleiden poraus oli hankalaa. Vuonna 2002 paalulta 1925 saatiin 50 mm korkuiset koekappaleet, joiden puristuslujuudet olivat tien keskiosalla 5,6 – 6,6 MPa ja reunaosal- la 3,0 – 3,2 MPa. Vuonna 2013 tien reunaosalta saadusta 30 mm korkuisesta kappalees- ta saatiin 1,6 MPa lujuus. Koekappaleiden ja puristuskokeiden määrä jäi Metsäkulman- tien osalta vähäiseksi ja näin puristuskokeiden tulokset ovat vain suuntaa-antavia. Tu- losten perusteella voidaan kuitenkin sanoa, ettei rakenteissa ole tapahtunut suuria tien toimivuuteen vaikuttavia muutoksia viimeisen rakennetutkimuksen jälkeen.

6.4 Kukkia

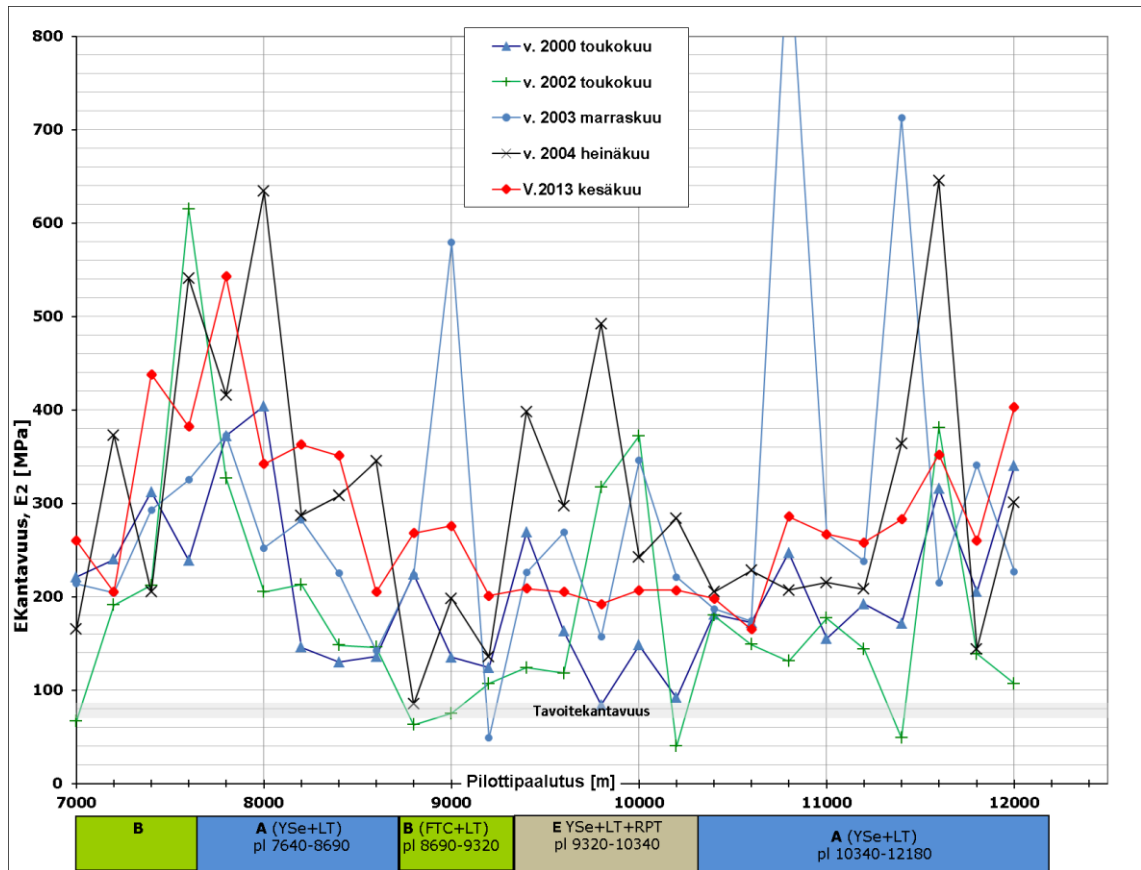
6.4.1 Kantavuudet

Kukkian koekohteen, eli tien 3201 Kuohijoki – Kyynärö kantavuusmittaus tehtiin pudotuspainolaitteella 5.6.2013. Kantavuudet mitattiin pääsääntöisesti tien oikealta kaistalta noin 1,3 metriä tien reunasta. Kuvissa 6.32 ja 6.33 on esitetty seurantamittauksissa vuoden 2000 jälkeen mitatut kantavuudet. Tulokset on jaettu mittalinjan pituuden vuoksi kahteen kuvaan. Kuvissa pystyakselilla on kantavuusarvo E_2 ja vaaka-akselilla pilotti-paalutuksen metrilukemat.



Kuva 6.32. Kukkian koekohteen kantavuusmittausten tulokset paaluvälillä 0 - 7000 vuosilta 2000 – 2013

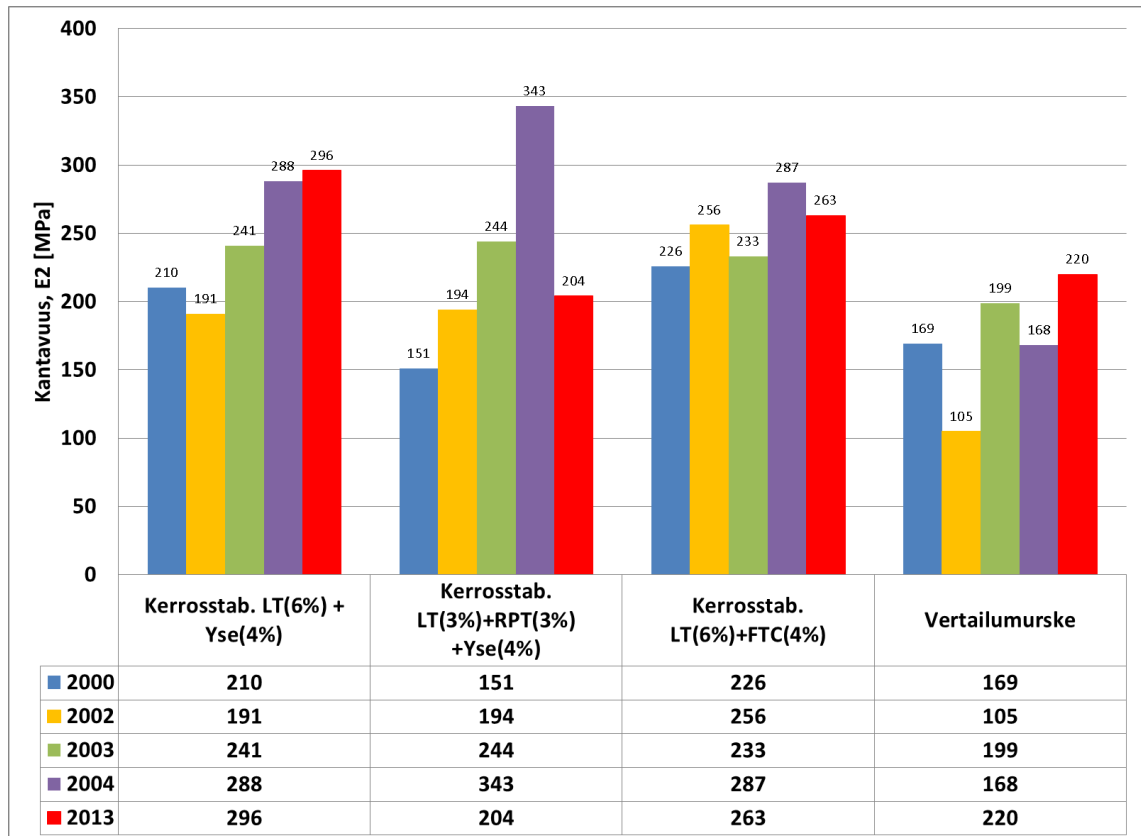
Kuvasta nähdään, että rakentamisen (8/2002) jälkeen tehdyissä seurantamittauksissa saadut kantavuusarvot ovat pääsääntöisesti alkutilanteen kantavuusarvojen yläpuolella, eli lentotuhkarakenteiden avulla on pystytty parantamaan rakenteen kantavuutta. Kantavuudet ovat myös pääsääntöisesti tavoitearvon 80 MPa yläpuolella.



Kuva 6.33. Kukkian koekohteen kantavuusmittausten tulokset paaluvälillä 7000 - 12180 vuosilta 2000 – 2013

Kuvasta nähdään, että vuoden 2013 kantavuuksissa ei ole suuria yksittäisiä vaihteluja, jollaisia aikaisemmissa mittauksissa on nähtävissä. Tämä vaikuttaa kantavuuksien keskiarvojen vertailuun.

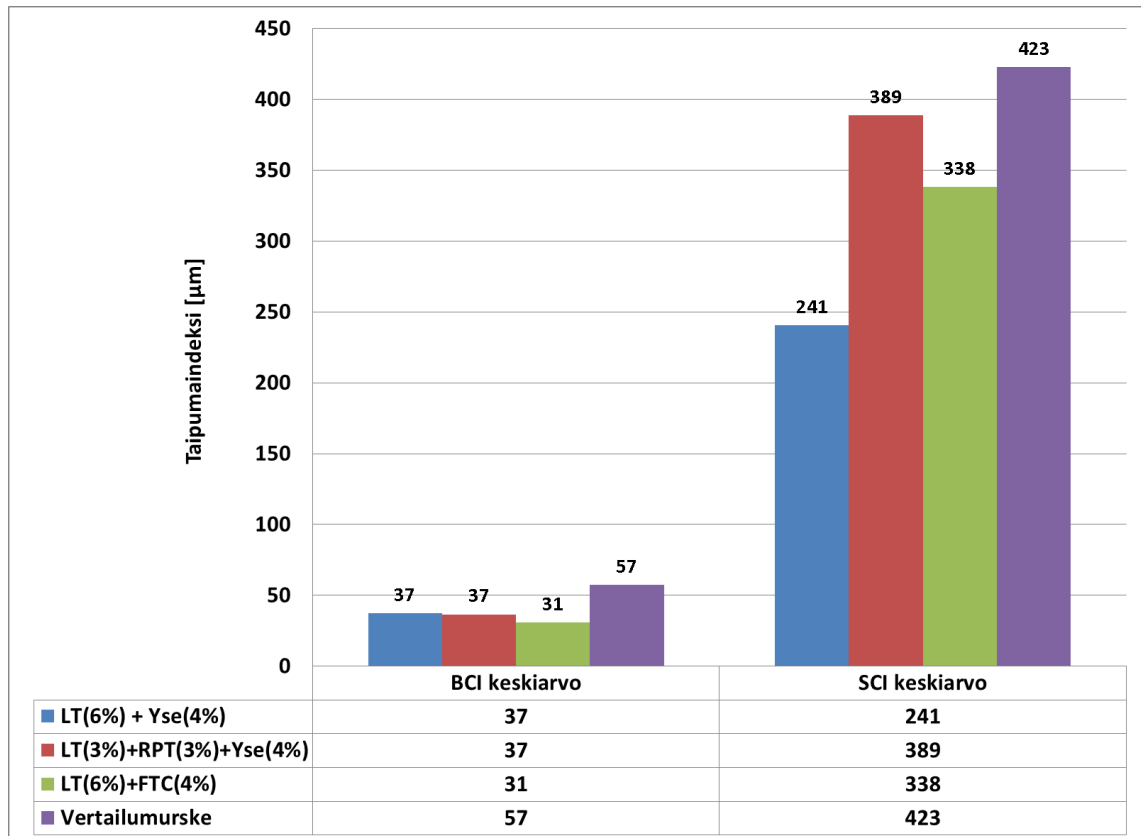
Kuvassa 6.34 on esitetty kantavuuksien keskiarvot rakenteittain eri vuosina. Keskiarvojen laskennassa epätodelliset yli 500 MPa kantavuudet on jätetty laskennan ulkopuolelle. Epätodellisen pieniä kantavuuksia ei havaittu.



Kuva 6.34. Kukkian koekohteen kantavuuksien keskiarvojen kehitys rakenteittain.

Kuvasta nähdään, että lentotuhkan ja yleisementin sekoituksella tehdyn kerrosstabi-loinnin alueella keskimääräinen kantavuus on hieman noussut ja muiden tuhkarakenteiden alueilla kantavuuksien keskiarvot ovat hieman laskeneet viimeisimmästä, eli vuoden 2004 mittauksesta. Vuoden 2004 mittaus on kuitenkin tehty heinäkuussa, joten mit-tausajankohta saattaa vaikuttaa tuloksiin positiivisesti ja tämä tulee huomioida tulkin-nassa. Vertailumurskeen alueella keskimääräinen kantavuus on hieman parantunut. Tien kantavuus ei lähtötilanteessakaan ole kuitenkaan ollut huono. Kantavuus 200 – 300 MPa on alemman luokan sorapintaiselta tieltä hyvä. Tuhkarakenteiden kantavuudet kestävät hyvin vertailun murskerakenteeseen ja keskimääräisesti tuhkarakenteiden alueelta on mitattu paremmat kantavuudet. Tuloksessa ei ole voitu huomioida tiellä mahdollisesti tehtyjä korjaustoimenpiteitä.

Pudotuspainolaitteella saatujen tierakenteen taipuma-arvojen avulla pystytään arvioi-maan rakenteen jäykkyyttä. Kuvassa 6.35 on esitetty vuonna 2013 tehtyjen mittausten perusteella laskettujen taipumaindeksien BCI ja SCI keskimääräiset arvot rakenteittain. Mitä pienempi taipumaindeksin arvo on, sitä jäykempi rakenne on kyseessä. Rakenteen toimivuutta ei voida kuitenkaan suoraan määrittää jäykkyyden ja kantavuuden avulla.



Kuva 6.35. Kukkian koerakenteiden keskimääräiset taipumaindeksit vuodelta 2013

Kuvasta nähdään, että kaikilla stabiloiduilla rakenteilla pintakerroksen keskimääräinen jäykkyys on ollut vertailumurskerakennetta parempi. Keskimääräisesti jäykin pintarakenne on ollut lentotuhkan ja yleisementin seoksella stabiloidun rakenteen alueella. Tämä on ollut nähtävissä myös kantavuusmittausten tuloksista. Pohjarakenteen taipumaindeksien keskiarvot ovat stabiloiduilla rakenteilla hyvin lähellä toisiaan.

6.4.2 Kuntokartoitus ja rakennetutkimus

Tien 3201 kuntokartoitus ja rakennetutkimus tehtiin 26.6.2013. Yleiskunnoltaan tie oli hyväkuntoinen ja suuria vaurioita tiessä ei ollut havaittavissa. Yleisimpiä havaintoja kuntokartoituksessa olivat tien puutteellinen sivukaltevuus, stabiloidulla alueella puutteellinen kulutuskerros stabiloinnin päällä sekä stabiloimattomalla alueella pinnassa olevat maakivet. Tielinjalla oli myös muutamassa kohtaa havaittavissa lievää tien painumista ja leviämistä, joka on todennäköisesti seurausta heikosta kuivatuksesta ja keliarikosta. Kuvassa 6.36 on esitetty edellä mainittua tien painumista ja leviämistä esittävä esimerkki kohteesta paalulta 750 – 800. Kuva on murskerakenteen alueelta ja kuvasta on nähtävissä kuinka tien notkokohta on hieman leventynyt sekä painunut keskeltä. Tällöin tien keskilinjalle alkaa muodostua kuoppia puutteellisen sivukaltevuuden vuoksi. Kuvasta voidaan myös nähdä vihreä kasvusto reunaojassa, joka viestii ojan ja tien rungon märkydestä.



Kuva 6.36. Kukkian pilotin murskerakenteen alueelta työpaalulta 750 kesällä 2013 otettu kuva kelirikon leventämisestä tiestä

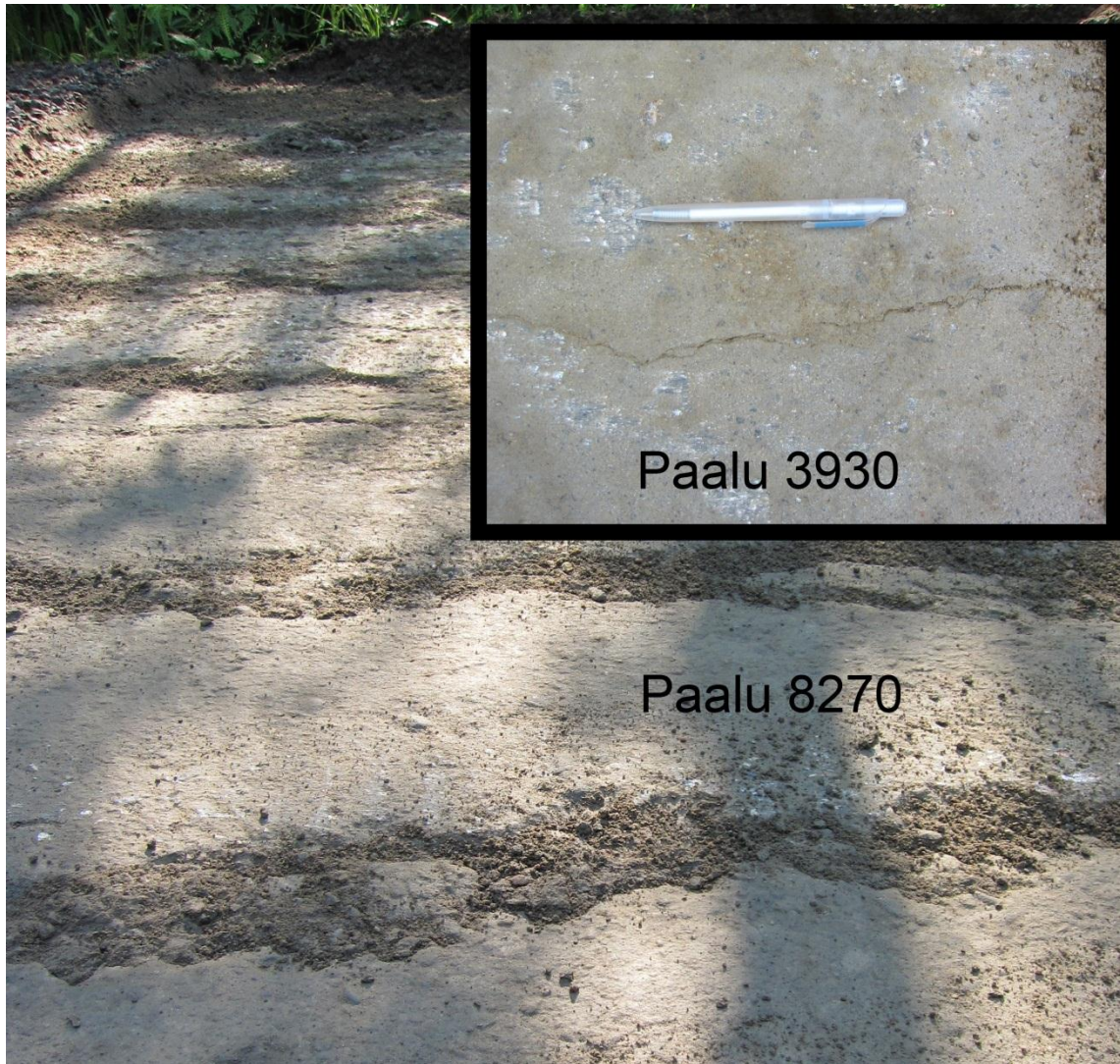
Yleisin ongelma stabiloidulla alueella oli puutteellinen kulutuskerros stabiloidun kerroksen päällä. Muutamissa kohdissa näkyi kuinka stabiloidun kerroksen pintaa oli raavittu lanauksen tai aurauksen yhteydessä ja kahdessa kohdassa tien reunassa oli irtonaisena rikkoutuneen stabiloinnin kappaleita. Kuvassa 6.37 on esitetty puutteellinen kulutuskerros paalulta 8265.

Stabiloidun kantavan kerroksen alueella tielinjalle joudutaan ajamaan tarpeen vaatiessa uutta kulutuskerrosta ojiin lentäneen materiaalin tilalle. Pintaa ei voida aina vain lanata. Kulutuskerroksen murskeen tulee myös olla rakeisuudeltaan oikeanlaista, jotta se sitoo kosteutta ja pysyy paremmin tiessä. Kuiva karkearakeinen murske lentää helpommin liikenteen vaikutuksesta ojiin. Stabiloitu kantava kerros saattaa myös jossain määrin estää kosteuden kapillaarista nousua tien pohjarakenteesta pintaan ja näin pintarakenne voi kuivua helpommin. Stabiloidun kerroksen päällä tulee olla riittävästi hienoainesta sisältävä pintamurske.



Kuva 6.37. Kukkian pilotin paalulla 8265 kerrosstabilointi on näkyvissä puutteellisen kulutuskerroksen vuoksi

Rakennetutkimuksia tehtiin vuonna 2013 kuudessa pisteessä paaluilla 3930, 7120, 8270, 8780 ja 9590 sekä 11240. Kerrosstabilointia, jossa on käytetty lentotuhkaa ja yleissementtiä tutkittiin paaluilla 3930, 8270 ja 11240. Jokaiselta tutkimuspaalulta saatiin porattua täysikokoiset näytekappaleet, mutta porattaessa rakenteiden kovuuksissa oli eroja. Paalulla 3930 stabiloinnin pinta oli erittäin tasainen ja stabiloinnin päällä oli reilusti, noin 130 – 140 mm kulutuskerroksen mursketta. Stabilointi oli erittäin kovaa porattavaa, mutta rakenteessa oli kuitenkin nähtävissä pystysuuntainen pituushalkeama, joka saattaa olla laatan lämpöliikkeiden aiheuttama halkeama. Paalulla 8270 kulutuskerros stabiloidun kerroksen päällä oli vai 0 – 40 mm. Kerroksen pinta oli selvästi rapautunut ja pystysuuntaisten halkeamien kohdat olivat lähteneet selvästi rapautumaan veden ja pakkasen vaikutuksesta. Paalulla 11240 sama rakenne oli hieman harvemman näköistä ja rakenteen pinnassa oli nähtävissä pientä rapautumaa, aivan kuten paalulla 8270. Kuvassa 6.38 on esitetty stabiloidun rakenteen pinnan tilanne vuonna 2013 paaluilla 3930 ja 8270. Kuvasta nähdään, että saman ikäiset rakenteet samassa kohteessa voivat olla eritavoin rapautuneita.



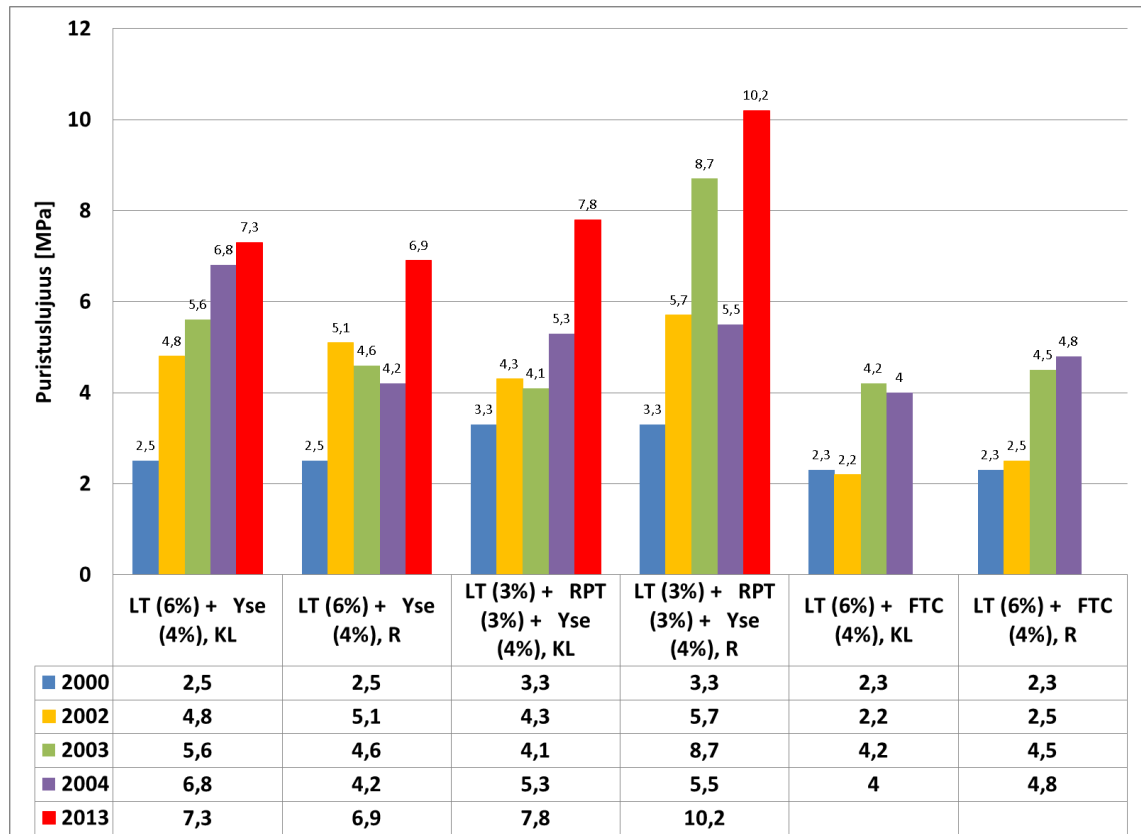
Kuva 6.38. Kukkian pilotilla rakennetutkimuksissa havaittuja halkeamia kerrosstabiloiduissa tuhkarakenteissa

Paaluilla 7120 ja 8780 tutkittiin lentotuhkan ja FTC:n (Nordkalkin sivutuoteseos) seoksella stabiloitua rakennetta. Rakenteet olivat esiin kaivettaessa lujan tuntuisia ja kulu-tuskerros tuhkarakenteen päällä oli noin 90 – 110 mm. Tuhkarakenteen pinta oli molemmissa pisteissä hieman rapautunut. Porattaessa näytekappaleet rikkoutuivat ja lentotuhkan ja FTC:n sekoituksesta ei saatu lainkaan puristuskappaleita.

Paalulla 9590 tutkittiin lentotuhkan, RPT:n ja yleisementin sekoituksella stabiloitua rakennetta. Rakenne oli esiinkaivettaessa lujan tuntuinen ja näköinen, eikä sen pinnassa ollut nähtävissä suuria merkkejä halkeilusta tai rapautumisesta. Rakenteesta saatiin porattua kolme ehjää näytekappaletta. Reunaojaan kaivettiin koekuoppa ympäristönäytteenottoa varten ja koekuopasta voitiin havainnoida, että tuhkarakenteen alla oli tässä kyseisessä kohdassa yli 1000 mm paksuinen louheesta ja hiekasta rakennettu alusrakenne. Tämä rakenne varmasti edesauttaa tässä pisteessä tuhkarakenteen toimintaa. Kanta-vuusmittausten tulokset olivat kyseisen rakenteen alueella hyvin samansuuruiset, joten voidaan olettaa että rakenteen kunto on yhtenäinen koko alueella.

6.4.3 Puristuslujuudet

Rakennetutkimuksissa saaduista koekappaleista määritettiin niiden puristuslujuudet. Kuvassa 6.39 on esitetty seurantatutkimuksissa määritettyjen puristuslujuuksien kehitys rakenteittain sekä laboratoriossa ennen rakentamista määritetty tavoitelujuus. Kuvassa on myös eroteltu tien keskilinjalta (KL) ja reunasta (R) poratut näytteet.



Kuva 6.39. Kukkian pilotin seurantatutkimuksissa määritettyjen puristuslujuuksien keskiarvot rakenteittain

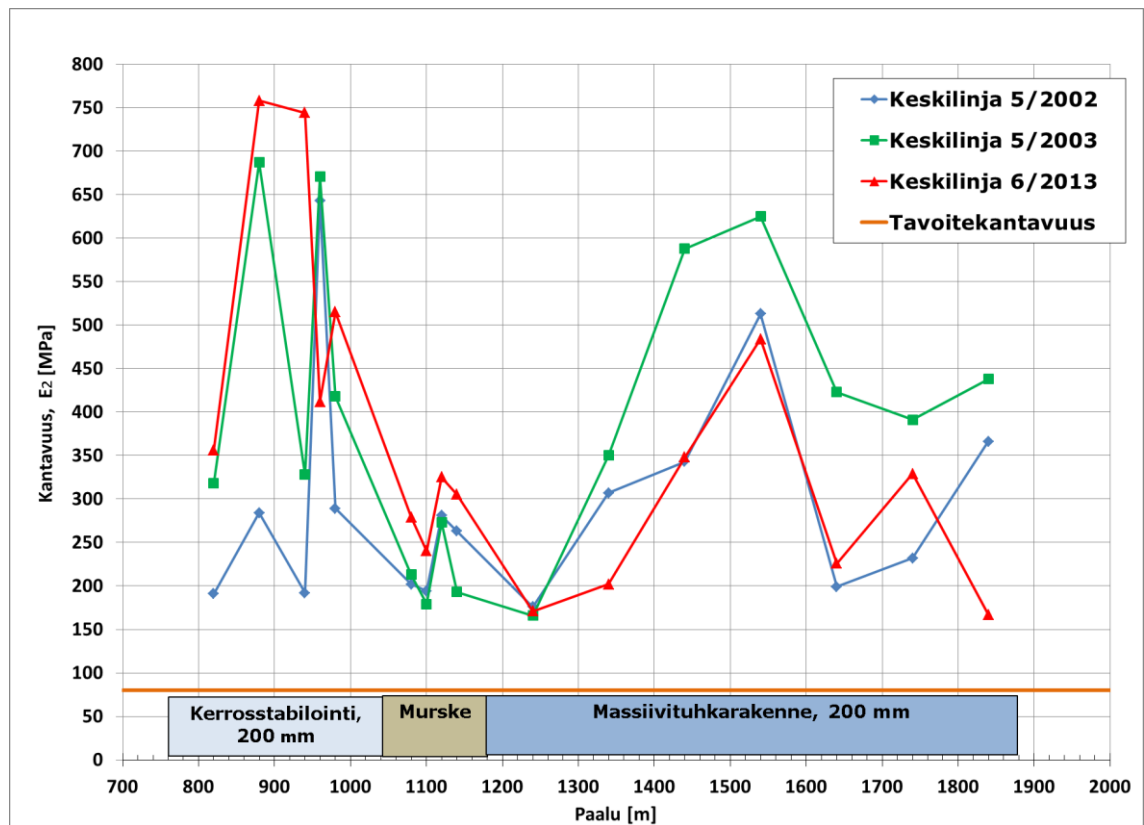
Suurin yksittäinen puristuslujuus 11,0 MPa saatiin paalulta 3930 poratusta kappaleesta. Pienin yksittäinen tulos 3,9 MPa saatiin paalulta 11240, eli suurin ja pieni tulos saatiin samasta rakennetyypistä, jossa oli käytetty lentotuhkaa ja yleissementtiä. Syitä kyseiseen laatuvaihteluun voi olla useita. Laatuvaihtelu voi johtua rakentamisen tai seosainesten laadunvaihtelusta tai pohjaolosuhteiden vaikutuksesta. Joka tapauksessa rakenteesta saadut puristuslujuustulokset ovat hyviä. Lentotuhkan ja FTC:n sekoituksella stabiloidusta rakenteesta ei saatu vuonna 2013 ehjää näytettä, joten sen lujuus on oletettavasti pienin. Kantavuusmittausten keskiarvojen perusteella lentotuhkan ja FTC:n sekoitus ei kuitenkaan ole heikoin rakenne, joskin sen alueella kantavuus oli hyvin lähellä alkutilannetta.

Kukkian koekohteessa käytetty lentotuhka oli bio/seospolton lentotuhkaa, joten se oletettavasti oli ominaisuuksiltaan valmiiksi jo kalsiumrikasta lentotuhkaa. Sideaineseosten muodostamista erilaisista kemiallisista reaktioilla saattaa pystyä selittämään eri koerakenteiden erilaiset lujuuskehitykset, mutta tämän työn puitteissa ei ole tutkittu tarkemmin rakenteessa tapahtuneita kemiallisia reaktioita.

6.5 Leppävirta

6.5.1 Kantavuudet

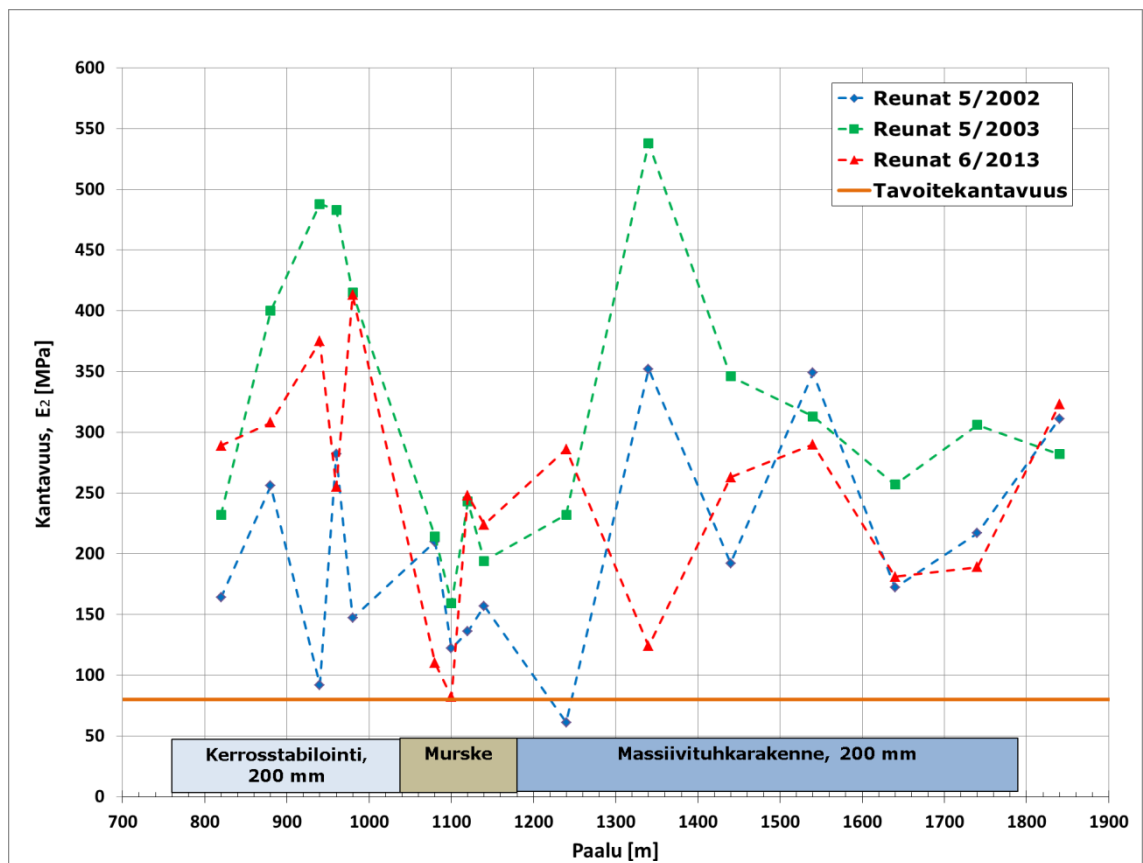
Leppävirran koekohteen tien 5341 kantavuusmittaus tehtiin 5.6.2013 pudotuspainolaitteella. Mittauksissa tutkittiin kantavuus tien keskilinjalta sekä tien reunoilta. Kantavuusmittauksen tulokset on esitetty kuvissa 6.40 ja 6.41.



Kuva 6.40. Leppävirran koekohteen kantavuudet tien keskilinjalta vuosilta 2000, 2003 ja 2013

Kuvassa 6.40 esitetyistä keskilinjalta tehdystä kantavuusmittauksesta nähdään, että pääpiirteittäin kantavuudet ovat samansuuntaiset kymmenen vuoden takaisiin mittauksiin verrattuna. Kerrosstabiloidulla alueella kantavuudet ovat hieman paremmat mitä aikaisemmin, kun taas massiivituhrakarakanteen alueella kantavuudet ovat hieman laskeneet. Vuoden 2003 mittaukset on tehty toukokuun lopulla ja vuoden 2013 mittaukset tehtiin kesäkuun alussa. Mittaus on tehty lähes samaan aikaan vuodesta, mutta ilmasto-olosuhteet ovat saattaneet olla edeltävänä aikana täysin erilaiset.

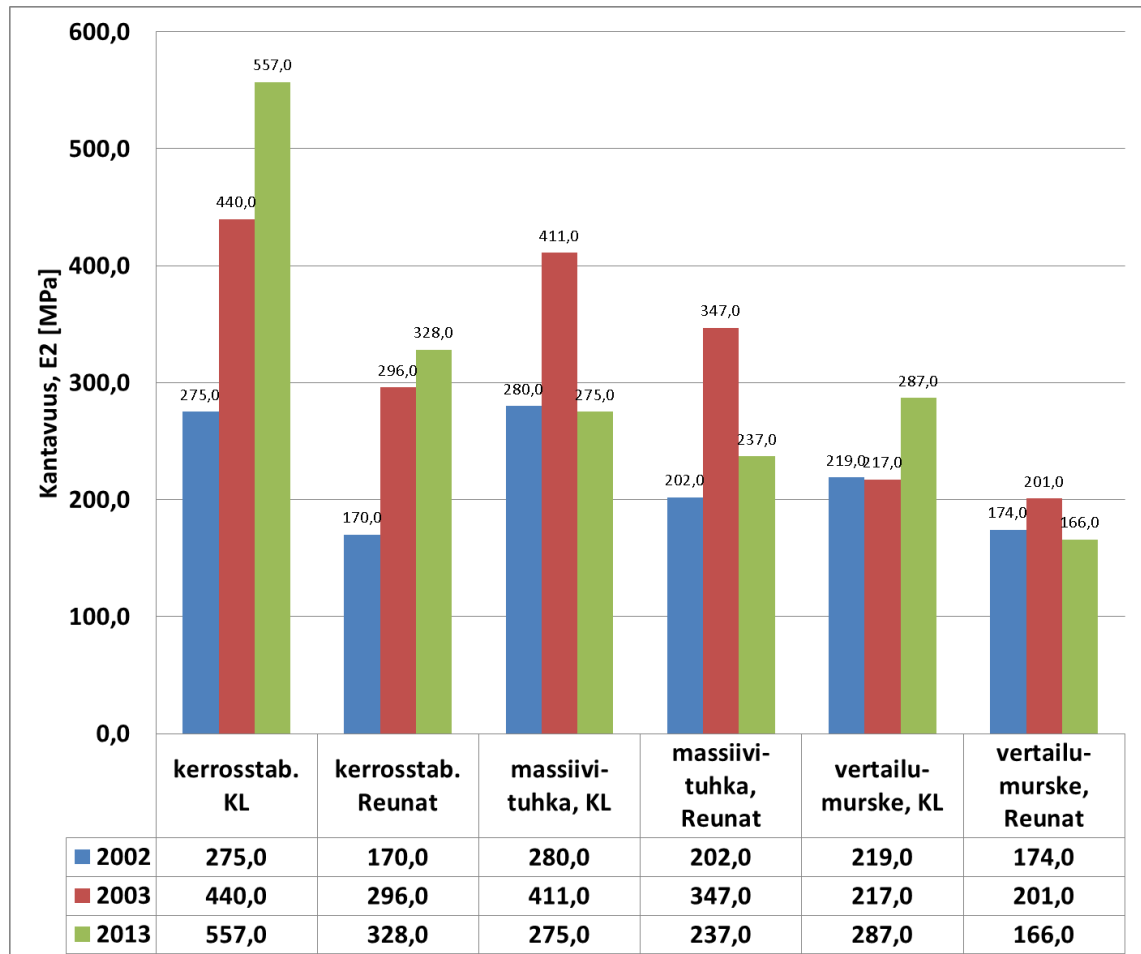
Kuvassa 6.41 esitetyissä reunakantavuuksien tuloksissa on nähtävissä enemmän vaihtelua kuin keskilinjän kantavuusmittauksissa. Mittausten mukaan yksittäisessä pisteessä massiivituhrakanteen alueella paalulla 1350 kantavuus on heikentynyt 414 MPa. Keskilinjalla, samalla paalulla kantavuus on laskenut noin 150 MPa. Tien kuntokartoituksessa havainnoitiin, että tuhrak rakenne oli näkyvissä kyseisellä alueella, eli tien kulutuskerros oli puutteellinen paalun 1340 alueella. Kulutuskerros oli myös erittäin kuiva ja löyhä. Näin yksittäisissä mittauksissa saattaa olla suuria epätodellisia vaihteluita, jotka tulisi huomioida tulosten tulkinnassa. Kerrostabiloinnin alueella ei mitattu vuonna 2013 heikkoja pistemäisiä kantavuuksia, joten tulos oli aikaisempaa parempi. Tuhrakanteiden alueilla kaikki kantavuudet olivat tavoitekantavuuden yläpuolella vuonna 2013.



Kuva 6.41. Leppävirran koekohteen kantavuudet tien reunoilta vuosilta 2000, 2003 ja 2013

Kuvassa 6.42 on esitetty mitattujen kantavuuksien keskiarvot rakenteittain. Kuvasta on nähtävillä sama kehityssuunta, eli kerrostabiloidulla alueella kantavuuksien keskiarvot ovat parantuneet sekä tien keskilinjalla että reunoilla. Massiivituhrakanteen alueella kantavuuksien keskiarvot ovat taas laskeneet, tosin keskiarvojen laskennassa on mukana epätodellisen suuria kantavuuksien vaihteluita. Massiivituhrakanteen alueelta vuonna 2003 laskettuihin keskimääräisiin kantavuuksiin tulee suhtautua kriittisesti. Vertailu-

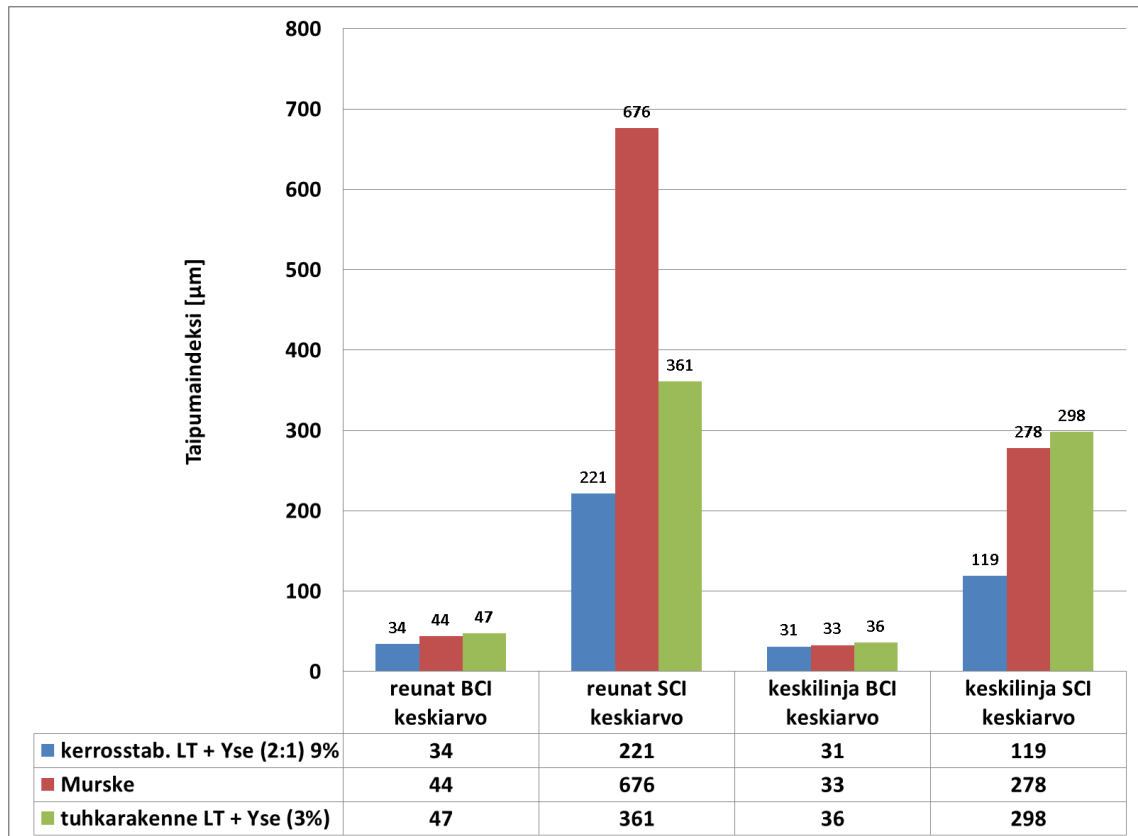
murskerakenteen alueelta mitattujen kantavuuksien keskiarvot ovat keskilinjalla hieman paremmat kuin 10 vuotta sitten, mutta tien reunalla muutos on käänteinen.



Kuva 6.42. Leppävirran koekohteen kantavuuksien keskiarvojen kehitys rakenteittain

Kantavuusmittauspisteiden välinen etäisyys oli kohteessa melko pitkä, joten tutkimustulokset ovat hyvin pistemäisiä. Pistemäisissä mittauksissa virheellisten tulosten vaikutus kokonaiskuvaan kasvaa. Laajoista mittaustuloksista olisi yksinkertaisempaa karsia suuret huiput ja notkahdukset pois. Leppävirran koekohteen rakennetutkimuksissa massiivituuhkarakenteesta saatiin kuitenkin porattua ehjät näytekappaleet, joten kantavuustulos ei kerro koko totuutta rakenteen kunnosta. Kantavuusmittaukset ovat saattaneet häiriintyä kuivan ja löyhän pintakerroksen vuoksi, jollaista havaittiin juuri massiivituuhkarakenteen alueella.

Rakenteen jäykkyyttä voidaan kuvata taipumaindeksien BCI ja SCI avulla. Vuoden 2013 pudotuspainolaitemittauksista määritetyt indeksit on esitetty kuvassa 6.43. Rakente on sitä jäykempi mitä pienempi taipumaindeksi on.



Kuva 6.43. Leppävirran koekohteen taipumaindeksit rakenteittain vuodelta 2013

Kuvasta nähdään sama kehityssuunta kuin kantavuustuloksista. Kerrosstabiloidun tuhkarakenteen keskimääräinen jäykkyys on selvästi muita rakenteita suurempi. Keskilinjalla pohjamaan taipumaa kuvaavan BCI:n keskimääräiset arvot ovat hyvin lähellä toisiinsa mutta pinnan jäykkyyttä kuvaavan SCI:n arvot ovat kerrosstabiloidulla rakenteella selvästi muita paremmat. Mittausten mukaan tien reuna-alueilla murskerakenteen pinnan jäykkyys on selvästi tuhkarakenteita heikompi.

6.5.2 Kuntokartoitus ja rakennetutkimus

Tien 5341 kuntokartoitus tehtiin 7.8.2013. Yleiskunnoltaan tie oli hyväkuntoinen ja suuria vaurioita tiessä ei ollut ja yleisesti vaurioita oli vähän. Yleisin ongelma tiellä oli puutteellinen sivukaltevuus, reunapalteen muodostuminen ja lievä urautuminen ajoratojen reunoissa. Urat varmasti pidättävät sateella vettä ja tästä johtuen urien kohdalle oli muodostunut jonkin verran kuoppia. Tiellä oli myös havaittavissa erittäin kuivia, pölyäviä kohtia, joihin oli muodostunut ns. nimismiehen kiharaa. Tiellä oli myös muutamassa kohtaa tuhkarakenne esillä, joten kulutuskerroksen paksuus oli näillä kohdilla puutteellinen.

Kuvassa 6.44 on esitetty kuiva ja herkästi pölyävä tieosuus paalulla 1200 massiivituhkarakenteen alueella. Kuvassa on nähtävissä tien pintaan muodostuneet nimismiehen kiharat. Kuivempaa osuutta havaittiin paaluvälillä 1180 – 1840 ja tästä johtuen voisi epäillä, että pinnan kuivuminen johtuisi massiivituhkarakenteesta. Massiivituhkarakenne saattaa

vähentää veden kapillaarista nousua pohjamaasta pintaan, joten pintakerroksen materiaalin tulisi olla vettä sitovaa.



Kuva 6.44. Kuiva ja herkästi pölyävä tienkohta Leppävirralla tiellä 5341 paalulla 1200 massiivituhkarakenteen alueella

Kuvassa 6.45 on esitetty näkyvässä oleva massiivituhkarakenteen pinta paalulla 1350. Kantavuusmittauksien perusteella rakenteen kantavuus oli heikentynyt merkittävästi tällä kohdalla edelliseen mittaukseen nähden. Mittaus oli kuitenkin pistemäinen. Kuvasta nähdään, että tuhkarakenteen pinta on voimakkaasti verkkohalkeillut ja näin sadevesi pääsee vaikuttamaan rakenteeseen. Näin veden, liikennekuorman ja pakkasen yhteisvaikutus rakenteen rapautumiseen ja vaurioitumiseen on huomattavaa.



Kuva 6.45. Puutteellinen kulutuskerros Leppävirran koekohteessa paalulla 1350

Rakennetutkimukset tehtiin viidestä pisteestä. Paaluilla 905, 1960 ja 2240 tutkittiin kerrostabiloitua tuhkarakennetta sekä paaluilla 1270 ja 1630 massiivituhkarakennetta. Tuhkarakenteet olivat esiin kaivettaessa lujan tuntuisia ja porattavia. Ainoastaan paalulta 1960 ei onnistuttu saamaan ehjää puristuskoekappaletta.

Paalulla 1270 tuhkarakenteen päällä oli noin 100 – 130 mm kulutuskerros. Kaivettaessa tuhkarakenteen yläpinnasta irtosi noin 20 – 40 mm paksuinen tuhkan ja murskeen sekin kerros. Tuhkarakenteen pinnassa oli nähtävissä pystysuuntaisia halkeamia. Porattaessa rakenteesta oli havaittavissa myös vaakasuuntaisia halkeamia. Kuvassa 6.46 on esitetty paalulla 1270 esiin kaivettu tuhkarakenne ennen näytekappaleiden porausta ja porauksen jälkeen. Keskilinjalta ei saatu ehjiä näytekappaleita, mutta reunasta poraus tuotti kunnolliset puristuskappaleet. Tuhkarakenteen paksuudeksi reunassa arvioitiin 240 mm, ja kuvassa 6.47 on esitetty massiivituhkarakenteesta poratut kappaleet. Kappaleissa näkyy jonkin verran halkeilua. Tuhkarakenteen alla oli rakenteen viereen tehdystä koekuopasta havainnoituna murskettä 400 mm ja sen alla hiekkaa 300 mm. Pohjamaana todettiin olevan silttinen savi.



Kuva 6.46. Leppävirran koekohteessa paalulla 1270 esiin kaivettu tuhkarakenne ennen ja jälkeen näyttekappaleiden porauksen



Kuva 6.47. Leppävirran koekohteen massiivituhkarakenteesta porattuja näyttekappaleita

Paalulla 1630 tuhkarakenne oli lähes samanlainen kuin paalulla 1270. Tuhkarakenteen pinnassa ei ollut havaittavissa voimakasta halkeilua, mutta porattaessa kappaleissa oli

nähtävissä halkeilua. Kulutuskerroksen paksuus oli vain 50 mm ja porattaessa tuhkerakroksen paksuudeksi arvioitiin 180 – 200 mm. Tuhkerakroksen alusrakenteena oli noin 500 mm mursketta ja pohjamaana moreeni.

Kerrostabiloitua rakennetta tutkittiin paaluilla 905, 1960 ja 2240. Stabiloidun kerroksen pinta oli jokaisella tutkimuspisteellä hieman rapautunut ja pinnasta irtosi kaivettaessa pieni tuhkan ja murskeen sekainen kerros. Paalulta 1960 ei saatu porattua ehjiä kappaleita ja rakenne oli selvästi rapautunut. Rakenteen viereisestä koekuopasta voitiin havainnoida, että tuhkarakenteen alla, ainakin tien reunaosalla oli erittäin ohut alusrakenne ja pohjamaan savi. Kuvassa 6.48 on esitetty havainnot koekuopasta paalulta 1960.



Kuva 6.48. Leppävirran koekohteessa paalulla 1960 havainnoitu tuhkarakenteen alusrakenne

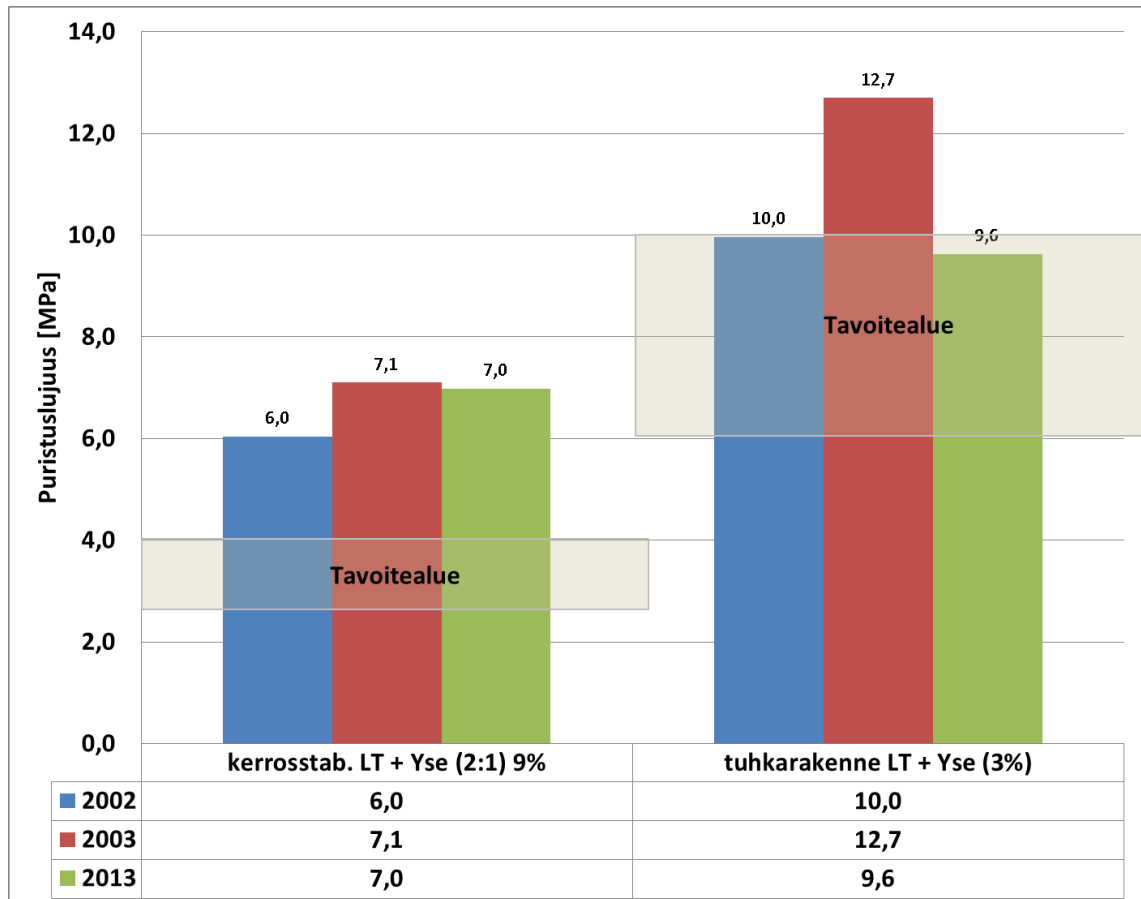
Paaluilla 905 tuhkarakenteen alla oli reilu 300 mm mursketta ja paalulla 2240 700 mm hiekkaa. Molemmilla paaluilla tuhkarakenne oli parempikuntoinen kuin paalulla 1960. Kuvassa 6.49 on esitetty paalulta 905 porattu näytekappale.



Kuva 6.49. Leppävirran koekohteesta paalulta 905 poratut näytekappaleet

6.5.3 Puristuslujuudet

Leppävirran koekohteesta poratuista näytekappaleista määritettiin laboratoriossa puristuslujuus. Kuvassa 6.50 on esitetty tuhkarakenteiden seurantatutkimuksissa saadut puristuslujuuksien keskiarvot rakenteittain. Kuvasta nähdään, että kerrosstabiloidun rakenteen osalta puristuslujuuksien keskiarvot ovat pysyneet lähes samana vuoteen 2003 verrattuna. Massiivituhkarakenteen kohdalla ljuuksien keskiarvot ovat laskeneet hieman. Mitatut ljuudet ovat kaikilta osin edelleen hyvällä tasolla. Puristuslujuudet vaihtelivat vuonna 2013 kerrosstabiloidulla rakenteella 3,7 – 10,3 MPa välillä ja massiivituhkarakenteella 6,9 – 12,6 MPa välillä. Ennen rakentamista massiivituhkarakenteen tavoitteelliseksi puristuslujuudeksi oli asetettu 6 – 10 MPa ja kerrosstabiloidun rakenteen 3 – 4 MPa, eli kaikkien testattujen kappaleiden ljuudet olivat edelleen tavoitteiden mukaiset. Paalulta 1960 ei saatu puristuskappaletta, joten sillä alueella rakenteen ljuus ei todennäköisesti ole tavoitteiden mukainen.

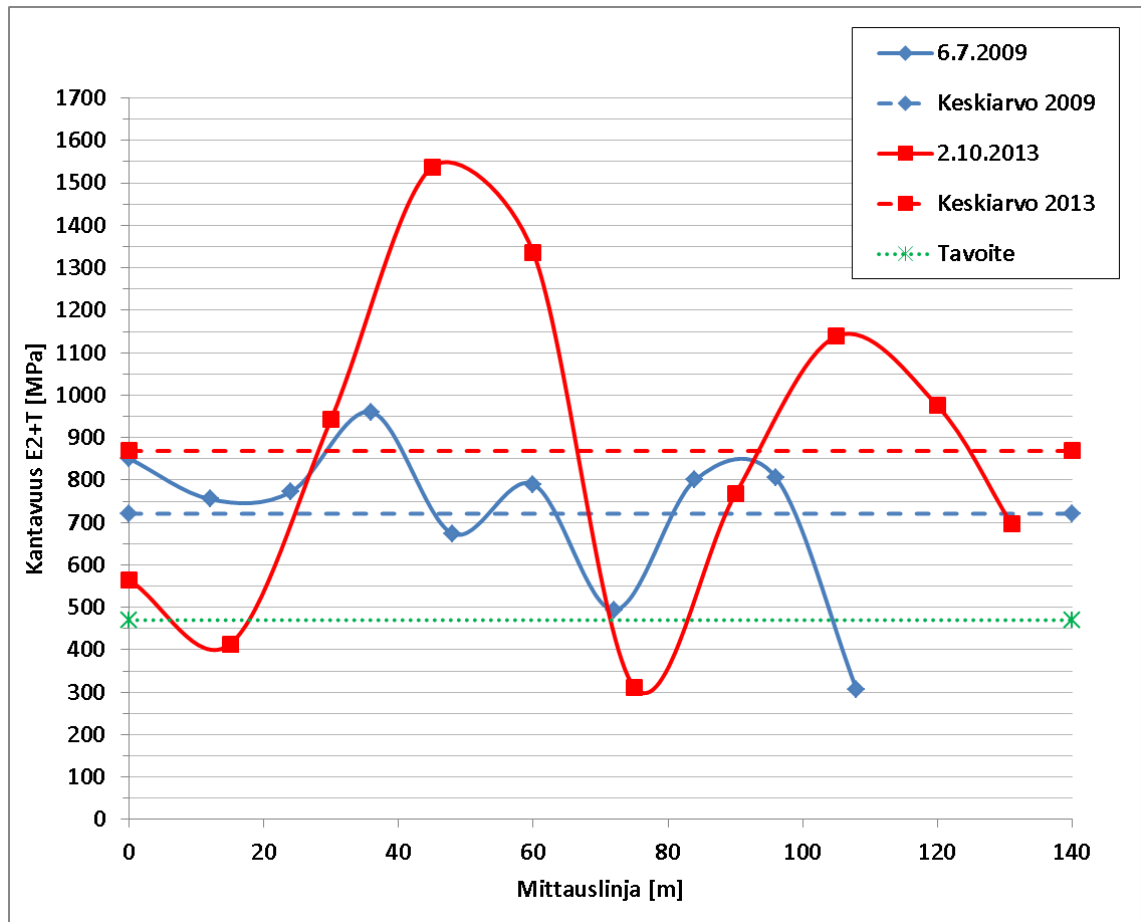


Kuva 6.50. Leppävirran koekohteen seuranta tutkimuksissa saadut tuhkarakenteiden puristuslujuudet rakenteittain ja laboratoriossa ennen rakentamista määritetyt tavoitealueet

6.6 Vuosaaren satama

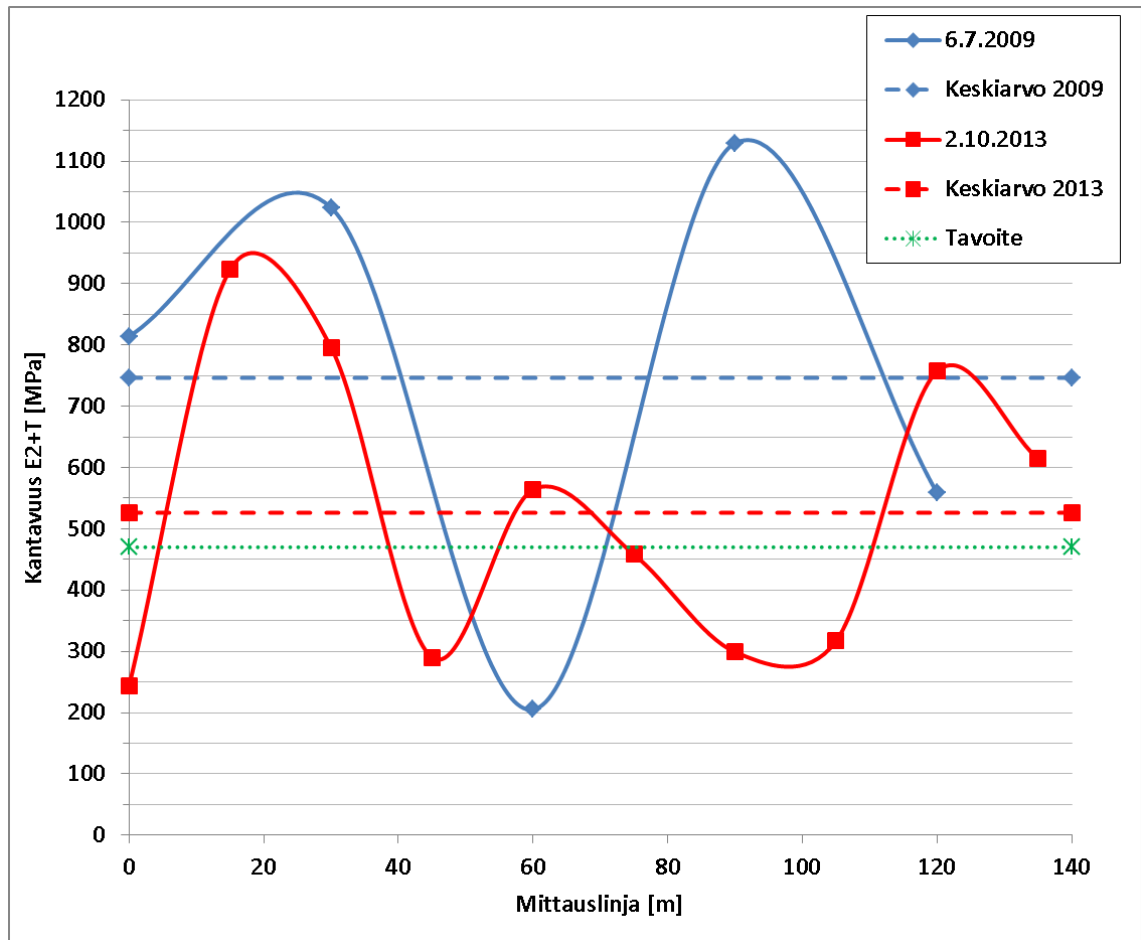
6.6.1 Kantavuudet

Vuosaaren tuhkastabiloidun satamakentän kantavuudet mitattiin pudotuspainolaitteella 2.10.2013 kolmelta mittauslinjalta. Mittauslinjojen sijainti on esitetty liitteenä 1 olevassa kuvassa. Linjat 1 ja 2 olivat ohuemman 200 mm kerrosstabiloinnin alueella, eli rakenteen 4NS alueella. Linja 3 sijaitsi alueen ympäri kulkevalla tiellä, johon on rakennettu 250 mm kerrosstabiloitu kantava kerros, eli alueella 2NS. Alueella oli tehty päällystystöitä ja varsinkin linjalla 1 ja 3 kantavuutta mitattiin uudelleen päällystetyiltä alueilta. Liitteenä 1 olevassa kuvassa on esitetty alueelta mitatut kantavuusarvot kartalla. Linjalta 1 mitatut kantavuudet vuosilta 2009 ja 2013 on esitetty kuvassa 6.51.



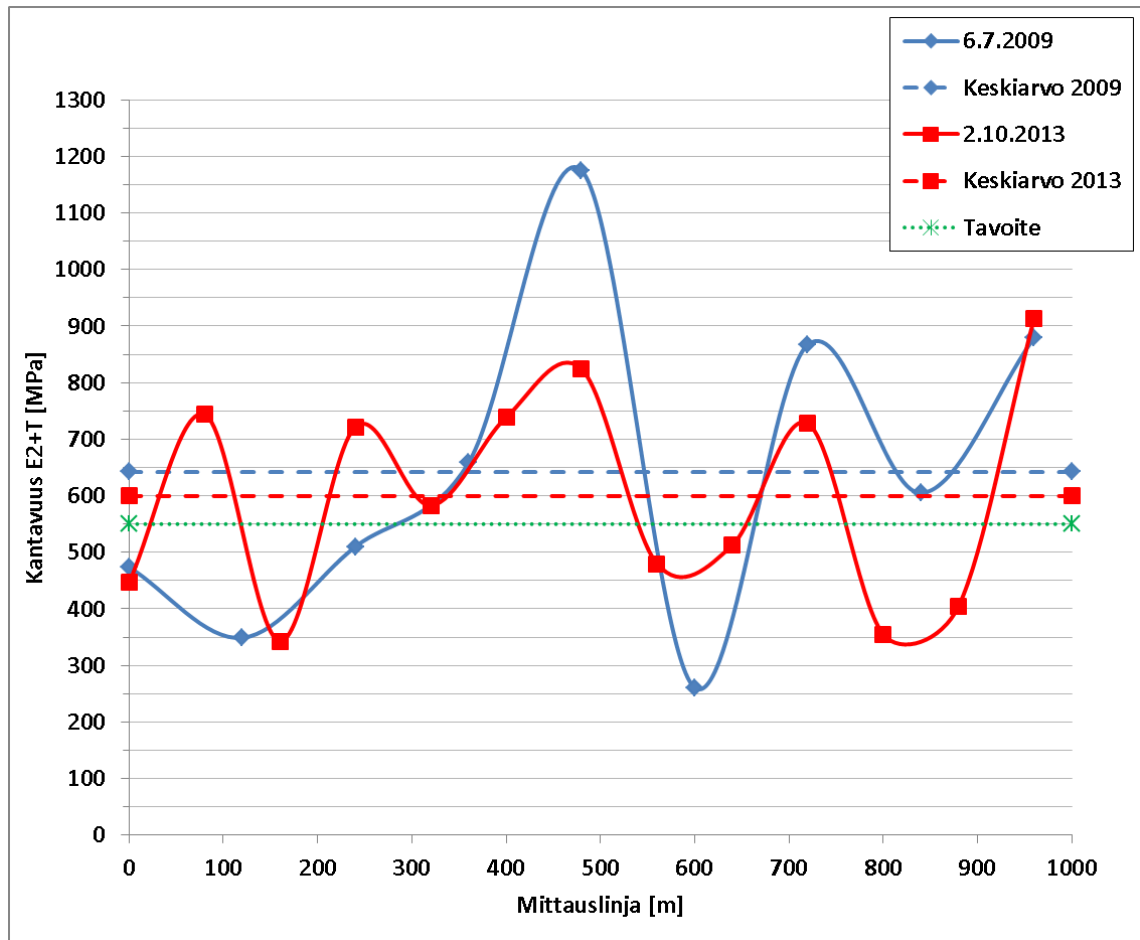
Kuva 6.51. Vuosaaren satamakentän kantavuusmittausten tulokset linjalta 1

Kuvassa 6.52 on esitetty lämpötilakorjatut kantavuusarvot linjalta 2. Kantavuusarvoissa rakenteen 4NS alueella eli linjoilla 1 ja 2 oli melko paljon hajontaa. Vuonna 2013 mitattujen kantavuuksien pienin kantavuusarvo E_2+T oli 244 MPa ja suurin arvo 1538 MPa. Suurimmat kantavuudet mitattiin uudelleen päällystetyltä alueelta, jossa havaittiin olevan paikoittain jopa 120 mm paksuinen päällyste. Linjalla 1 kantavuuksien keskiarvo oli 869 MPa ja keskihajonta 375 MPa. Linjalla 2 samat arvot olivat 526 MPa ja 230 MPa.



Kuva 6.52. Vuosaaren satamakentän kantavuusmittausten tulokset linjalta 2

Kuvassa 6.53 on esitetty mitatut kantavuudet linjalta 3. Linjalla 3 suurin lämpötilakorjattu kantavuusarvo vuonna 2013 oli 913 MPa ja pienin 343 MPa. Linjalla 3 kantavuu- den keskiarvo oli 600 MPa keskihajonnan ollessa 182 MPa. Myös rakenteen 2NS alu- eella oli osittain uutta päällystettä.

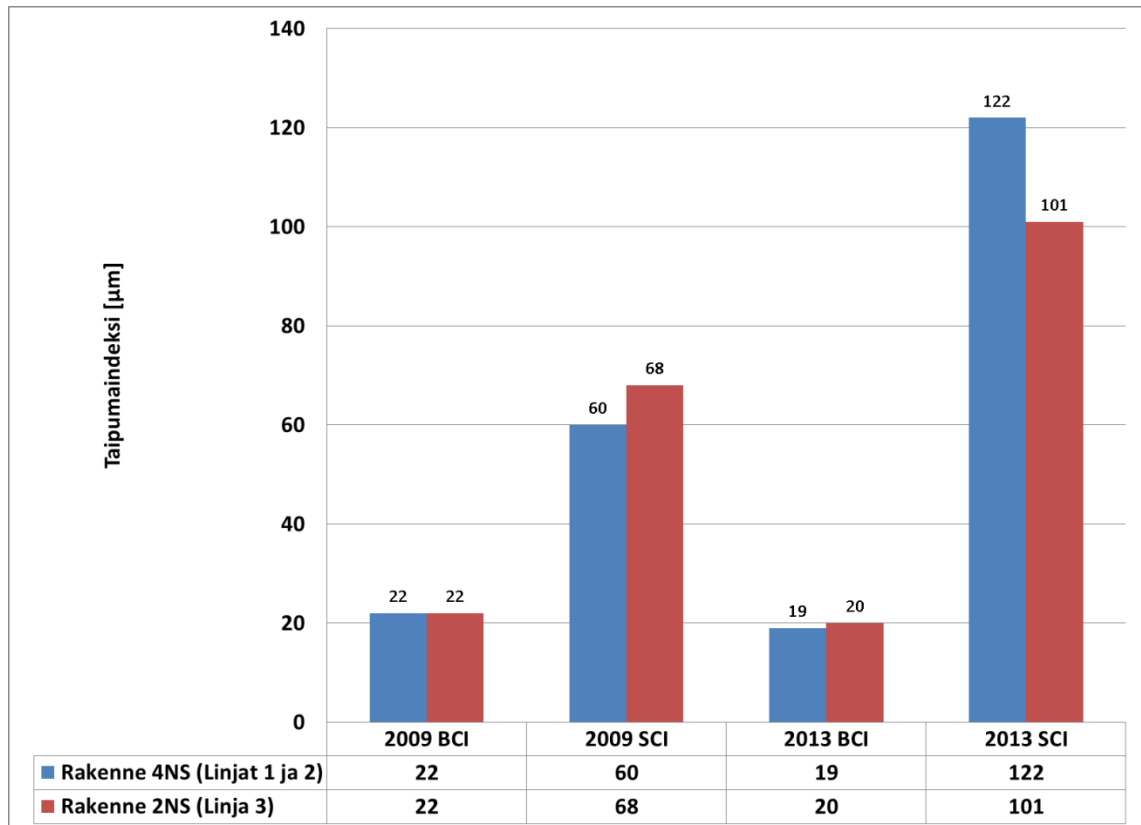


Kuva 6.53. Vuosaaren satamakentän kantavuusmittausten tulokset linjalta 3

Jokaisella mittauslinjalla kantavuusarvoissa on melko paljon vaihtelua. Kantavuuksien keskiarvot olivat tavoitekantavuuksien yläpuolella, mutta yksittäisissä mittauksissa oli tavoitekantavuuksien alituksia. Pudotuspainolaitteella määritettyä taipumasuppiloa tarkastelemalla voidaan selvittää onko kantavuusongelma päällysrakenteesta tai alusrakenteesta johtuva.

Suuret vaihtelut kantavuuksissa voivat viestiä kentän kerrosten rakentamisen laadunvaihteluista. Stabiloinnin onnistumisen kannalta sekoituksen, kastelun ja tiivistyksen onnistuminen on suuressa asemassa. Myös käytetyn sideaineen laatu vaihtelut saattavat aiheuttaa suuria vaihteluja rakenteen kantavuuteen. Myös käytetyn lentotuhkan lujittumisreaktiossa syntyneen materiaalin laatu ja rakenteen pH-arvo vaikuttaa rakenteen pitkäaikaiskestävyyteen.

Kuvassa 6.54 on esitetty pudotuspainolaitteella saaduista taipuma-arvoista lasketut keskimääräiset taipumaindeksit vuosilta 2009 ja 2013.



Kuva 6.54. Vuosaaren satamakentän pudotuspainolaitemittauksista määritetyt keskimääräiset taipumaindeksit rakenteittain vuosille 2009 ja 2013

Kuvasta 6.54 nähdään että päällysrakenteen alaosan indeksi BCI on pysynyt lähes samana vuosina 2009 ja 2013, kun taas päällysrakenteen yläpinnan jäykkyyttä kuvaava indeksi SCI on noussut vuodesta 2009. Tämä kuvaa sitä, että päällysrakenteen yläpinnan jäykkyys on laskenut vuodesta 2009.

6.6.2 Kuntokartoitus ja rakennetutkimus

Kentän kunto yleisesti oli hyvä. Alueella oli tehty päällystystöitä edellisten tutkimusten jälkeen ja ainoastaan tutkimuslinjalla 2 oli nähtävissä vanhat paikatuksi porauspisteet. Alueella oli havaittavissa joitain vaurioita päällysteessä ja varsinkin putkilinjojen kohdilla oli havaittavissa pientä painumaa ja vaurioita päällysteessä. Kuvassa 6.55 on esitetty vauriohavaintoja kentältä.



Kuva 6.55. Vuosaaren satamakentällä 2013 havaittu vaurio putkilinjan kohdalla

Rakennetutkimuksessa tuhkarakenteesta porattiin päällysteen läpi näytekappale puristuskoetta varten. Tutkimuspisteitä vuonna 2013 oli 10 kappaletta. Tutkimuspisteiden sijainti on esitetty liitteenä 1 olevassa kuvassa. Rakennetutkimuksissa havainnoitiin päällysteen tartunta stabiloidun kerroksen pintaan. Jokaisessa tutkimuspisteessä päällyste irtosi porattaessa stabiloinnista.

Päällysteen paksuus vaihteli tutkimuspisteissä 46 mm ja 120 mm välillä ja keskimäärin päällystepaksuus oli 66 mm. Suunnitellun päällystepaksuuden (50 mm) vähäisiä alituk-
sia tavattiin pisteissä 22 (46 mm), 20 (49 mm) ja 17 (49 mm).

Vuonna 2013 tehdyssä tutkimuksessa ei saatu porattua ehjää näytekappaletta kolmesta tutkimuspisteestä. Pisteistä 11, 25 ja 28 saatiin kantavasta kerroksesta vain kalliomursketta muistuttava näyte. Kuvassa 6.56 on esitetty pisteestä 11 saatu näyte. Näiden pisteiden näytteistä testattiin niiden pH-arvo, jotta pystyttiin arvioimaan murskeen tuhkapitoisuutta. Vuonna 2009 näistä pisteistä oli saatu ehjät puristuskappalet. Kaikki pisteet 11, 25 ja 28 sijaitsevat ympärystien alueella, eli alueella 2NS, jossa kerrosstabiloinnin paksuus on 250 mm.



Kuva 6.56. Vuosaaren satamakentän tuhkarakenteesta pisteestä 11 vuonna 2013 porattu näyte

pH-mittauksen ja sähkönjohtavuuden mittauksen avulla pyrittiin selvittämään mahdollisia syitä, miksi muutamista tutkimuspisteistä ei tavattu kiinteää stabiloitua kantavaa kerrosta. Tutkimusten avulla pyrittiin selvittämään, että onko tutkimuspisteen kohdalta jäänyt mahdollisesti stabilointi kokonaan tekemättä, vai onko kerrosstabilointi muusta syystä vaurioitunut. Tehtyjen tutkimusten tulokset on esitetty taulukossa 6.2.

Taulukko 6.2. Vuosaaren satamakentän näytteiden sähkönjohtavuuden ja pH-mittausten tulokset

Näytenro.	Selite	2 h		24 h	
		pH	sähkönjoht. [mS/m]	pH	sähkönjoht. [mS/m]
P11	irtonaista mursketta	10,11	77	10,09	109
P15	pur.luj. 18.6 MPa	11,48	360	11,47	430
P17	pur.luj. 8.2 MPa	10,50	360	10,49	400
P24	pur.luj. 19,2 MPa	11,33	146	11,28	187
P25	irtonaista mursketta	10,02	102	9,94	131
P28	irtonaista mursketta	10,04	230	10,02	290
Vertailu	ei stabiloitua irtonaista kalliomursketta	8,04	55	8,11	59

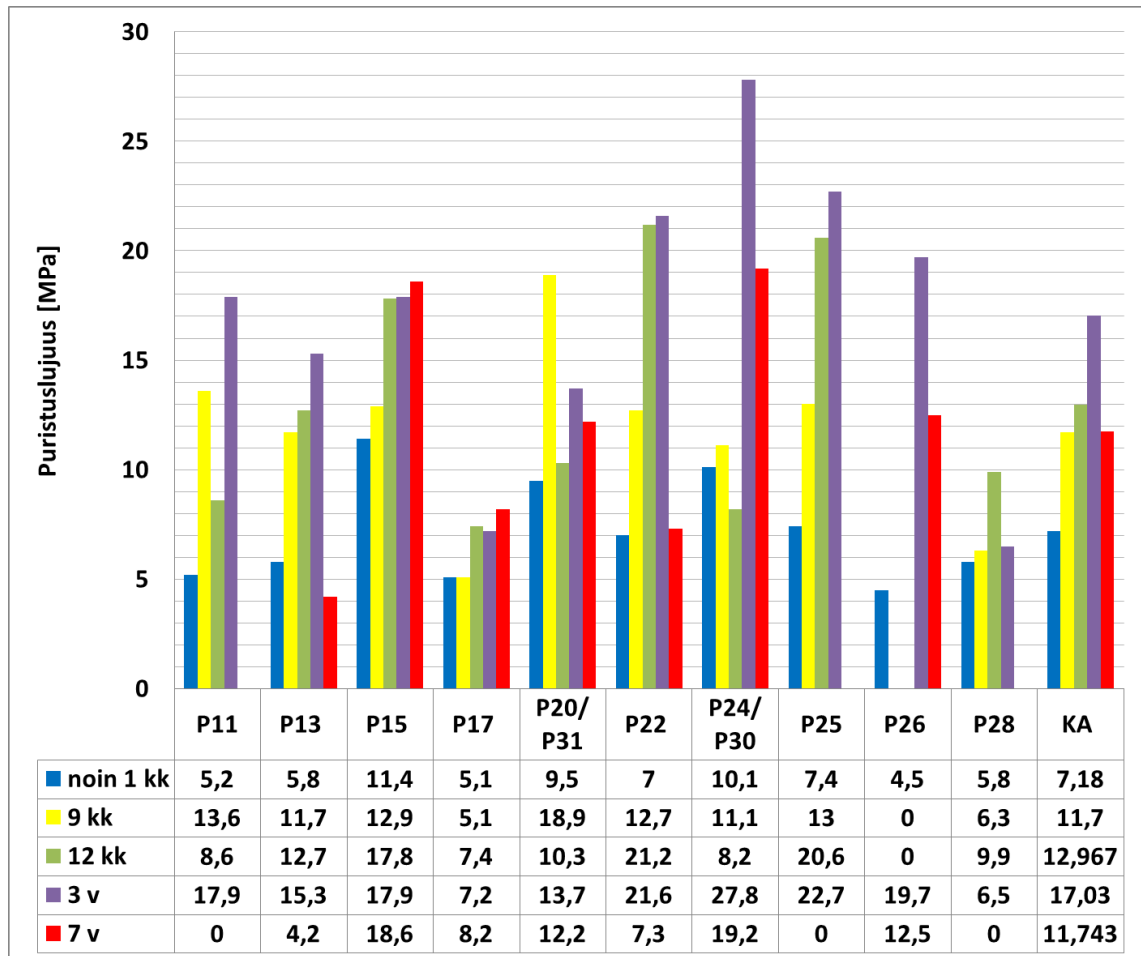
Tulosten perusteella voidaan todeta, että tutkimuspisteistä 11, 25 ja 28 näytteeksi otettu irtonainen murske ei ole pelkkää kalliomursketta. Irtonaisissa näytteissä pH-arvo on kiinteitä näytteitä alhaisempi, mutta kuitenkin selvästi pelkän kalliomurskeen pH:ta suurempi. pH:n ero irtonaisen näytteen ja kiinteän näytteen välillä voi johtua siitä, että irtonaiset näytteet ovat liettyneet jo kentällä porauksen yhteydessä käytettyyn veteen eri tavalla kuin kiinteät näytteet. Kiinteistä kappaleista vasta laboratorioissa murskattu näyte kuvastaa paremmin kentän rakenteessa vallitsevia olosuhteita. Saattaa myös olla, että rakenteessa paikoittain laskenut pH-arvo on aiheuttanut stabiloidun kerroksen vaurioitumisen. CSH-geeli pysyy stabiilina noin pH-arvoon 9,5 asti ja ettringiitti pH-arvoon 10,4 asti. (Wigren, 2014) Stabiloidun kerroksen vaurioituminen voidaan mahdollisesti selittää myös kemiallisten reaktioiden kautta, mutta tämän työn puitteissa ei ole tutkittu tuhkarakenteissa toteutuneita kemiallisia reaktioita. Alueella on tehty rakentamisen jälkeen myös kaivutöitä ja näin rakenne on voitu kaivaa rikki. Jotta asia selviäisi, tulee tehdä lisäselvityksiä mahdollisista rakennustöistä ja rakenteessa tapahtuneista kemiallisista reaktioista.

6.6.3 Puristuslujuudet

Rakennetutkimuksissa saaduista koekappaleista määritettiin niiden puristuslujuus. Kuvassa 6.57 on esitetty Vuosaaren satamakentän seurantatutkimuksissa eri-ikäiselle rakenteelle tehtyjen puristuslujuustutkimusten tulokset.

Koekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvo on laskenut vuodesta 2009 noin 5,3 MPa eli melkein kolmanneksen, mutta puristuslujuus on edelleen hyvä ja se täyttää tavoitetason. Nykyisellään puristuslujuuksien keskiarvo on palautunut samalle tasolle, jolla se oli vuonna 2007. Lujuuksien lasku ei ole kuitenkaan ollut aivan tasaista ja muutamissa pisteissä ljuudet ovat pysyneet vuoden 2009 tasolla.

Liitteenä 1 olevasta kuvasta voidaan nähdä miten puristuslujuuden tutkimuspisteet sijoittuvat kantavuusmittauslinjoihin nähden. Kuvasta nähdään, ettei heikkojen kantavuuksien ja huonojen puristuslujuuksien välille voida vetää suoraa yhteyttä. Kuvasta nähdään, että rakenteessa on tutkimuslinjoissa suurta epätasaista vaihtelua sekä puristuslujuustuloksissa että kantavuustuloksissa. Jotta tulosten vaihteluun saatettaisiin saada parempi selvyys, tulisi karttaan sijoittaa kaikki putkikaivannot ja varsinkin stabiloinnin jälkeen tehdyt kaivannot.



Kuva 6.57. Vuosaaren satamakentän seurantatutkimuksissa tehtyjen puristuskokeiden tulokset

Kuvasta 6.57 nähdään, että vuonna 2013 suurin puristuslujuus 19,2 MPa saatiin pisteestä 24/30 poratusta näytekappaleesta ja alhaisin puristuslujuus 4,2 MPa pisteestä 13 poratusta kappaleesta. Pisteistä 24/30 ja 13 poratut kappaleet on esitetty kuvassa 6.58. Kuvasta nähdään, että vasemman puoleisessa kappaleessa leikkauspinta on tiiviimmän näköistä kuin oikeanpuoleisessa kappaleessa. Molemmissa rakenne on kuitenkin niin tiivis ja sideaine on niin luja, että runkoaineen kivet ovat lähteneet leikkautumaan. Jos sideaine olisi haurasta, runkoaineen kivet eivät pysyisi porattaessa paikallaan vaan ne lähtisivät liikkeelle terän mukana.



Kuva 6.58. Vuosaaren satamakentältä vuonna 2013 porattuja näyttekappaleita, vasemalla pisteestä 24/30 ja oikealla pisteestä 13

6.7 E-moduulien takaisinlaskenta

Suuntaa antavat E-moduulit laskettiin valituista kohteista. Kohteet on valittu siten, että laskijan tekemät oletukset olisivat mahdollisimman vähäiset ja näin tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia.

6.7.1 Kerrostabiloidun tuhkarakenteen E-moduuli

Kerrostabiloitujen tuhkarakenteiden takaisinlaskenta tehtiin Vuosaaren, Jämsän ja Loppävirran koekohteista saatujen tulosten perusteella.

Vuosaaren E-moduulit

Vuosaaren sataman rakenteen materiaalit ja kerrospaksuudet sekä pohjamaan laatu on tiedossa hyvällä tarkkuudella E-moduulien takaisinlaskentaa ajatellen. Vuosaaren koerakenteesta on myös runsaasti aikaisempaa seurantatietoa.

Vuosaaren koekappaleiden puristuskoetuloksista määritetyt E_{50} -moduulit on esitetty taulukossa 6.3.

Taulukko 6.3. Vuonna 2013 Vuosaaren koerakenteesta porattujen koekappaleiden puristuskoetuloksista määritetyt tuhkarakenteen E-moduulit

Piste:	Puristuslujuus [MPa]	$E_{50\text{-sek}}$ [MPa]	$E_{50\text{-tan}}$ [MPa]
P13	4,2	228	500
P15	18,6	1107	2222
P17	8,2	837	1111
P20/ P31	12,2	897	1905
P22	7,3	406	667
P24/ P30	19,2	8000	6000
P26	12,5	822	556
<i>KA</i>	<i>11,7</i>	<i>1757</i>	<i>1851</i>
<i>MED</i>	<i>12,2</i>	<i>837</i>	<i>1111</i>

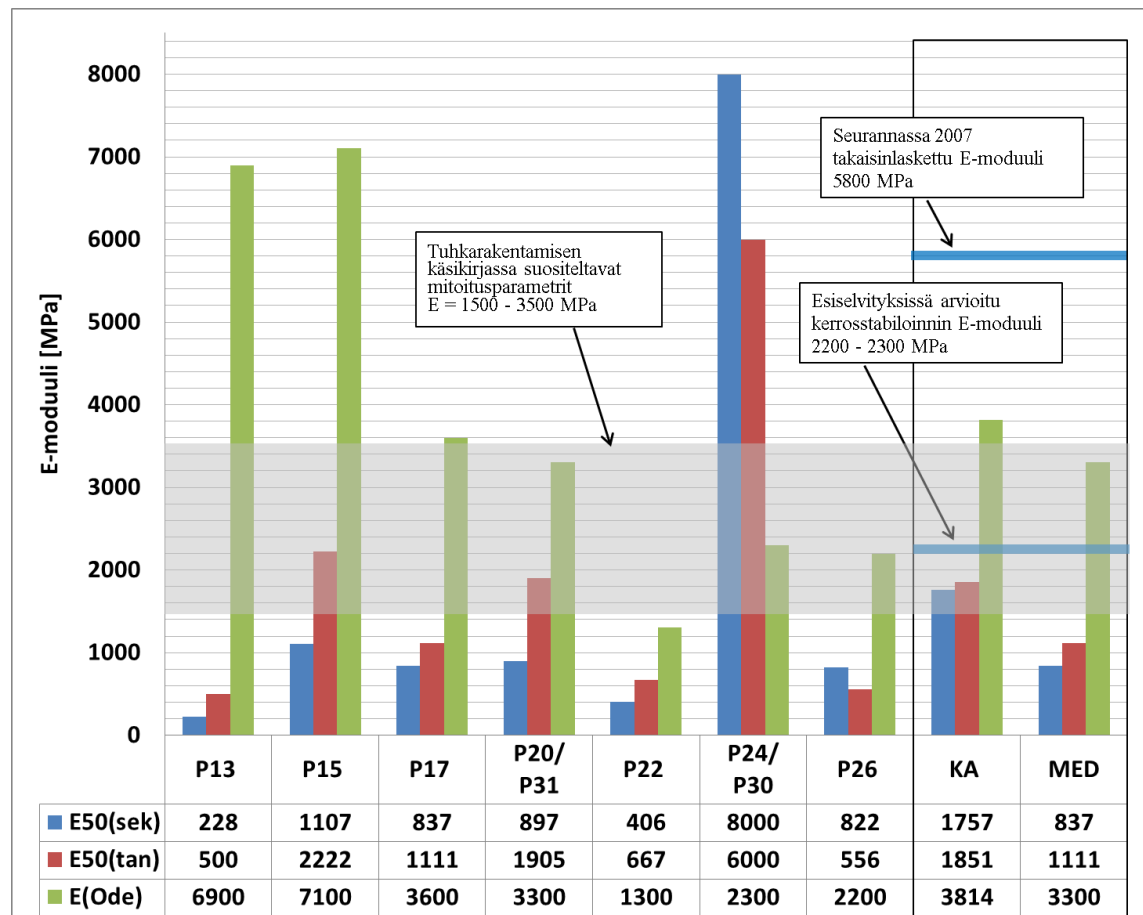
Taulukosta nähdään, että tangenttimoduulit ovat lähes poikkeuksetta suurempia kuin sekanttimoduulit. Tämä voi johtua koemenettelystä ja puristuskoekappaleiden päiden epätasaisuudesta. Näin voidaan olettaa, että tangenttimoduuli kuvaa paremmin materiaalin ominaisuuksia.

Vuosaassa vuonna 2013 tehtyjen kantavuusmittausten tuloksista takaisinlasketaan kerrosstabiloidun kerroksen E-moduuli. Kerrosstabiloinnin alapuolisen rakenteen lähtötietoina on käytetty edellisissä seurantatutkimuksissa käytettyjä arvoja. Sitomattoman murskeen E-moduulin arvona laskennassa käytettiin 300...350 MPa ja hiekan E-moduulin arvona 50 MPa. Jotta puristuskokeista ja kantavuuskokeista saadut moduulit olisivat parhaiten vertailukelpoisia keskenään, käytetään takaisinlaskennassa tutkimuspisteiden ympäristöstä mitattua keskimääräistä kantavuutta. Näin takaisinlaskennassa voidaan käyttää tutkimuspisteessä havainnoitua päällysteen paksuutta. Tutkimuspisteiden sijainti ja kantavuusmittausten tulokset on esitetty kartalla liitteessä 1. Taulukossa 6.4 on esitetty tutkimuspisteet, havainnoidut päällysteen ja stabiloidun kerroksen paksuudet sekä keskimääräinen kantavuus tutkimuspisteen alueella.

Taulukko 6.4. Vuonna 2013 Vuosaassa tehdyistä kantavuusmittauksista takaisinlasketut kerrosstabiloidun tuhkarakenteen E-moduulit

Piste:	Päällysteen paksuus [mm]	Stabiloidun kerroksen paksuus [mm]	Keskimääräinen kantavuus [MPa]	Takaisinlaskettu tuhkarakenteen E-moduuli [MPa]
P13	80	200	824	6900
P15	120	200	953	7100
P17	49	250	712	3600
P20/ P31	49	200	584	3300
P22	46	200	427	1300
P24/ P30	55	200	537	2300
P26	70	250	653	2200
KA	67	214	670	3814
MED	55	200	653	3300

Kuvassa 6.59 on esitetty vuonna 2013 määritettyjen, aikaisemmin takaisinlaskettujen sekä suositeltujen mitoitusparametrien vertailu.



Kuva 6.59. Vuosaaren kerrosstabiloidun kerroksen E-moduulien vertailu

Kuvasta nähdään, että Vuosaaren kerrosstabiloidun kerroksen takaisinlasketut E-moduulit vaihtelet paljon määritystavasta riippuen. Puristuskoekappaleista määritetyt moduulit ovat lähes poikkeuksetta kantavuusmittauksista takaisinlaskettuja moduuleja pienemmät. Poikkeus nähdään pisteessä 24/30, jossa koekappaleen puristuslujuudeksi mitattiin 19,2 MPa. Näin myös puristuskokeesta määritetyt moduulit kohosivat muita korkeammiksi. Kuvasta nähdään myös Vuosaaren kenttärakenteen epähomogeenisuus. Lähekkäisistä pisteistä eri menetelmällä määritetyt moduulit poikkeavat toisistaan suuresti. Odemarkin takaisinlaskentakaavalla määritetyt moduulit ovat keskimäärin suurempia kuin Tuhkarakentamisen käsikirjassa esitetty E-moduulin vaihteluväli ja rakenteelle asetettu tavoitetaso. Keskimääräisesti puristuskokeista määritetyt moduulit ovat lähellä ohjearvoja, mutta määritettyjen arvojen vaihtelu on suurta.

Jämsän kerrosstabiloinnin E-moduulit

Jämsän Kaipolanväylän ja Patajoentien kerrosstabiloidun tuhkarakenteen E-moduulit takaisinlaskettiin puristuskokeiden tuloksista. Laskennan tulos on esitetty taulukossa 6.5.

Taulukko 6.5. Jämsän koekohteiden vuoden 2013 puristuskoetuloksista takaisinlasketut E-moduulit

Piste:	Puristuslujuus [MPa]	E_{50-sek} [MPa]	E_{50-tan} [MPa]
Kaipolanväylä			
PL 900 KL	4,1	186	357
PL 900 R	3,4	207	313
PL 3325 KL	4,2	223	417
PL 3325 R	5,5	241	357
KA	4,3	215	361
MED	4,2	215	357
Patajoentie			
PL 800 KL	4,2	198	313
PL 800 R	3,1	168	313
PL 1500 KL	3,3	173	357
PL 1500 R	2,4	171	250
PL 2150 KL	3,1	323	625
PL 4000 KL	3,5	224	385
PL 4000 R	3,4	133	250
KA	3,3	199	356
MED	3,3	173	313

Taulukosta nähdään, että saaduissa moduularvoissa ei ole suurta vaihtelua. Huomion-arvoista kuitenkin on, että saadut tangenttimoduulit ovat lähes viisi kertaa pienempiä

kuin mitä Tuhkakäsikirjassa on käyttöluokan 1 kerrosstabiloinneille suositeltu käytettäväksi.

Leppävirran kerrosstabiloinnin E-moduulit

Leppävirran koekohteen kerrosstabiloidun tuhkarakenteen E-moduulit takaisinlaskettiin puristuskokeiden tuloksista. Laskennan tulos on esitetty taulukossa 6.6.

Taulukko 6.6. Leppävirran koekohteen vuoden 2013 puristuskoetuloksista takaisinlasketut kerrostabiloidun rakenteen E-moduulit

Piste:	Puristuslujuus [MPa]	E_{50-sek} [MPa]	E_{50-tan} [MPa]
PL 905 KL	10,3	660	3333
PL 905 R	4,6	338	400
KA	7,5	499	1867
MED	7,5	499	1867

Taulukosta nähdään, että kappaleen, jonka puristuslujuus on ollut yli 10 MPa, tangenttimoduuliksi on takaisinlaskennassa saatu yli 3300 MPa. Tuhkakäsikirjassa käyttöluokan 2 kerrosstabiloinneille on esitetty käytettäväksi E-moduulia 3500 MPa ja tällöin materiaalista valmistetun 28 päivän ikäisen kappaleen puristuslujuus tulisi olla yli 5 MPa. Saatujen tulosten perusteella koekappaleen puristuslujuus tulisi olla lähes 10 MPa, jotta saavutetaan Tuhkakäsikirjassa esitetyt moduuliarvot.

6.7.2 Massiivisen lentotuhkakerroksen E-moduuli

Massiivisen lentotuhkarakenteen E-moduuli takaisinlaskettiin Leppävirran koekohteesta saatujen tutkimustulosten perusteella. Leppävirran massiivisen lentotuhkarakenteen materiaalit ja kerrospaksuudet sekä pohjamaan laatu saatiin havainnoitua tien sivuun kaivetusta koekuopasta silmämääräisesti. Tämän havainnoinnin perusteella määritetään tuhkarakenteen E-moduuli Odemarkin laskentakaavan avulla. Puristuskokeiden jännitys-muodonmuutoskuvaajien avulla määritetään E₅₀-moduulit.

Leppävirran massiivituhkarakenteesta porattujen koekappaleiden puristuskoetuloksista määritetyt E₅₀-moduulit on esitetty taulukossa 6.7. Koekappaleet on porattu paaluilta 1270 ja 1630.

Taulukko 6.7. Vuonna 2013 Leppävirran koerakenteesta porattujen koekappaleiden puristuskoe tuloksista määritetyt massiivituhrakenteen E-moduulit

Piste:	E _{50-sek} [MPa]	E _{50-tan} [MPa]
P1270 A	339	667
P1270 B	420	833
P1630	322	714
KA	360	738
MED	339	714

Taulukosta nähdään, että tangenttimoduuli on jokaisessa laskennassa noin kaksinkertainen sekanttimoduuliin nähden. Voidaan olettaa, että tangenttimoduuli kuvaa paremmin materiaalin ominaisuuksia.

Odemarkin takaisinlaskennan lähtötiedot perustuvat paaluilla 1630 ja 1270 tehtyihin rakennetutkimuksiin ja niiden vierestä mitattuihin keskilinjan ja reunan keskimääräisiin kantavuuksiin. Paalulla 1630 pintakerroksen paksuudeksi oletetaan 50 mm, tuhkakerroksen paksuudeksi 200 mm ja jakavan kerroksen paksuudeksi 500 mm. Pohjamaan laaduksi oletetaan kuiva hiekkamoreeni, jonka moduuliksi oletetaan 50 MPa. Paalulla 1270 pintakerroksen paksuudeksi oletetaan 100 mm, tuhkakerroksen paksuudeksi 240 mm, jakavan kerroksen paksuudeksi 400 mm ja suodatinhiekan paksuudeksi 300 mm. Pohjamaan laaduksi oletetaan kuiva savinen siltti, jonka moduuliksi oletetaan 20 MPa. Jakavan kerroksen murskeen moduuliksi oletetaan 150 - 200 MPa ja pintakerroksen murskeen moduuliksi 100 MPa. Suodatinhiekan moduuliksi oletetaan 70 MPa. Nämä arvot perustuvat laskijan oletuksiin. Taulukoissa 6.8 ja 6.9 on esitetty takaisinlaskennat.

Taulukko 6.8. Leppävirran massiivituhrakenteen E-moduulin takaisinlaskenta Odemarkin kaavalla paalulta 1630

Kerros	Tavoite 203 MPa		(E _{max} = 6 × E _A)			
	E _A MPa	h m	E MPa	E _{max} MPa	E _γ MPa	Selitys
1	50	0,15	150	300	71,9	KaM
2	71,9	0,15	150	431	92,2	KaM
3	92,2	0,2	200	553	130,4	KaM
4	130,4	0,2	420	782	216,2	Stab. LT
5	216,2	0,05	100	1297	202,9	Murske
Yhteensä =		0,75	m			
Tuhkarakenteen n =					3,2	
Tuhkarakenteen E=					420 MPa	

Taulukosta nähdään, että takaisinlaskennalla tuhrakenteen E-moduuliksi on saatu 420 MPa. Tulos 420 MPa sijoittuu Tuhkarakentamisen käsikirjassa esitettyjen LT1 ja LT2 käyttöluokkien tuhkien väliin, eli välille 600 – 300 MPa.

Taulukko 6.9. Leppävirran massiivituhrakenteen E-moduulin takaisinlaskenta Ode-markin kaavalla paalulta 1270

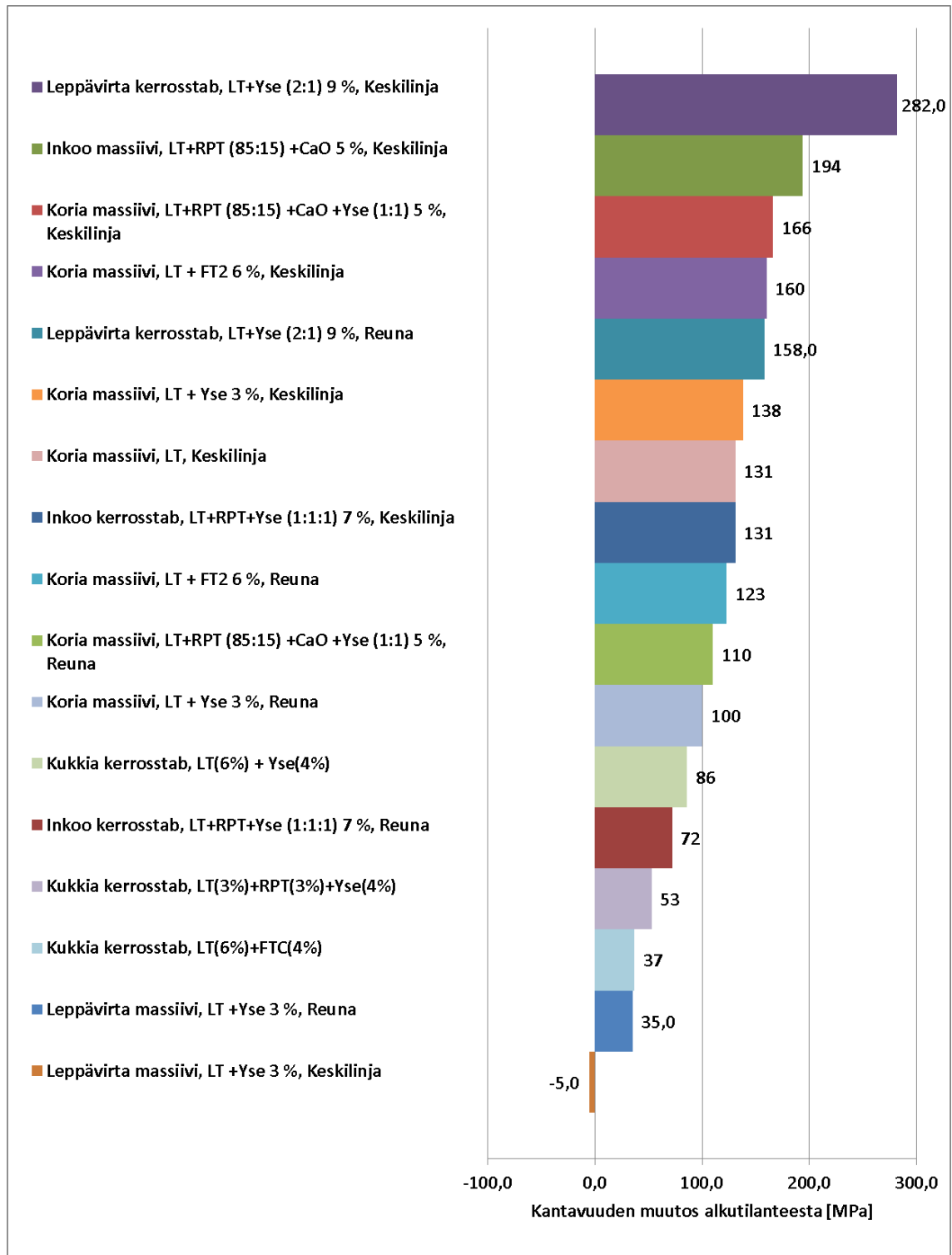
P1270		Tavoite 228 MPa			($E_{max} = 6 \times E_A$)	
Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	35	0,15	70	210	44,3	Hk
2	44,3	0,15	70	266	52,0	Hk
3	52,0	0,2	150	312	82,5	KaM
4	82,5	0,2	200	495	122,1	KaM
5	122,1	0,24	920	733	312,4	Stab. LT
6	312,4	0,1	100	1874	228,0	Murske
Yhteensä =		1,04	m			
Tuhkarakenteen n =					7,5	
Tuhkarakenteen E=					920 MPa	

Taulukosta nähdään, että takaisinlaskennalla massiivituhrakenteen E-moduuliksi on saatu 920 MPa. Tulos on suurempi kuin Tuhkarakentamisen käsikirjassa on massiivituhrakenteiden moduuliksi esitetty. Keskimäärin kantavuusmittausten perusteella takaisinlasketuksi E-moduuliksi saadaan 670 MPa. Tämä arvo on melko lähellä puristuskokeista saatua keskimääräistä tangenttimoduulin arvoa 738 MPa.

6.8 Tulosten yhteenveto

6.8.1 Kantavuudet

Yhteenveto erilaisten lentotuhrakenteiden vaikutuksista vanhojen alempiluokkaisten tierakenteiden kantavuuteen nähdään kuvassa 6.60.



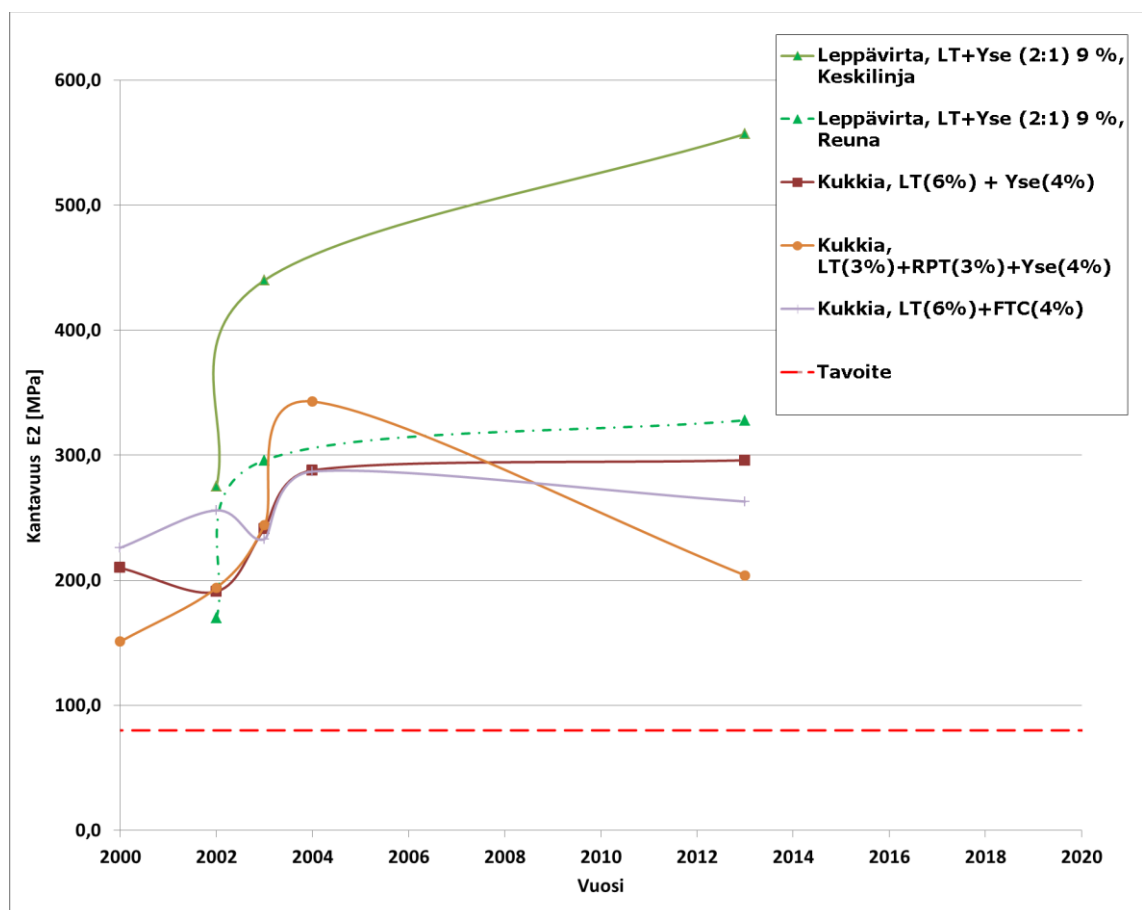
Kuva 6.60. Yhteenveto lentotuhkarakenteiden vaikutuksista vanhojen tierakenteiden kantavuuteen

Kuvasta 6.60 nähdään eri tuhkarakenteiden vaikutukset vanhojen tierakenteiden kantavuuteen. Leppävirran seospolton lentotuhkan ja yleisestintin seoksella kerrosstabioidun kantavan kerroksen keskimääräinen kantavuus on parantunut lähtötilanteesta eniten, mutta samasta tuhkasta tehdyn stabiloitun massiivilentotuhkakerroksen keski-

määräinen kantavuus on palautunut alkutilanteeseen. Kappaleesta 6.5 voidaan kuitenkin lukea, ettei Leppävirran koekohteessa ollut varsinaista kantavuusongelmaa sillä kantavuustavoitteet on saavutettu ja rakenteesta pystyttiin poraamaan näytekappaleet.

Kantavuuksien kehitystä voidaan tarkastella myös aikajanalla, jolloin voidaan arvioida tuhkarakenteiden pitkäaikaistoimivuutta ja kantavuuksien kehitystä. Aikajanakuvaajien tarkastelussa tulee kuitenkin huomioida, että muutamissa kohteissa seurannassa on melko pitkä väli ennen vuoden 2013 tutkimuksia, joten ei ole mahdollista todeta mikä on ollut kehityssuunta muutaman viime vuoden aikana. Tuhkarakenteiden tila on saattanut olla stabiili useamman vuoden ajan ja tällöin kehityssuunnan ennuste olisi erilainen.

Lentotuhkaseoksilla kerrostabiloitujen kantavien kerrosten vaikutusta alempiluokkaisten sorapintaisten teiden kantavuuteen on tarkasteltu Kukkiän ja Leppävirran koekohteissa. Kohteissa käytetyt lentotuhkat olivat puun/seospolton lentotuhkia. Kuvassa 6.61 on esitetty näiden kohteiden kantavuuksien keskiarvojen kehitys rakenteittain.

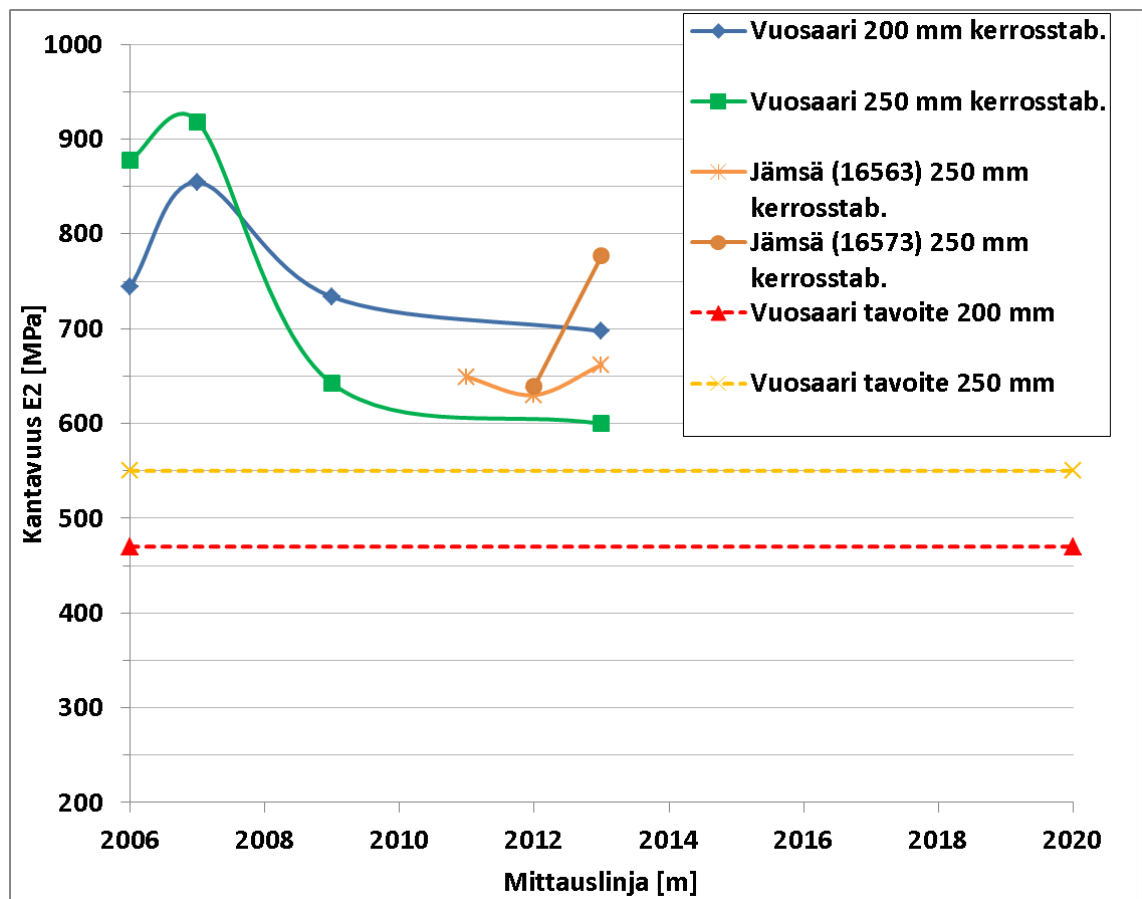


Kuva 6.61. Kerrostabiloitujen alempiluokkaisten sorapintaisten teiden kantavuuksien keskiarvojen kehitys jaoteltuna eri sideaineseoitusten mukaan

Kuvasta nähdään, että seospolton lentotuhkan ja FTC:n seoksella stabiloidun kantavan kerroksen kantavuus on heikentynyt muiden pysyessä noin vuosien 2003 ja 2004 tasoi-

la. Kantavuudet ovat kuitenkin vielä reilusti kuormitusluokan 0,1 tavoitekantavuuden 115 MPa sekä kevätkantavuusvaatimuksen 80 MPa yläpuolella. Seospolton lentotuhkan, rikinpoistonlopputuotteen sekä yleisementin seoksella stabiloidulla rakenteella kantavuusmittausten tulosten kehityssuunta on ollut samansuuntainen, mutta rakennetutkimuksissa tulos oli toinen. Seospolton lentotuhkan ja yleisementin seoksella kantavuudet ovat selvästi lähtötilannetta paremmalla tasolla. Tulosten perusteella voidaan olettaa, että seospolton lentotuhkan ja yleisementin seokset sopivat paremmin alempi-luokkaisten teiden päällysrakenteen kerrosstabilointiin kuin seospolton lentotuhkan ja kalkkilisän seokset.

Kerrosstabiloinnin toimivuutta kantavuusvaatimuksiltaan suurempien liikennealueiden rakenteessa on seurattu Vuosaaren sataman ja Jämsän koekohteissa. Kuvassa 6.62 on esitetty Vuosaaren sataman ja Jämsän koekohteiden kantavuuksien keskiarvojen kehitys.

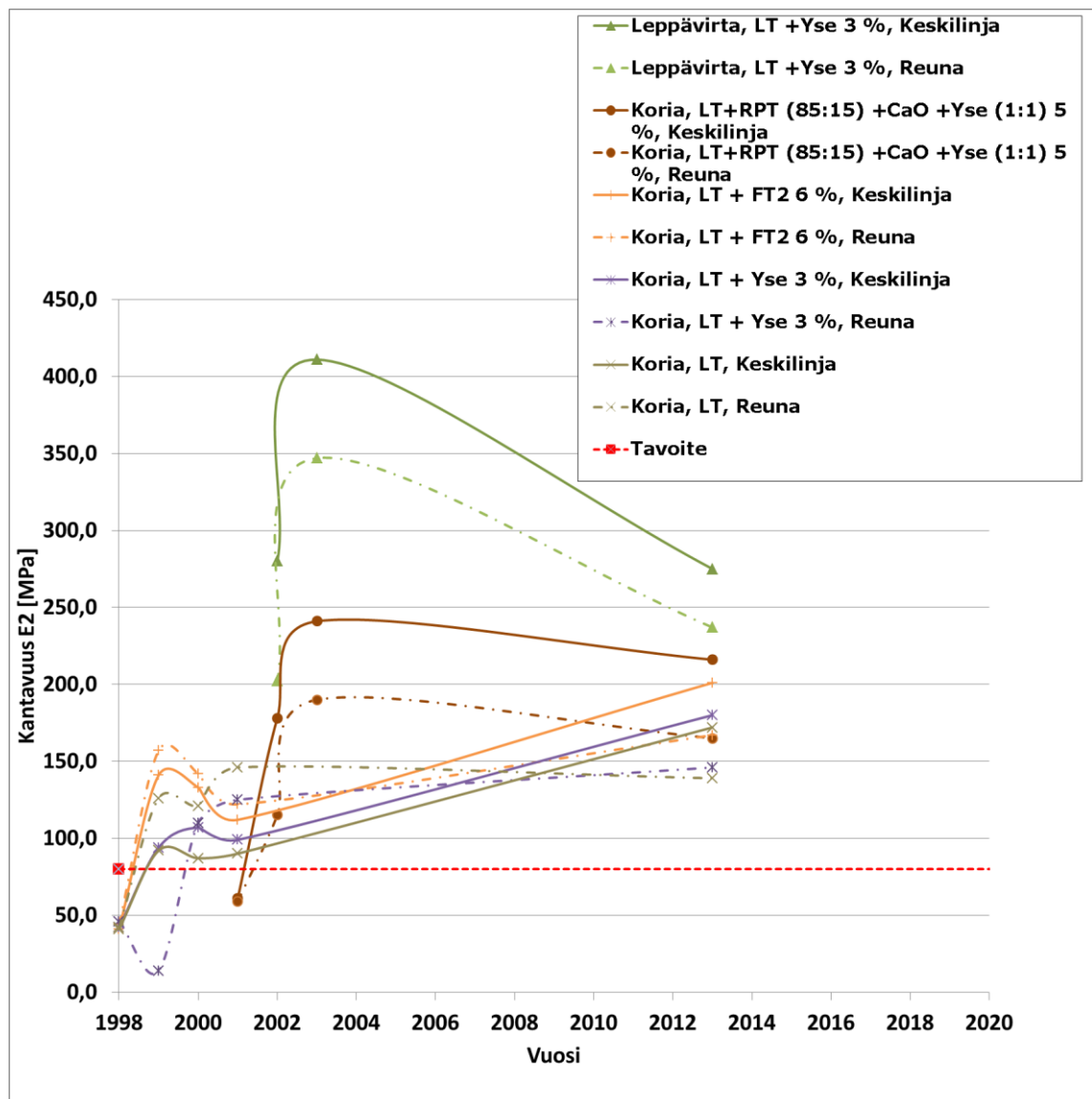


Kuva 6.62. Vuosaaren sataman ja Jämsän koekohteiden kerrosstabilointien kantavuuksien keskiarvojen kehitys

Kuvasta nähdään, että Vuosaaren sataman 250 mm paksuisen stabiloinnin kantavuuden keskiarvon nykytila ja Jämsän koekohteen 16563 kantavuuden keskiarvon nykytila ovat melko lähellä toisiaan. Jämsän koekohteet ovat kuitenkin vielä melko uudet ja niiden kohdalta pitkäaikaista seuranta ei ole vielä tehty.

Vuosaaren sataman ja Jämsän kohteen erona on myös käytetyn lentotuhkan alkuperä. Jämsän kohteessa on käytetty seospolton lentotuhkaa ja yleissementtiä kun taas Vuosaarissa on käytetty kivihiilenpolton lentotuhkaa, RPT:tä, yleissementtiä ja kuonajauhetta. Kuvasta nähdään, että tiellä 16563 käytetyn rakenteen kantavuuden kehitys on tasaisempaa kuin Vuosaaren sataman. Tiellä 16573 on havaittavissa samankaltainen kantavuuksien nousu kuin Vuosaaren rakenteissa. Kantavuuksien kehityksen ero voi mahdollisesti johtua erilaisista kemiallisista reaktioista rakenteissa. Tämän työn puitteissa kerätyn aineiston pohjalta voisi selvittää kohteiden tuhkarakenteissa tapahtuneet kemialliset reaktiot ja päätellä niistä eri sideaineseosten toimivuudet.

Massiivituhkarakenteiden pitkäaikaistoimivuutta alempiluokkaisilla sorapintaisilla teillä on voitu seurata Korian ja Leppävirran kohteissa. Kuvassa 6.63 on esitetty koekohteiden kantavuuksien keskiarvot rakenteittain.



Kuva 6.63. Massiivituhkarakenteisten teiden kantavuuksien keskiarvojen kehitys

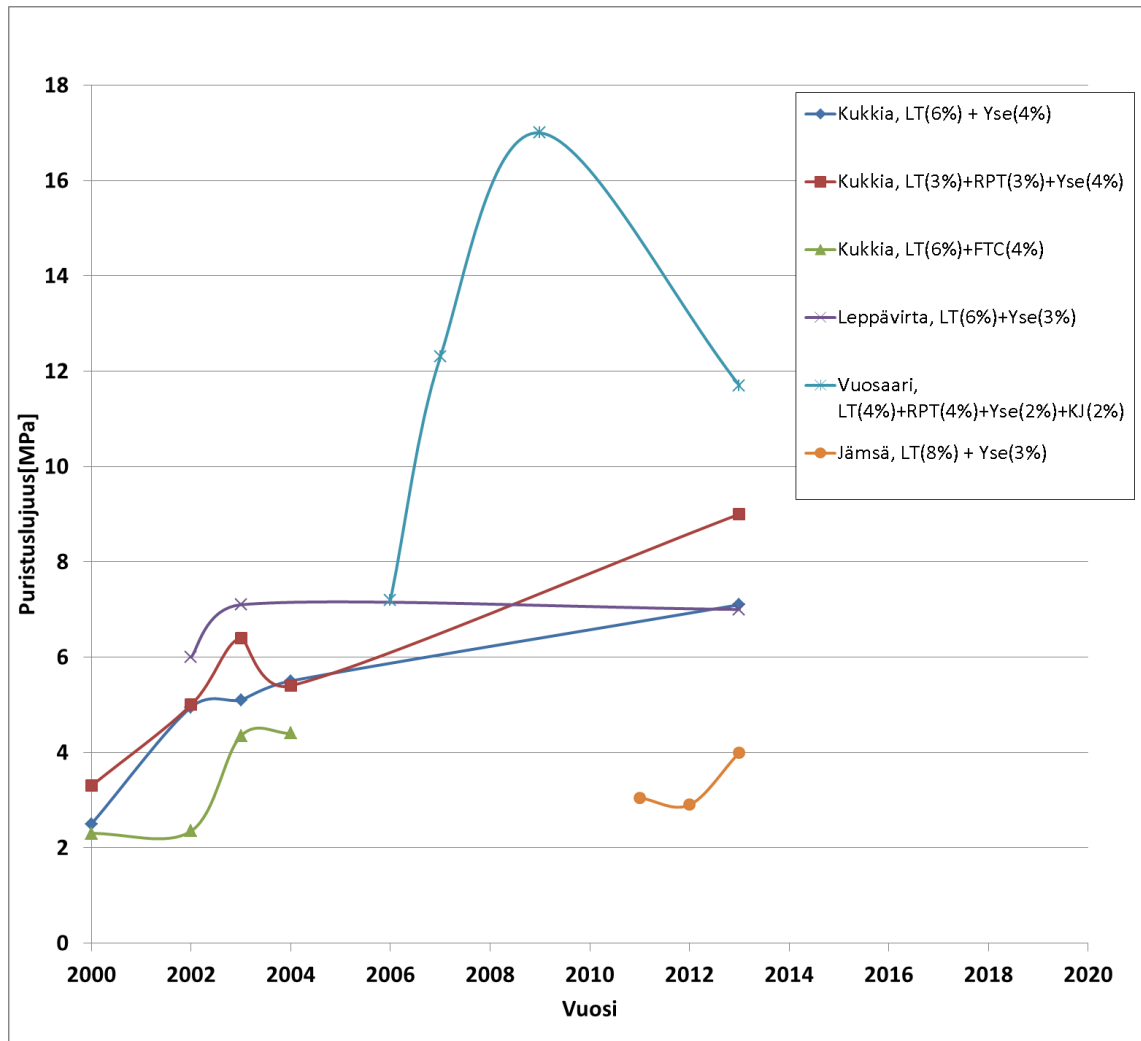
Kuvassa ylimpänä vihreällä kolmiolla merkityt kantavuudet on mitattu Leppävuiran koekohteesta. Kuvasta nähdään, että juuri Leppävuiran kantavuuksien keskiarvoissa on tapahtunut suurin pudotus. Leppävuiran kohteessa vuonna 2003 tehtyjen kantavuusmittausten tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti, sillä Leppävuiran koekohteen keskimääräiset kantavuudet ovat viimeisimmässä mittauksessa lähtötilanteen tasolla. Mikäli vuoden 2003 tulokset jätetään huomiotta, on arvio rakenteen kantavuuden kehityksestä selvästi erisuuntainen. Leppävuiralla kantavuudet olivat jo lähtötilanteessa Korian kohteeseen verrattuna paremmat. Korian massiivituhkarakenteilla kantavuudet ovat pysyneet aikaisempien mittausten tasolla tai parantuneet.

Vertailun arvoisia rakenteita ovat Korian LT + YSe 3% ja Leppävuiran LT + YSe 3%. Molemmista kohteista käytetty lentotuhka oli seospolton/biopolton tuhkaa. Korian kohteesta pohjamaan ominaisuudet olivat heikommat, joka myös lisää tiivistyksen vaikeutta. Koekohteiden rakenteissa on huomattavissa selvä ero sillä Leppävuiran tuhkarakenteen on todettu olevan lujempi.

Massiivituhkarakenteiden toimivuutta asfalttipäällysteen alla on tarkasteltu Inkoon kohteesta ja havaintoja voi lukea kohdasta 6.1.

6.8.2 Puristuslujuudet

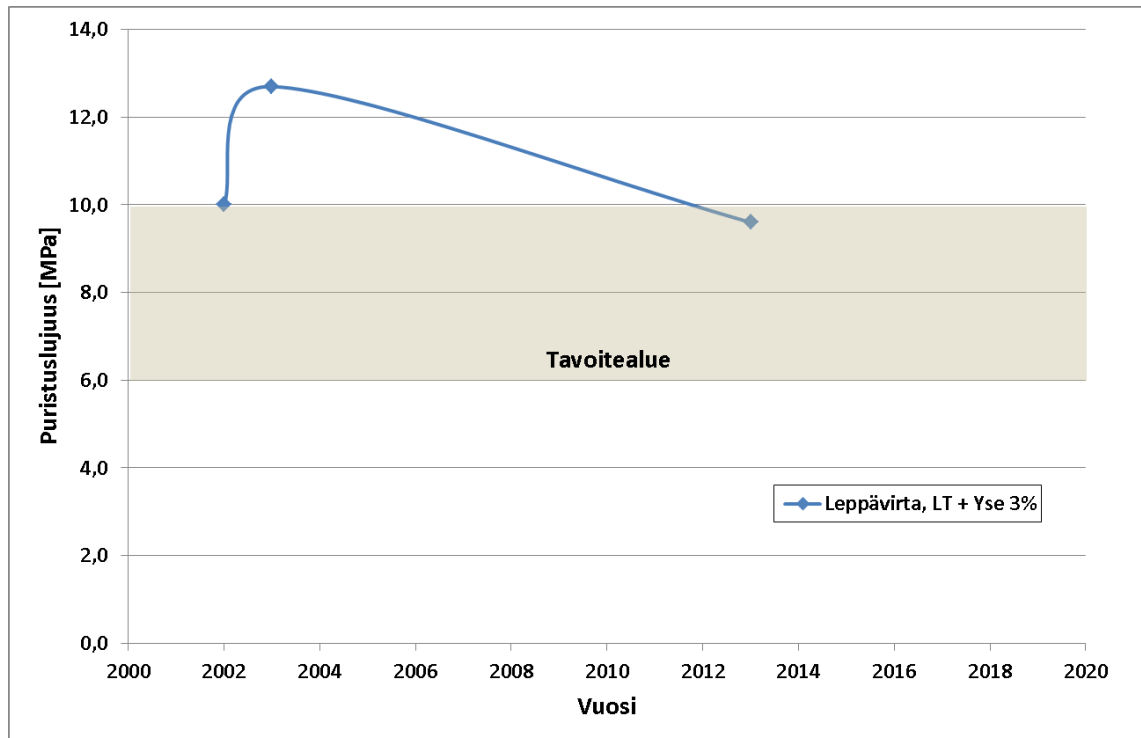
Koekohteiden seurannan yhteenvedona voidaan esittää lentotuhkalla kerrosstabiloiduista rakenteista porattujen koekappaleiden keskimääräisten puristuslujuuksien kehitys rakenteittain. Seurannan tulos on esitetty kuvassa 6.64.



Kuva 6.64. Lentotuhkalla kerrosstabiloiduista rakenteista porattujen koekappaleiden puristuslujuuksien kehitys rakenteittain

Kuvassa nähdään oikeastaan sama kehityssuunta kuin kantavuusmittauksistakin. Vuosaaren kivihiililentotuhkaseoksella kerrosstabiloidun murskeen keskimääräiset puristuslujuudet ovat laskeneet edellisestä mittauksesta. Kuitenkin lähtötilanteeseen verrattuna suunta on nouseva. Muut esitetyt lentotuhkat ovat seospolton tuhkia eri kohteista ja niistä ainoastaan Kukkian lentotuhkan ja FTC-kalkkivalmisteeseen seoksella stabiloidun kerroksen lujuus on oletettavasti heikentynyt, koska rakenteesta ei saatu ehjiä porakappaleita vuonna 2013. Poikkeuksena kantavuusmittausten tulokseen Kukkian LT+RPT+YSe –stabiloinnin puristuslujuudet ovat keskimäärin parantuneet viime vuosista. Tämä saattaa kertoa rakenteen laadun vaihteluista, virheistä kantavuusmittauksissa tai eroista mittaushetkien olosuhteista. Kuvassa ei ole esitetty niitä kohteita, joista ei saatu porattua näytteitä.

Stabiloitujen massiivilentotuhkakerrosten puristuslujuuksien kehitystä pystyttiin seuraamaan Leppävirran koekohteessa. Kuvassa 6.65 on esitetty Leppävirran massiivituhrakenteen puristuslujuuksien kehitys.



Kuva 6.65. Leppävirran massiivituikkakerroksesta porattujen näytekappaleiden puristuslujuuksien kehitys

Kuvasta nähdään, että keskimääräinen lujuus on laskenut hieman edellisistä mittauksista mutta tulos on tavoitealueen yläreunalla. Puristuslujuuksien kehitys ajanjaksolla 2003 – 2013 on samansuuntainen kuin kohteen kantavuuksien kehitys. Tuloksen avulla ei kuitenkaan voida arvioida tuhkarakenteen viimeisen viiden vuoden kehityssuuntaa. Tuhkarakenteen tila on saattanut olla stabiili viimeiset viisi vuotta ja tällöin kehityssuunta olisi kuvaajassa toisenlainen.

6.8.3 Mitoituksen takaisinlaskenta

Puristuskoe tuloksista tehdyissä E-moduulien määrittelyissä Hooken lain perusteella laskettu tangenttimoduuli kuvasi oletettavasti paremmin materiaalin ominaisuuksia kuin laskettu sekanttimoduuli. Odemarkin takaisinlaskennassa ongelmia aiheutti tuhkarakenteen alapuolisten kerrosten arviointi ja parametrien määrittely.

Takaisinlasketut massiivituikkarakenteiden E-moduulit vastasivat keskimäärin Tuhkarakentamisen käsikirjassa esitettyjä moduuliarvoja. Puristuskappaleista saatiin keskimäärin massiivituikkarakenteiden tangenttimoduuliksi 730 MPa ja kantavuusmittauksista 670 MPa. Moduulit määritettiin kuitenkin vain Leppävirran koekohteesta.

Kerrosstabiloitujen rakenteiden takaisinlaskennan tuloksissa oli enemmän vaihtelua. Kerrosstabiloitujen koekappaleiden tangenttimoduuleista oli huomattavissa, että Tuhka-

käsikirjassa suositeltuja moduuliarvoja 3500 – 1500 MPa saatiin koekappaleista joiden puristuslujuus oli yli 10 MPa. Alhaisemmissa lujuuksissa moduuli jäi alhaisemmaksi. Odemarkin kaavalla määritetyt moduulit olivat Tuhkakäsikirjan mukaiset. Takaisinlasketut E-moduulit ovat tekijän oletuksia, koska laskennassa jouduttiin tekemään oletuksia tuhkarakenteen alapuolisista rakenteista.

Routamitoituksen takaisinlaskentaa ei tehty, koska kenttätutkimuksissa ei kerätty aineistoa tierakenteiden routanousuista tai roudan tunkeutumisesta rakenteeseen.

7 LOPPUPÄÄTELMÄT

Työssä tutkittiin seospolton ja kivihiilenpolton lentotuhkien toimivuutta tie- ja kenttärakenteissa. Tehtyjen seurantalutkimusten perusteella voidaan todeta, että lentotuhkarakenteilla on ollut myönteinen vaikutus tutkittujen rakenteiden toimivuuteen. Koekohteissa lentotuhkarakenteiden avulla on voitu korvata perinteisiä murskerakenteita ilman, että on jouduttu tinkimään tien palvelutasosta ja lentotuhkarakenteiden avulla on pystytty parantamaan tierakenteiden kantavuuksia. Näin koekohteissa on päästy tavoitteisiin, joita tuhkarakenteille on asetettu. Eri lentotuhkarakenneratkaisujen toimivuudessa ja säilyvyydessä on kuitenkin havaittu eroja. Työssä saatujen kantavuus- ja puristuslujuustulosten perusteella voidaan arvioida lentotuhkarakenteiden pitkäaikaistoimivuutta, mutta tulkinnassa tulee kuitenkin huomioida, että osassa kohteista seurantalutkimusten välissä on melko pitkä tutkimaton ajanjakso ja tuhkarakenteiden tila on saattanut olla stabiili jo useamman vuoden ajan.

Noin kymmenen vuoden koekäytön jälkeen tuhkarakenteisten teiden kantavuudet ovat pääsääntöisesti pysyneet alkutilannetta paremmalla tasolla, joskin kantavuuksissa on ollut myös suuria vaihteluja. Kantavuuksien vaihteluun voi löytyä monia syitä. Tutkimuksessa havaittiin useita tekijöitä, jotka tulee huomioida tuhkarakentamisessa.

Kuntokartoituksissa havaittiin, että teiden kuivatuksen tärkeyttä ei voida unohtaa. Reunaojien ja rumpujen kunnostuksen sekä reunapalteiden poiston vaikutus tierakenteen toimivuuteen on huomattava. Kuivatuksen toiminta vaikuttaa lentotuhkarakenteiden toimintaan kuten myös perinteisten murskerakenteiden toimintaan. Tien pinnalla maakaavan veden tai pohjarakenteesta nousevan veden on todettu vaurioittavan tuhkarakenteita ja heikentävän niiden toimivuutta. Lentotuhkarakenteisten alempiluokkaisten teiden päällysteen valinnassa ja ylläpidossa tulee huomioida tuhkerroksen pintakerrosta kuivattava vaikutus. Sorapintauksen tulee olla kosteutta sitova, jotta se pysyy paremmin tiessä eikä pölyä. Teiden kunnossapitäjän tulee olla tietoinen tuhkarakenteesta ja kohteen vaatimasta oikeanlaisesta ylläpidosta.

Lentotuhkarakenteen toimivuuden kannalta pohjamaan ja alusrakenteen ominaisuuksilla on merkitystä. Tutkimuksen mukaan heikoilla pohjamailla tuhkarakenteen lujuus oli myös heikko. Heikko pohjamaa toki lisää tuhkarakenteen kuormitusta, mutta heikko pohjamaan kantavuus vaikeuttaa myös tuhkerroksen tiivistystä ja näin tuhkerroksen lujuuskehitys heikkenee. Alempiluokkaisilla teillä vanhan tierakenteen laatu ja pohjaolosuhteet vaihtelevat usein runsaasti. Vanha rakenne on usein myös tien poikkisuun-

nassa eri paksuinen, siten että reunoilla vanha rakenne on selvästi ohuempi. Tämä asettaa haasteita tuhkarakenteen toimivuudelle ja aiheuttaa suurta vaihtelua rakenteen päältä mitattuun kantavuuteen.

Tuhkarakenteet ovat rakentamisolosuhteiden kannalta perinteistä murskerakennetta vaativammat. Useissa koekohteissa rakentamisajankohta oli melko myöhäisellä syksyllä ja sateet häiritsivät monessa kohteessa rakentamista. Sateiden vuoksi tuhkarakenteen optimivesipitoisuus voi ylittyä sekä tiivistyspohja pehmentyä ja rakenne ei välttämättä tiivisty riittävästi. Rakenteesta tulee huokoinen ja sen lujuus heikkenee. Rakentamisaikainen lämpötila on myös tärkeä huomioida rakentamisessa. Alhainen lämpötila hidastaa lujuuden kehittymistä. Lentotuhkarakenteet olisi parasta tehdä aikaisemmin kevät- ja kesäkuukausien aikana, jotta välttyttäisiin sateiden aiheuttamilta haitoilta ja tuhkarakenne ehtisi lujittua kesän aikana riittävästi ennen seuraavan talven routakuormitusta ja kevään kelirikkoa.

Tuhkarakenteiden rakentamisessa on oleellista oikean vesipitoisuuden ja lämpötilan lisäksi myös sideainesten onnistunut sekoitus sekä tiivistys. Epätasaiset kantavuudet samassa koekohteessa voidaan pyrkiä selittämään vaihtelevalla rakentamisen laadulla. Aukoton laaduntarkkailu ja valvonta ovat tärkeitä tekijöitä rakentamisessa. Myös laadunvalvonnan hyvä dokumentointi ja poikkeuksien kirjaus on seurannan ja poikkeuksien vaikutusten arvioinnin kannalta tärkeää.

Tuhkarakenteiden laatuvaihteluihin saattavat vaikuttaa myös käytetyn lentotuhkan laatu vaihtelut. Lentotuhkan ominaisuudet vaihtelevat tuotantolaitoksittain käytetyn polttoaineen ja polttoprosessin mukaan. Lentotuhkan varastoinnilla on myös erittäin suuri vaikutus sen reaktiivisuuteen ja näin myös lentotuhkarakenteen lujuuskehitykseen.

Työssä ei varsinaisesti tutkittu tuhkarakenteiden kemiallista pitkäaikaistoimivuutta mutta se on kuitenkin suuresti tuhkarakenteiden toimivuuteen vaikuttava tekijä. Työssä havaittiin, että eri sideaineseokset toimivat samassa koekohteessa eri tavalla. Ulkoiset kuormitustekijät voivat toki vaihdella kohteessa, mutta työssä havaittiin myös selviä vaihteluja eri lentotuhka-sideaine –seosten toiminnassa. Kivihiilenpolton ja seos/biopolton lentotuhkien tekniset ja kemialliset erovaisuudet johtavat siihen, että ne reagoivat eri tavalla eri sideaineseosten kanssa muodostaen eri tavoin käyttäytyvää rakennetta. Työssä havaittiin, että seospolton lentotuhkan ja kalkkilisän käyttö stabiloinnin sideaineena ei muodostanut seospolton lentotuhkan ja yleisestimen vertaista rakennetta. Työssä ei kuitenkaan tutkittu näytekappaleiden rakennetta tarkemmin, joten se olisi erittäin hyvä jatkotutkimuskohde.

Tuhkarakenteiden suunnittelusta voidaan todeta, ettei suuri kantavuus ja suuri stabiloidun kerroksen jäykkyys takaa rakenteen toimivuutta. Teoriasta tiedetään, että kuormitus laattamaisen rakenteen päällä muodostaa sen alapintaan vetojännityksen. Näin

saattaa tapahtua myös stabiloitujen tuhkarakenteiden kohdalla, mikäli ne sijoitetaan päällysrakenteen ylimpiin kerroksiin. Tutkimuksessa ei testattu tuhkarakenteiden vetolujuutta, mutta tunnetusti ne kestävät heikosti vetojännitystä. Tuhkarakenteiden suunnittelussa voisi olla hyvä käyttää mitoitustapaa, joka huomioi rakenteeseen aiheutuvat vaakasuorat jännitykset. Näin rakenne voitaisiin suunnitella siten, ettei tuhkarakenteeseen muodostu vetoa. Lentotuhkarakenteiden analyttistä mitoitusta tulisi siis kehittää.

Työstä voidaan havaita, että lentotuhkarakenteiden pitkäaikaistoimivuuteen vaikuttaa erittäin monet tekijät. Osaavan suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon kautta lentotuhka on tie- ja kenttärakenteisiin sopiva materiaali. Tutkimuksen ja käyttökokemusten avulla pystytään tätä osaamista kehittämään. Lentotuhkarakenteiden rakentamista ja jo rakennettujen kohteiden seuranta tulee jatkaa ja varmasti tämänkin työn puitteissa seurattuja rakenteita on mielenkiintoista tutkia muutaman vuoden kuluttua.

LÄHTEET

Ahlqvist, E. 2000. Teollisuuden sivutuotteiden käyttö tierakenteissa, Rakentaminen Pt 11146 Inko. SCC Viatek Oy / SGT, Luopioinen. 40 s.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT tiedotteita 2045. Espoo, VTT. 172 s.

Belt, J. Lämsä, V P, Savolainen, M. Ehrola, E. 2002. Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto, Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Helsinki, Tiehallinto. 72 s.

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki, Rakennustieto Oy. 365 s.

Finncao. 2005. Metsäteollisuuden lentotuhkien käyttö tie-, katu- ja kenttärakenteissa, Suunnittelu- ja mitoitusohje. Finncao Oy. 22s.

Finnlex. 2000. Ympäristönsuojelulaki.
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000086> [viitattu 18.9.2013]

Finnlex. 2006. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060591> [viitattu 18.9.2013]

Finnlex. 2009. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa annetun valtioneuvoston asetuksen liitteiden muuttamisesta.
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090403> [Viitattu 18.9.2013]

Finnlex. 2010. Jäteverolaki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101126>
[viitattu 18.10.2013]

Finnlex. 2011. Jätelaki. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>
[viitattu 18.9.2013]

Fortum Power and Heat Oy. 2013. Tuoteseloste, Kivihiihen lentotuhka / Naantalin voimalaitos. Espoo, Fortum Power and Heat Oy. 2 s.

Hakari, M. 2007. Sivutuotteiden maarakennuskäytön ohjeistus – Betonimurske ja pääkaupunkiseudun kivihiihituhkat, Diplomityö. Espoo, Teknillinen Korkeakoulu. 195 s.

Isännäinen, S. Huotari, H. & Mursunen, H. 1997. Lentotuhkan itsekovetus, Tutkimusselostus ENE23/T0032/97. Helsinki, Metsäteho Oy. 17 s.

Janz, M. & Johansson, S-E. 2002. The Funktion of Different Binding Agents in Deep Stabilization. Linköping, Sweden: Swedish Deep Stabilization Research Center. 47 s. Report 9 English Translation.

Jyrävä, H. & Haavikko, H. 1999. Soratien parantaminen, koerakentaminen pt 14567, Korja. Viatek Oy / SGT, Luopioinen. 46 s.

Jyrävä, H. & Jokinen, T. 2001. Teollisuuden sivutuotteiden käyttö tierakenteissa, Uudenmaan pilot-hanke, Laboratoriotutkimukset, tekniset ominaisuudet. SCC Viatek Oy SGT, Luopioinen. 31 s.

Jyrävä, H. Diplomi-insinööri, projektipäällikkö, Ramboll Finland Oy. Haastattelut/arkistomateriaalit 2013.

Kari, S. 2005. Kivihiilen ja puun poltossa syntyvät lentotuhkat tierakenteiden materiaaleina. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. 153 s.

Kiviniemi, O. 2010. Keski-Suomen UUMA Jämsän rakentamiskohteet 2010, Työraportti 30.11.2010. Keski-Suomen ELY-keskus, Ramboll Finland Oy. 23 s.

Kiviniemi, O. 2011. Keski-Suomen UUMA seurantatutkimukset 2011, Seurantatutkimusraportti 11.8.2011. Keski-Suomen ELY-keskus, Ramboll Finland Oy. 15 s.

Kiviniemi, O. 2012. Keski-Suomen UUMA seurantatutkimukset 2012, Seurantatutkimusraportti 28.6.2012. Keski-Suomen ELY-keskus, Ramboll Finland Oy. 16 s.

Kiuru, R. 2013. Sales manager, BY-products and electricity taxation. Fortum Oyj, Fortum Heat. Haastattelu 15.10.2013.

Kohtamäki, T. 1995. Teollisuusjätteiden käyttö maarakentamisessa satakunnan alueella. Licensiaatintutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 161 s.

Korpijärvi, K. Mroueh, U-M. Merta, E. Laine-Ylijoki, J. Kivikoski, H. Järvelä, E. Wahlstöm, M. & Mäkelä, E. 2009. Energiatuotannon tuhkien jalostaminen maarakentamiskäyttöön, VTT tiedotteita 2499. Helsinki, Edita Prima Oy. 75 s.

Lahtinen, P. 2001. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads, Finnra Reports 70/2001. Helsinki, Tiehallinto. 95 s.

Laki ympäristönsuojelulain muuttamisesta. 2011.

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110647> [viitattu 18.9.2013]

Liikennevirasto. 2012. Tien geotekninen suunnittelu, liikenneviraston ohjeita 10/2012. Helsinki, Liikennevirasto. 40 s.

Liikennevirasto. 2013. Tietilasto 2012. www.liikennevirasto.fi/tilastot.

Mäkelä, H. Höynälä, H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakentamisessa, materiaalit ja käyttökohteet. Teknologia katsaus 91/2000. Helsinki, Tekes. 97 s.

Mäkinen, A. Ronkainen, M. 2013. Keski-Suomen UUMA seuranta tutkimukset 2013, Seuranta tutkimusraportti 4.7.2013. Keski-Suomen ELY-keskus, Ramboll Finland Oy. 7 s.

Ojala, E. 2010. Selvitys puu- ja turvetuhkan lannoite- sekä muusta hyötykäytöstä. Energiatieteellisyys & Motiva. 47 s.

Outinen, H. Salmi, T. 2004. Lujusopin perusteet. Tampere, Pressus Oy. 464 s.

Pesonen, J. 2012. Oulun biotuhkien fraktiointi, kemialliset ominaisuudet ja hyötykäyttöpotentiaali, Pro gradu –tutkielma. Oulu, Oulun yliopisto. 132 s.

Brinkgreve, R. Engin, E. & Swolfs, W. 2012. Plaxis 2D 2012. An Delft, Netherlands, Plaxis bv. 14 s.

Ramboll Finland Oy. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja, Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakentamisessa. Verkkojulkaisu, pdf 13.1.2012. 65 s.

Rantamäki, M. Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 2008. Geotekniikka. 21., muuttumaton painos. Helsinki, Otatieto. 307 s.

Ronkainen, M. Sikiö, J. Ahlqvist, E. 2006. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysrakenteet, Koerakentamisraportti. Ramboll Finland Oy, Luopioinen. 19 s.

Ronkainen, M. Sikiö, J. 2007 a. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysrakenteet, Päällysrakennekoe II. Ramboll Finland Oy, Luopioinen. 23 s.

Ronkainen, M. Sikiö, J. 2007 b. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysrakenteet, Jatkotutkimukset. Ramboll Finland Oy, Luopioinen. 5 s.

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

Ronkainen, M. Virtanen, Noora. 2006. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysrakenteet, Materiaalitutkimukset laboratoriossa joulou-toukokuu 2006. Ramboll Finland Oy, Luopioinen. 8 s.

Ronkainen, M. Diplomi-insinööri, projektipäällikkö, Ramboll Finland Oy. Haastattelut/arkistomateriaalit 2013.

ROTI 2013. 2013. Rakennetun Omaisuuden tila 2013. Helsinki. 50 s. <http://www.roti.fi/>

Rudus Oy. 2008. Pohjatuhkaohje, käyttöohje rakentamiseen ja suunnitteluun. Helsinki. 11 s.

SFS ry. 2008. SFS-Käsikirja 172-2, Geotekninen tutkimus ja koestus, osa 2: Maan laboratoriokokeet. Helsinki. 216 s.

Spoof, Harri. Petäjä, Sami. 2000. Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus). Espoo. VTT Yhdyskuntatekniikka. 17 s.

Tiehallinto. 2004. Tierakenteen suunnittelu (TIEH 2100029-04). Helsinki, Edita Prima Oy. 69 s.

Tiehallinto. 2004 b. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004, Deformaation hallinta tien rakenekerroksissa. Helsinki, Tiehallinto.

Tiehallinto. 2005. Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D, Tien päällysrakenteen mitoituksessa käytettävät moduulit ja kestävyysmallit. Tiehallinto

Tiehallinto. 2007. Päällysrakenteen stabilointi. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki, Tiehallinto. 53 s.

Tilastokeskus. 2013. Julkaisu 20.6.2013 Kotimaista energiaa korvattiin tuontienergialla. http://www.stat.fi/til/ehk/2013/01/ehk_2013_01_2013-06-20_tie_001_fi.html. Luettu 6.8.2013

Valtonen, J. 1996. Lentotuhkan lujittuminen kasiiumsilikaattihydraattia muodostamalla, Diplomityö. Oulu, Oulun Yliopisto. 57 s.

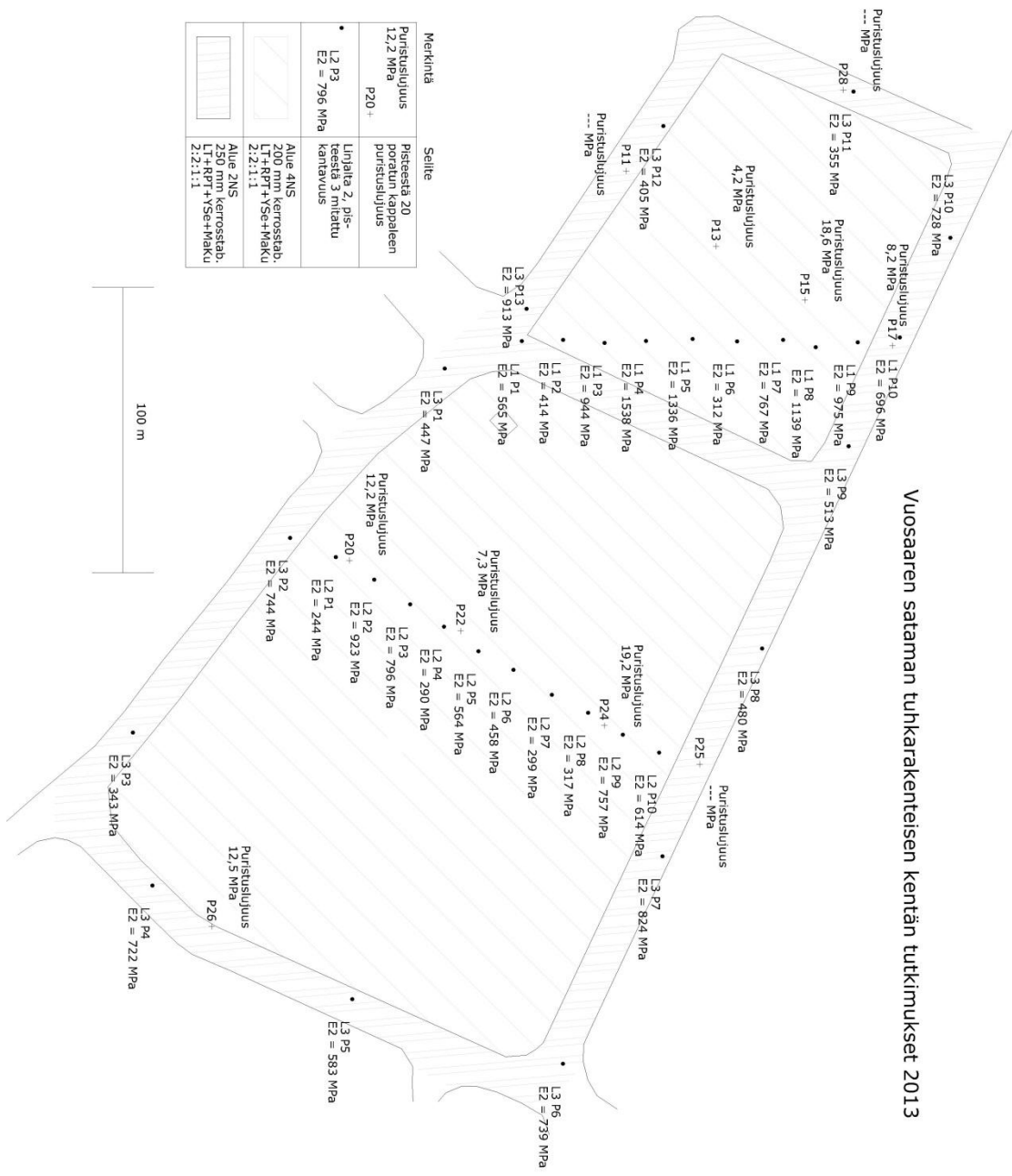
Viirola, H. & Raivio, P. 2000. Portlandsementin hydrataatio, VTT tiedotteita 2041. Espoo, Otamedia Oy. 65 s.

Wigren, V. 2014. R&D Engineer, M.Sc. Ekolite Oy. Haastattelu 29.6.2014.

Ympäristönsuojelulaki. 2000. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000086> [viitattu 18.9.2013]

Österbacka, J. Renotech Oy. 2001. Esikäsittelyn vaikutuksesta puu- ja turvetuhkien ominaisuuksiin ja ravinteiden liukenemiseen, Metsätehon raportti 109. Helsinki, Metsäteho Oy.

LIITE 1: VUOSAAREN SATAMAKENTÄN TUTKIMUSKARTTA



LIITE 2: VUOSAAREN SATAMAKENTÄN TUHKARAKENTEEN E-MODUULIN TAKAISINLASKENTA

TIERAKENTEEN MITOITUS ODEMARKIN MENETELMÄLLÄ

Mitoitusyhtälö:

$$E_Y = \frac{E_A}{(1 - 1 / \sqrt{1+0,81(h/0,15m)^2}) * E_A/E + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81(h/0,15m)^2} * (E/E_A)^{2/3}})}$$

Mitoitus tapahtuu syöttämällä mitoitettavalle kerrokselle

seuraavat arvot sinisiin ruutuihin:

E_A	mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus
h	mitoitettavan kerroksen paksuus
E	mitoitettavassa kerroksessa käytettävän materiaalin E-moduuli
	E-moduulin tulee olla pienempi kuin E_{max} (=6 x E)

Kohde: Vuosaaren satama, stabiloidun kerroksen moduulien takaisinlaskenta

Rakenne:

Paalulukku:

Muuta:

pvm:

19.6.2014

Tekijä: Timo Tarkkio

Huom:

P13		Tavoite 824 MPa					($E_{max} = 6 \times E_A$)
Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	
1	50	0,2	50	300	50,0	Hk	
2	50,0	0,2	50	300	50,0	Hk	
3	50,0	0,15	50	300	50,0	Hk	
4	50,0	0,15	300	300	88,6	KaM	
5	88,6	0,15	350	531	138,4	KaM	
6	138,4	0,1	350	830	166,6	KaM	
7	166,6	0,2	6900	1000	686,1	Stab. KaM	
8	686,1	0,08	2500	4117	825,3	Asfaltti	
Yhteensä =		1,23	m				
			Tuhkarakenteen				
			E=		6900 MPa		

P15 Tavoite 954 MPa						($E_{max} = 6 \times E_A$)
Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	50	0,2	50	300	50,0	Hk
2	50,0	0,2	50	300	50,0	Hk
3	50,0	0,15	50	300	50,0	Hk
4	50,0	0,15	300	300	88,6	KaM
5	88,6	0,15	350	531	138,4	KaM
6	138,4	0,1	350	830	166,6	KaM
7	166,6	0,2	7100	1000	692,8	KaM
8	692,8	0,12	2500	4157	957,7	Asfaltti
Yhteensä =		1,27	m			
			Tuhkarakenteen			
			E=	7100 MPa		

P17 Tavoite 712 MPa						($E_{max} = 6 \times E_A$)
Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	50	0,2	50	300	50,0	Hk
2	50,0	0,2	50	300	50,0	Hk
3	50,0	0,1	50	300	50,0	Hk
4	50,0	0,15	300	300	88,6	KaM
5	88,6	0,15	350	531	138,4	KaM
6	138,4	0,1	350	830	166,6	KaM
7	166,6	0,25	3600	1000	657,6	KaM
8	657,6	0,049	2500	3946	715,1	Asfaltti
Yhteensä =		1,199	m			
			Tuhkarakenteen			
			E=	3600 MPa		

P20/P31 Tavoite 584 MPa						($E_{max} = 6 \times E_A$)
Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	50	0,2	50	300	50,0	Hk
2	50,0	0,2	50	300	50,0	Hk
3	50,0	0,15	50	300	50,0	Hk
4	50,0	0,15	300	300	88,6	KaM
5	88,6	0,15	350	531	138,4	KaM
6	138,4	0,1	350	830	166,6	KaM
7	166,6	0,2	3300	1000	533,2	KaM
8	533,2	0,049	2500	3199	588,6	Asfaltti
Yhteensä =		1,199	m			
			Tuhkarakenteen			
			E=	3300 MPa		

P22 Tavoite 427 MPa							($E_{max} = 6 \times E_A$)
Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	
1	50	0,2	50	300	50,0	Hk	
2	50,0	0,2	50	300	50,0	Hk	
3	50,0	0,15	50	300	50,0	Hk	
4	50,0	0,15	300	300	88,6	KaM	
5	88,6	0,15	350	531	138,4	KaM	
6	138,4	0,1	350	830	166,6	KaM	
7	166,6	0,2	1300	1000	384,4	KaM	
8	384,4	0,046	2500	2306	429,7	Asfaltti	
Yhteensä =		1,196	m				
				Tuhkarakenteen			
				E=	1300 MPa		
P24/P30 Tavoite 537 MPa							($E_{max} = 6 \times E_A$)
Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	
1	50	0,2	50	300	50,0	Hk	
2	50,0	0,2	50	300	50,0	Hk	
3	50,0	0,15	50	300	50,0	Hk	
4	50,0	0,15	300	300	88,6	KaM	
5	88,6	0,15	350	531	138,4	KaM	
6	138,4	0,1	350	830	166,6	KaM	
7	166,6	0,2	2300	1000	470,4	KaM	
8	470,4	0,055	2500	2823	537,0	Asfaltti	
Yhteensä =		1,205	m				
				Tuhkarakenteen			
				E=	2300 MPa		
P26 Tavoite 653 MPa							($E_{max} = 6 \times E_A$)
Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	
1	50	0,2	50	300	50,0	Hk	
2	50,0	0,2	50	300	50,0	Hk	
3	50,0	0,1	50	300	50,0	Hk	
4	50,0	0,15	300	300	88,6	KaM	
5	88,6	0,15	350	531	138,4	KaM	
6	138,4	0,1	350	830	166,6	KaM	
7	166,6	0,25	2200	1000	546,0	KaM	
8	546,0	0,07	2500	3276	652,1	Asfaltti	
Yhteensä =		1,22	m				
				Tuhkarakenteen			
				E=	2200 MPa		