



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**UUSIOMATERIAALIT PÄÄLLYSTETTYJEN
TEIDEN KANTAVAN KERROKSEN
STABILOINNISSA**

Ilari Harju

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Lokakuu 2017



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**UUSIOMATERIAALIT PÄÄLLYSTETTYJEN
TEIDEN KANTAVAN KERROKSEN
STABILOINNISSA**

Ilari Harju

Työn valvoja: Anne Tuomela

Ohjaajat: Taavi Dettenborn ja Harri Jyrävä

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Lokakuu 2017

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö)			
Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Tekijä		Työn ohjaaja yliopistolla	
Harju, Ilari		Tuomela, A, yliopisto-opettaja	
Työn nimi			
Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa			
Opintosuunta	Työn laji	Aika	Sivumäärä
Vesi- ja yhdyskuntatekniikka	Diplomityö	Lokakuu 2017	94 s., 8 liitettä
Tiivistelmä			
<p>Uusiomateriaalien ja teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämistä tien päällysrakenteen stabiloinnissa sementtiä korvaavana sideaineena on tutkittu sorateiden kantavuuden parantamisessa jo 1970-luvulta saakka. Sittenkin kasvaneet liikennemäärät ja perusväylänpidon pienentynyt rahoitus ovat kiihdyttäneet tarvetta elinkaari-kustannuksiltaan edullisten päällysrakennetekniikoiden kehittämiseksi myös asfalttipäällysteisten teiden osalta. Uusiomateriaalisideaineseoksilla stabiloituja kantavan kerroksen sisältämiä koerakenteita on toteutettu päällystetyille tieverkolle 2000-luvun alussa eri puolilla Suomea. Koerakenteiden stabiloinnin sideaineseoksessa hyödynnettyjä teollisuuden sivutuotteita ovat olleet lentotuhka, kipsi, rikinpoiston lopputuote ja jauhettu masuunikuona.</p> <p>Tässä diplomityössä on tutkittu päällystetyille tieverkolle rakennettujen uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämien päällysrakenteiden pitkäaikaistoimivuutta ja rakennetekniikan soveltuvuutta Suomen liikenne-, ilmasto- ja pohjamaaolosuhteisiin. Työn tavoitteena oli selvittää kriittisimmät tekijät rakenteen suunnittelun, rakentamisen ja olosuhteiden kannalta, jotka vaikuttavat uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämien päällysrakenteiden laatuun ja elinkaareen. Diplomityö koostuu päällysrakenteen stabilointia koskevasta kirjallisuuskatselmuksesta sekä tutkimusosasta, jossa tutkittiin viiden eri koerakennuskohteen pitkäaikaistoimivuutta ja erityispiirteitä. Työn tutkimusmenetelminä käytettiin rakennäytteenottoa, vaurioinventointia sekä Liikennviraston kuntorekisteristä saatujen PTM- ja pudotuspainolaitemittausten analysointia. Analysoitua kuntorekisteriainestoa verrattiin vaihtoehtoisten rakennetekniikoiden käyttäytymiseen. Lisäksi koerakennuskohteille aiemmin tehty seuranta-aineisto yhdistettiin osaksi tätä tutkimusta.</p> <p>Rakennäytteenottotutkimuksessa otetuista koekappaleista määritettiin laboratorioissa yksiaksiaalinen puristuslujuus materiaaliominaisuuksien selvittämiseksi. Materiaalin jäykkyysominaisuuksia tutkittiin takaisinlaskemalla E-moduulit Odemarkin mitoitussyhtälön ja pudotuspainolaitemittausten avulla sekä määrittämällä materiaalin E₅₀-sekanttimoduuli rakennäytteen yksiaksiaalisen puristuskokeen tuloksista. Lisäksi kolmen rakennäyttekappaleen vetolujuusominaisuuksia tutkittiin epäsuoran vetokokeen avulla.</p> <p>Laboratoriotutkimuksissa havaittiin uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun murskeen lujuuden pitkäaikainen kehittyminen sekä yksiaksiaalisen puristuslujuuden säilyminen Suomen ilmasto-olosuhteissa. Laboratorio-tutkimuksissa tehdyn suppean koesarjan perusteella uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun murskeen vetolujuus vastasi ennalta asettua käsitystä.</p> <p>Koerakennuskohteille suoritettujen pudotuspainolaitemittauksissa rakenteiden kantavuudet (E2) olivat tavoitearvoja suurempia. Vauriokartoituksen- ja pudotuspainolaitemittauksista saadun aineiston analysoinnin tuloksena havaittiin korrelaatio alusrakenteen/pohjamaan kantavuusominaisuuksien ja tutkitun päällysrakennetyypin vaurioitumisen välillä. Vaurioitumistarkastelussa nousi esiin myös osuudet, jotka alittivat rakenteelta vaaditun laadun. Kahdella koerakennuskohteella päällysteen ja stabiloidun kerroksen väliin rakennetulla tasausmurskekerroksella varustetut osuudet urautuivat muita osuuksia nopeammin. Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun murskeen jäykkyysmoduulin arvo vaihteli takaisinlaskennassa 1400 – 2500 MPa:n välillä.</p> <p>Riittävän hyviin alusrakenteolosuhteisiin sijoittuvan laadukkaasti rakennetun koerakennuskohteen elinkaari-kustannuslaskelmassa nousi esiin uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämien päällysrakenteen alhaisemmat elinkaari-kustannukset luonnonkiviaineksista rakennettuun päällysrakenteeseen verrattuna.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Master's Thesis)			
Degree programme in Environmental Engineering			
Author		Thesis Supervisor	
Harju, Ilari		University teacher Tuomela, A.	
Title of Thesis			
Industrial by-products in the base course stabilization of asphalt paved roads			
Major Subject	Type of Thesis	Submission Date	Number of Pages
Water and Geo Engineering	Master's Thesis	October 2017	94 p., 8 appendix
Abstract			
<p>The use of industrial by-products as a part of base course stabilization binder mixture have been studied in Finland since 1970. The initial target for the first studies was to find a more economical binder mixture for the gravel road stabilization where a part of the cement usage could have been replaced with a substitutive product eg. industrial by-product. Increased traffic volume and diminishing annual road maintenance budget raise the need to develop more cost efficient road pavement structures also for the asphalt paved roads.</p> <p>In this study the stabilized road base structures where industrial by-products have been used in the binder mixture were built in the early 2000's on asphalt paved roads. Characteristic for these structures is that stabilized base course is built by the use of existing base course material. Industrial by-products used in stabilization binder mixture have been fly ashes, gypsum, flue gas desulphurisation residue and blast furnace slag.</p> <p>The aim for the study was to examine the long term behaviour and suitability of the binder mixture based on industrial by-products for the base course stabilization of asphalt paved roads in Finland. This study consists of a literature review on the base course stabilization and condition examination results from the five old base course stabilization projects. The condition examination was carried out by using structure sampling and visual distress inventories. Additional condition information was available in the old studies and condition registry of the Finnish Transport Agency. Unconfined compression was tested for the specimen from structure sampling. Stiffness property of the stabilized material was calculated with the use of Odemark's design equation and bearing capacity measurement data. E_{50}-modulus was calculated from the results of unconfined compression test. Indirect Tensile strength of the material was determined from three specimen.</p> <p>Laboratory tests demonstrated long term strength development on the studied material in Finnish climatic-conditions. Indirect tensile strength values of the studied material corresponded the predetermined presumption. Although the amount of specimen was limited.</p> <p>Falling weight deflectometer tests have showed high bearing capacity of the studied structures. Bearing capacities exceeded the target in all of the structures. The correlation between low bearing capacity of the road substructure and damages of studied structures was found when the results from the condition examination and falling weight deflectometer tests were combined. Condition examination also revealed high damages in the sections where the structure quality had been under the limit. The study also stated that unbound gravel layer cannot prohibit the damaging of the pavement structure when it is build between the stabilized base course and the asphalt pavement. The E-modulus values of the studied material varied between 1400 – 2500 MPa.</p> <p>Life cycle impact assessment indicated better cost efficiency of the studied structure compared to the traditional pavement structure. Better cost efficiency can be achieved when the road substructure has enough bearing capacity and the quality of stabilized base course is within specified limit.</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana EU-Life IP Circwaste- ja UUMA2-hankkeiden yhteydessä tehtävää laajamittaista tutkimusta uusiomateriaalien hyödyntämisestä maarakentamisen eri osa-alueilla sekä niiden käytettävyydestä erilaisissa rakenneratkaisuissa. Diplomityön rahoitus on kanavoitunut myös molempien hankkeiden kautta siten, että Ramboll Finland Oy on osallistunut työn rahoitukseen osana valtakunnallista UUMA2-hanketta. Lisäksi osa rahoituksesta on saatu suoraan EU-Life IP Circwaste-Finland – projektin tuen avulla.

Tässä diplomityössä tuotetaan tietoa Liikenneviraston päällysrakenneselvitys -projektin taustaselvitystä varten. Päällysrakenneselvityksen tavoitteena on edistää Liikenneviraston ennalta arvioimien ja hyväksymien uusiomateriaalirakenneratkaisujen käyttämistä tierakentamisessa.

Diplomityön ohjaajina ovat toimineet diplomi-insinöörit Taavi Dettenborn ja Harri Jyrävä Ramboll Finland Oy:stä. Työn valvojana on toiminut yliopisto-opettaja Anne Tuomela Oulun yliopistosta. Lisäksi diplomityön ohjausryhmään kuuluivat Pentti Lahtinen, Marjo Koivulahti ja Juha Forsman Ramboll Finland Oy:stä.

Kiitän suuresti diplomityön ohjaajiani ja ohjausryhmään kuuluneita henkilöitä, jotka ovat omalla osaamisellaan antaneet tärkeitä neuvoja ja rakentavaa palautetta työn teon aikana. Erityiset kiitokset haluan osoittaa Ramboll Finland Oy:n Luopioisten ympäristögeotekniikan T&K – yksikön henkilökunnalle, jotka ovat avustaneet tämän työn maasto- ja laboratoriotutkimusten toteuttamisessa.

Kiitokset myös perheelleni ja aviopuolisolleni Johannalle kaikesta tuesta ja kannustuksesta diplomityön teon aikana.

Luopioisissa 23.10.2017

Ilari Harju

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	8
1.1 Tutkimuksen tausta	8
1.2 Tutkimusongelma	9
1.3 Tutkimuksen tavoite ja rajaukset	10
2 Päällysrakenteen stabilointi	12
2.1 Paikallasekoitusmenetelmä	13
2.2 Asemasekoitusmenetelmä	16
2.3 Muut työvaiheet	17
3 Stabiloinnin sideainemateriaalit	21
3.1 Bitumiset sideaineet	21
3.2 Hydrauliset sideaineet	23
3.2.1 Sementti	24
3.2.2 Uusiomateriaalisideaineet	26
4 Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloitavan kantavan kerroksen suunnittelu ja mitoitus	31
4.1 Kohdesuunnittelu	31
4.2 Stabilointimassan suhteitus	33
4.3 Kuormituskestävyysmitoitus	35
4.4 Routamitoitus	37
5 Tutkimusmenetelmät	41
5.1 Kohdetutkimukset	41
5.1.1 Päällysteaurioinventointi	43
5.1.2 Rakennetutkimukset	44
5.2 Laboratoriokokeet	45
5.2.1 Yksiaksiaalinen puristuskoe	45
5.2.2 Epäsuora vetokoe	46
5.3 Muut menetelmät	48
5.3.1 PTM-mittaukset	48
5.3.2 Pudotuspainolaitemittaukset	49
5.3.3 Materiaalin jäykkyysominaisuuksien määrittäminen	50
5.3.4 Vaurioitumisnopeuden vertailu	52

6 Tutkimustulokset	53
6.1 Koerakenteiden kunto.....	53
6.2 Kantavuus	57
6.3 Yksiaksaalinen puristuslujuus.....	59
6.4 Materiaalin jäykkyys	60
6.5 Epäsuora vetolujuus	62
7 Tutkimustulosten tarkastelu.....	66
7.1 Koerakennuskohteiden vaurioituminen.....	66
7.2 Uusiomateriaalisideseoksella stabiloidun materiaalin ominaisuudet.....	71
7.3 Koerakenteiden vaurioituminen.....	76
7.3.1 Tasausmurskekerroksen vaikutus päällysteen vaurioitumiseen	79
7.4 Kantavuus	80
7.5 Rakenteen elinkaarikustannustarkastelu.....	82
8 Johtopäätökset	87
9 Jatkotutkimustarpeet	89
10 Yhteenveto.....	93
Lähteet.....	95
Liitteet	101

LIITTEET:

Liite 1. Tutkimuskohteiden vaurioituminen ja kunto

Liite 2. Tutkimuskohteiden rakennenäytteiden yksiaksaalisen puristuslujuuden pitkäaikaisseuranta

Liite 3. Tutkimuskohteiden pintamoduulikuvaajat

Liite 4. Tutkimuskohteiden stabiloidun kantavan kerroksen E-moduulin takaisinlaskenta

Liite 5. Rakennenäytteenottotutkimuksissa kirjatut havainnot

Liite 6. Rakennenäytteiden yksiaksaaliset puristuslujuudet ja E₅₀-sekanttimoduulit

Liite 7. Elinkaarimallien nykyarvolaskelmat

Liite 8. Yhteenveto koerakennuskohteiden toimivuudesta

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Tien päällysrakenteen kantavan kerroksen tehtävänä on luoda tierakenteelle jäykkyyssominaisuus ja jakaa liikenteestä aiheutuvaa kuormitusta jakavaan kerrokseen ja pohjamaahan. Kantavan kerroksen yläosan murske hienontuu ajan saatossa liikenteen kuormituksen alla tai se voi hienontua jo rakentamisen aikana. Liikenteen kuormituksen vaikutuksesta rakenteessa alati kasvava hienoainespitoisuus muuttaa alun perin routimattoman materiaalikerroksen vähitellen routivaksi, jonka johdosta rakenne menettää kantavuutensa ja lopulta deformoituu. Myöskään uudisrakentamiskohteissa ei ole aina saatavilla riittävän laadukasta kiviainesta kestävän päällysrakenteen rakentamista varten, vaan sen rakeisuudessa voi esiintyä puutteita. Tierakenteen kantavan kerroksen hienoainespitoisuutta on esitetty yhdeksi selittäväksi tekijäksi Suomen tiestöllä tyypillisesti esiintyviin uraisuus- ja halkeamavaurioihin, jotka ovat usein peräisin roudan sulamisen aikaisesta huonosta kevätkestävyydestä (Tielaitos 2000). Urautumista muodostuu Suomessa myös nastarengaskulutuksen vaikutuksesta. Liikenneviraston arvion mukaan nastarengaskulutuksen aiheuttama päällysteen uusimistarve rajoittuu Suomessa vain kaikista vilkkaimmalle tieverkolle, jota on noin 20 % päällystetyn tieverkon pituudesta (Eskola 2016).

Yleisen tieverkon ylläpidon rahoituksen pienentyessä tienpidon pääpaino on ollut päätieverkossa ja sen kehittämisessä, mikä on johtanut alempiasteisen tieverkon kunnan heikentymiseen. Kokemukset aikaisemmin rakennettujen teiden vaurioitumisesta, tierakenteeseen kohdistuvan liikennekuormituksen kasvu sekä hyvälaatuisen kiviaineksen saatavuus asettavat yhdessä tiukan rahoituksen kanssa suuren haasteen tierakenteen suunnittelulle. Routamitoitus voi Suomen olosuhteissa muodostua usein määräväksi tekijäksi tien päällysrakenteen kokonaispaksuudelle. Paksut rakennekerrokset vaativat paljon materiaalia ja kuluttavat luonnonvaroja. Vaurioituneen tierakenteen parantamistyössä on viime vuosina yleistynyt sekoitusjyrsintämenetelmän käyttö. Sekoitusjyrsintämenetelmä on edullinen tapa tasalaatuistaa tierakenteen kantavaa kerrosta, koska rakennustyössä vaadittavien materiaalien ja niiden kuljettamisen tarve on vähäinen (Höltkä 2012).

1980- luvun loppupuolella havaittiin, että sitomattomien rakennekerrosten käyttö päällysrakenteen kantavassa- ja jakavassa kerroksessa ei anna riittävää varmuutta rakenteen kestävyydestä eritoten silloin, kun rakenteelta vaaditaan hyvää kantavuusominaisuutta (Rahiala 1988). Ongelma korostuu eritoten ohutpäällysteisillä teillä, jolloin päällysteen alapintaan syntyvät vetojännitykset kasvavat liian suureksi sitomattoman kantavan kerroksen joustessa liikaa. Kiinnostus tierakenteen materiaalien lujittamisesta eli stabiloinnista on johtanut kantavan kerroksen stabilointimenetelmien kehittämiseen. Tien päällysrakenteen kerroksista voidaan stabiloida jakava kerros, kantava kerros tai kantavan kerroksen yläosa, rakennekerroksen kiviaineksen sekaan sekoitettavan lujittuvan sideaineen avulla. Stabilointityössä käytettävien menetelmien ja sideaineseosten kehittyminen on edellyttänyt koerakentamista, laboratoriotutkimusta ja rakentamisessa tarvittavan sekoituskaluston kehittämistä (Tiehallinto 2002).

1.2 Tutkimusongelma

Sementillä ja muilla hydraulisilla sideaineilla stabiloidun tien rakennekerroksen tunnusomaisena piirteenä ovat suuri kantavuus ja jäykkyys. Rakennekerroksen suuri kantavuus ja jäykkyys eivät kuitenkaan takaa rakenteen toimivuutta tien päällysrakenteessa. Tämä johtuu siitä, että rakennekerroksen jäykkyys kasvattaa kerroksen alapinnan vetojännityksen suuruutta. Suomen olosuhteissa tien päällysrakenteen kantavaan kerrokseen kohdistuvat vetojännitykset aiheutuvat liikennekuormituksesta, puutteellisesti routamitoitetun rakenteen routanousuista ja alusrakenteen painumasta. Väsymiskestävyydeltään hauraat materiaalit eivät suurella todennäköisyydellä kestä vetojännityksiä pitkään (Liikennevirasto 2016). Huonon väsymiskestävyuden omaavan materiaalin vaurioitumisesta vetojännitysten seurauksena on kokemuksia Suomessa jo 1960 - 70 luvuilta, jolloin tierakenteen jakavassa ja kantavassa kerroksessa käytetty sementtistabilointi vaurioitui olosuhteissa, joissa tien alusrakenne routi epätasaisesti ja menetti kantavuutensa keväisin (Rahiala 1988). Lujittumisominaisuuksia omaavia uusiomateriaaleja ja teollisuuden sivutuotteita sisältävillä sideaineseoksilla stabiloitujen materiaalien ominaisuuksien on havaittu poikkeavan sementtistabiloinnista muun muassa siten, että materiaalin lujuuden kehitys on pidempiaikaista kuin pelkkää sementtistabilointia käytettäessä, materiaali kestää paremmin maantiesuolauksesta aiheutuvaa kemiallista rasitusta sekä materiaalissa ei ilmene yhtä voimakkaasti kutistumisesta aiheutuvaa halkeilua.

Erilaisten uusiomateriaalisideaineseosten avulla on toteutettu useita kantavan ja jakavan kerroksen stabiloinnin koerakennuskohteita. Osalla koerakennuskohteista lähtötilanteen tunnusomaisena piirteenä ovat olleet haasteelliset olosuhteet kevyesti mitoitettun stabilointirakenteen pitkäaikaiskestävyyden kannalta. Näissä kohteissa routamitoitusta ei ole tehty päällysrakenteen suunnittelua koskevan ohjeistuksen mukaisesti, koska rakenteen parantamisessa on pyritty toimimaan mahdollisimman kustannustehokkaasti. Näin ollen stabiloitu rakenne on altistunut tien alusrakenteen tai pohjamaan routimisesta aiheutuville kuormituksille. Osalla koerakennuskohteista rakennusajankohta on ajoittunut pitkälle syksyyn, jolloin lämpötila ja sateet ovat vaikeuttaneet rakentamista sekä lisänneet epävarmuutta rakentamisen laadusta. Näistä seikoista huolimatta uusiomateriaalien avulla toteutetuista stabiloinneista on kuitenkin saatu hyviä kokemuksia rakenteen parantamistoimenpiteenä. Uusiomateriaalien käyttöä päällysrakenteen kerroksen stabiloinnissa on tutkittu vaihtelevasti. Osalle rakennetuista koerakennuskohteista on suoritettu pitkäaikaisseuranta ja tutkimuksia, osalle kohteista seuranta on ollut varsin rajallista. Tämän johdosta koerakenteiden vaurioitumistavoista ja -mekanismeista on tarpeen saada lisää tietoa. Liikenneviraston (2016) mukaan jatkossa tulisi kiinnittää huomiota juuri näihin asioihin, sillä vaihtoehtoisista maarakennusmateriaaleista on mahdollista rakentaa kestäviä väylärakenteita, mikäli ne osataan hyödyntää oikein.

1.3 Tutkimuksen tavoite ja rajaukset

Tämän diplomityön päätavoitteena on tutkia erilaisten uusiomateriaalisideaineiden avulla toteutettun stabiloidun kantavan kerroksen soveltuvuutta päällystettyjen teiden rakenteen parantamiseen ja uudisrakentamiskohteiden päällysrakenteen kantavan kerroksen rakenteena. Tutkimuksessa selvitetään stabiloinnin toteutustavan, olosuhteiden ja käytettyjen materiaalien vaikutusta rakenteen toimivuuteen sekä pohjamaan, alusrakenteen ja päällysrakenteen muiden kerroksien ominaisuuksien asettamia vaatimuksia kantavan kerroksen stabiloinnin kohdekohtaiselle soveltuvuudelle. Kirjallisuuskatselmus luo teoreettista pohjaa diplomityön tutkimusosalle, jossa valituille koerakennuskohteille suoritetaan seurantatutkimuksia rakenteen pitkäaikaiskestävyyden ja ominaisuuksien selvittämiseksi. Tutkimuksessa pyritään löytämään tekijät, jotka vaikuttavat uusiomateriaalisideaineseoksella toteutettavan kantavan kerroksen stabiloinnin toimintavarmuuteen ja elinkaareen erilaisissa rakennus-

olosuhteissa. Lisäksi tavoitteena on havainnollistaa olemassa olevien tutkimusten, ohjeistuksen ja koerakennuskohteilta saatavan uuden tiedon avulla uusiomateriaalien sideainekäyttömahdollisuuksia päällystetyn tierakenteen kantavan kerroksen stabiloinnissa ja tuoda esiin niiden edullisen käytön edellytyksiä teknistaloudellisesta näkökulmasta. Tutkimusaineistosta on rajattu pois päällysrakenteet, joiden kulutuskerroksen materiaali on sitomatonta sekä kohteet joissa stabiloitu kerrosrakenne sijaitsee kantavan kerroksen alapuolisissa rakennekerroksissa. Tässä diplomityössä ei tarkastella uusiomateriaalien ympäristökelpoisuutta ja hyötykäyttöä koskevaa lain-säädäntöä.

Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin, kun kantava kerros stabiloidaan uusiomateriaalisideaineseoksella:

- Millaisiin rakennusolosuhteisiin kantavan kerroksen stabilointi soveltuu ja millaisiin kohteisiin sitä ei tulisi rakentaa?
- Minkälaisia ominaisuuksia päällysrakenteelta on mahdollista saavuttaa?
- Kuinka stabiloidun kerroksen sisältämä päällysrakenne tulee ylläpitää tai parantaa sen elinkaaren aikana?
- Mitkä ovat rakenteen toiminnan kannalta kriittisimmät tekijät, jotka vaikuttavat stabiloidun kantavan kerroksen laatuun?
- Mihin asioihin tulee kiinnittää huomiota valmisteleavassa suunnittelussa, rakennusvaiheessa ja laadunvalvonnassa?

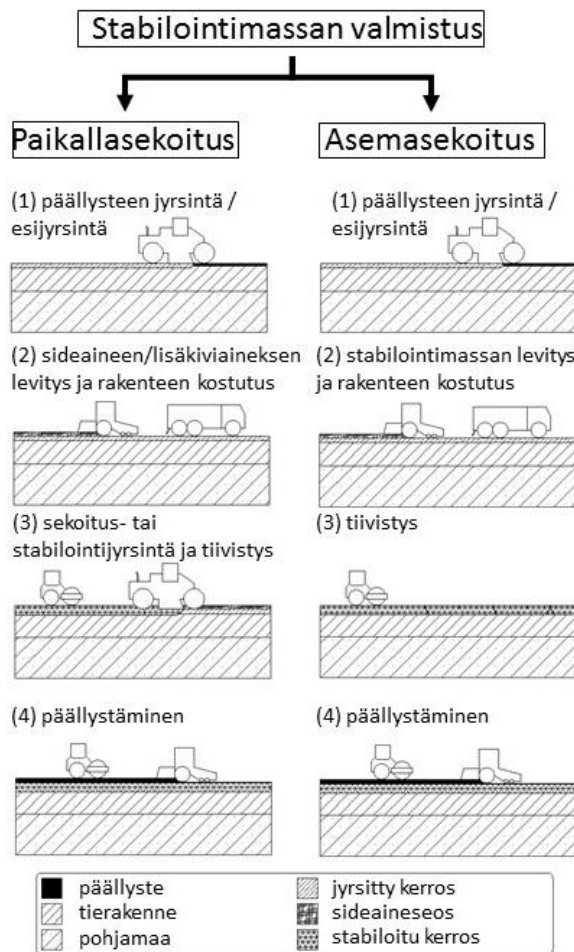
2 PÄÄLLYSRAKENTEEN STABILOINTI

Päällysrakenteen stabilointi on tien ja kentän päällysrakenteen vahvistusmenetelmä, jonka avulla voidaan saavuttaa hyvin kuormitusta kestävä päällysrakenne. Stabilointimenetelmä soveltuu uudisrakentamisen lisäksi myös kantavuutensa menettäneen päällysrakenteen parantamiseen ja sen avulla voidaan korjata vanhan päällysrakenteen epätasaisuuksia. Tien päällysrakenteesta voidaan stabiloida jakava kerros, kantava kerros tai kantavan kerroksen yläosa sekoittamalla rakennekerroksen sekaan lujittuva sideaine.

Päällysrakennekerrosten stabilointivaihtoehdoista kantavan kerroksen stabilointia pidetään ympäristön kannalta parhaimpana vaihtoehtona tierakenteen parantamisessa, koska vanha tierakenne voidaan tällöin hyödyntää korjaustyössä yleensä kokonaan sekä uutta materiaalia tarvitaan vain vähän ja se voi olla teollisuuden sivutuote (Tiehallinto 2007a). Rakenteen parantamiskohteissa stabiloinnit kohdistuvat lähes poikkeuksetta päällysrakenteen kantavaan kerrokseen, sillä jakavan kerroksen stabilointia varten vanhan päällysrakenteen päällyste ja kantava kerros jouduttaisiin leikkaamaan ja siirtämään pois jakavan kerroksen stabilointia varten. Kantavan kerroksen stabiloinnin etuna on se, että tien tasausviivaa ei tarvitse nostaa, jolloin esimerkiksi liittymä-alueita ei tarvitse korottaa eikä tierakennetta levennättä. Mikäli tierakennetta levennetään, joudutaan lunastamaan lisää maa-alaa tiealuetta varten. Stabiloinnin avulla rakennekerroksen kantavuus ja kesto jäätymis-sulamissyklejä vastaan paranevat. Sidotun rakenteen ansiosta pintavesien imeytyminen tierakenteeseen ja veden kapillaarinen nousu stabiloituun kerrokseen vähenevät. Stabilointi ehkäisee myös rakenteen runkoaineen hienoaineksen routimista ja parantaa rakenteen kykyä vastustaa deformatumista. Stabiloinnin avulla saavutetun paremman kantavan kerroksen kantavuuden ansiosta päällysrakenteen rakentamiskustannuksissa voidaan useissa tapauksissa säästää ohuemman päällysteen ja päällysrakenteen osalta (Kiviniemi et. al 2012). Ohuemman päällysrakenteen rakentamista voi kuitenkin rajoittaa muun muassa routamitoituksessa määräytyvä päällysrakenteen kokonaispaksuus.

2.1 Paikallasekoitusmenetelmä

Kantavan kerroksen stabiloinnin toteutustapaa ohjaa stabilointimassan valmistus, joka voidaan tehdä paikallasekoitus- tai asemasekoitusmenetelmällä. Sekoitusmenetelmän valinta kullekin stabilointikohteelle tulee tehdä vertailemalla eri vaihtoehtoja. Tierakenteen parantamiskohteella sekoitusmenetelmän valintaa ohjaavat muun muassa työstä aiheutuvat kustannukset, työlle asetetut tavoitteet, suunniteltu rakenteen käyttöikä, rakennusolosuhteet, käytössä olevat materiaalit ja tien tasausviivan paikka ja tien leveys. Vanhassa tierakenteessa voi myös esiintyä lujiteverkkoja tai stabilointikerroksia, jotka ohjaavat myös sekoitusmenetelmän valintaa (Tiehallinto 2007 a). Kuvassa 1 on esitetty kerrosstabiloinnin työvaiheet tapauksissa, jossa stabilointimassa valmistetaan paikalla (in-situ) tai asemalla (ex-situ).

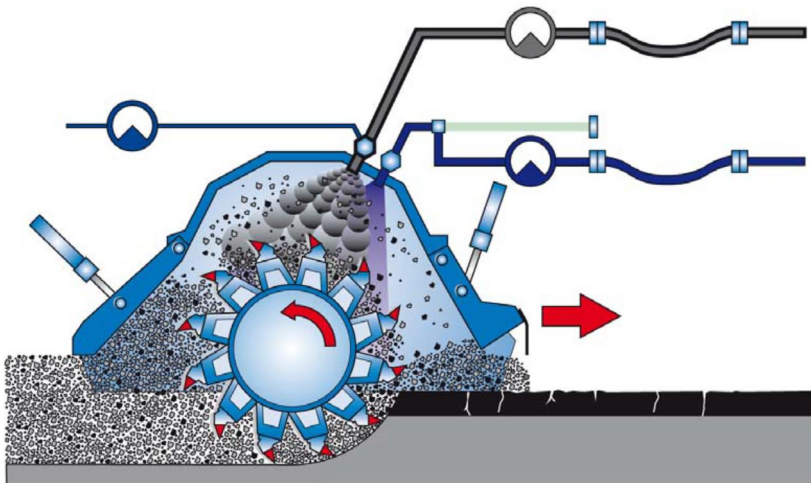


Kuva 1. Kantavan kerroksen stabiloinnin työvaiheet (muokattu Kiviniemi et. al 2012, Tiehallinto 2002 b).

Uudisrakennuskohteessa päällysteen jyrshintävaihe jää pois ja työ aloitetaan kuvan 1 vaiheesta 2. Paikallasekoitusmenetelmä on Suomessa yleisempää kuin asemasekoitusmenetelmä. Asemasekoitusmenetelmää käytetään tavallisesti vain uudisrakennuskohteissa sekä rakenteen parantamiskohteissa, joissa stabiloitavan kerroksen materiaali on uutta (Tiehallinto 2007 a). Stabilointityössä voidaan käyttää usein myös useasta eri komponentista koostuvaa sideaineseosta. Esimerkiksi komposiittistabiloinnissa käytetään bitumi-sementtiseidaineseosta. Teollisuuden sivutuotteita ja uusiomateriaaleja hyödynnettäessä sideainekomponentteja voi olla vielä useampia.

Vanhan tierakenteen parantamisessa stabilointityön yhteydessä toteutetaan tavallisesti esijyrshintävaihe. Esijyrshintätyössä tien päällysrakenteen vanha päällyste ja kantava kerros homogenisoidaan eli sekoitusjyrshintään ennen varsinaista stabilointia. Mikäli vanhassa tierakenteessa on useita vanhoja asfalttiberonikerroksia, voidaan tarpeen mukaan osa asfaltista jyrshintä uusiokäyttöön ennen esijyrshintää toteutettavalla jyrshintätyöllä. Stabilointia edeltävän esijyrshintän pääasiallinen tarkoitus on profiloida tie oikeaan tasoon, muotoon ja tasaisuuteen ennen stabilointijyrshintävaiheessa tehtävää vanhan sekoitusjyrshintyn rakenteen, sideaineseoksen ja lisäveden sekoitusta. Esijyrshintävaiheessa stabiloitavasta kerroksesta tulee poistaa yli 100 mm:n kokoiset kivet. Stabiloitavan kerroksen runkoaineksen rakeisuus tai tien profiili voi vaatia myös lisäkiviaineksen avulla tehtävää korjausta, jonka lisäys suoritetaan yleensä esijyrshintän yhteydessä (Tiehallinto 2007 c).

Paikallasekoitusmenetelmässä sideaineen sekoitus stabiloitavaan materiaaliin toteutetaan sekoitusjyrshintimellä tai stabilointijyrshintimellä. Nestemäisiä sideaineita käytettäessä sideaine voidaan sekoittaa stabiloitavaan materiaaliin stabilointijyrshintimen rummun sekoitinkoteloon, jolloin sideaineen levitysvaihetta ei tarvita. Sideainesyöttöominaisuuden lisäksi jyrshintimillä on usein mahdollista lisätä myös vettä rakenteeseen. Veden lisääminen stabilointijyrshintimen rummun kautta on koettu hyväksi työmenetelmäksi stabilointimassan vesipitoisuuden homogeenisuuden kannalta. Kuvassa 2 on stabilointijyrshintimen rumpu, joka on varustettu sekä veden että nestemäisen sideaineen syöttöjärjestelmällä (Tiehallinto 2007 c).



Kuva 2. Stabilointijyrsimen rumpu (Tiehallinto 2007 b).

Kuivien sideaineiden, kuten esimerkiksi sementin lisäys toteutetaan kuivalevittimen avulla ennen sekoitusjyrsintää. Kostutettujen sideaineiden levitystyö onnistuu esimerkiksi asfaltinlevittimen avulla (Kiviniemi et. al 2012). Kuivan sementin levitystyön haasteena ovat sääolosuhteet sekä työkohteella tapahtuva liikennöinti. Sementtiseidainetta käytettäessä levitystyötä ei saa tehdä sateella ja liikennöintiä sementin päällä tulee välttää (Tiehallinto 2007 c). Kuvassa 3 on esitetty kuivan sideaineen levitystyöhön soveltuva laitteisto.



Kuva 3. Kuivan sideaineen levitys Hanhikempin koerakennuskohteella (kuva: Jokinen 2007).

2.2 Asemasekoitusmenetelmä

Stabilointimassa voidaan valmistaa tarkoitukseen soveltuvalla sekoitusasemalla (Kuva 4), jossa kiviaines, sideaineseos ja vesi sekoitetaan ennen materiaaliseoksen kuljettamista rakennuskohteelle. Paikallasekoitusmenetelmään verrattuna asemasekoitusmenetelmän avulla stabilointimassasta saadaan tasalaatuisempaa, koska stabilointimassassa tarvittavien komponenttien annostelu on tarkempaa. Asemasekoitusmenetelmä on kuitenkin paikallisekoitusmenetelmää kalliimpaa ja mikäli vanhan tierakenteen materiaali halutaan hyödyntää stabiloinnissa, joudutaan se kuljettamaan asemalle sekoitettavaksi (Tiehallinto 2007 c).



Kuva 4. Asemasekoitinlaitteisto (kuva: Jokinen 2005).

Asemasekoituslaitteistot voivat olla toiminnaltaan joko jatkuvatoimisia sekoittimia tai annossekoittimia. Jatkuvatoimisilla sekoittimilla saavutetaan usein annossekoitinta suurempi teho, jolla on vaikutusta kuluvaan aikaan. Asemasekoituslaitteistoa voidaan käyttää myös sideaineseoksen valmistusta varten. Sideaineseoksen valmistusta varten suunniteltavan asemasekoitinlaitteiston hankinnan yhteydessä on varmistettava laitteiston soveltuvuus sideaineseoksessa käytettävien komponenttien sekoitusta varten. Esimerkiksi kidevesimuodossa olevaa kosteutta sisältävä dihydraattikipsi voi olla ongelmallinen materiaali asemasekoitinlaitteistolle. Kosteutta sisältävä materiaali voi granuloitua sekoitustyön yhteydessä, jolloin sideaineseoksesta ei muodostu

tasalaatuista. Kosteaa materiaalia voi lisäksi tukkia sekoitinlaitteiston eri osia, mikä vaikuttaa sekoitinlaitteiston toimintaan. Asemasekoituslaitteistolla tehtävän sideaineiden sekoituksen jälkeen varsinainen stabilointimassan valmistusta varten tehtävä sekoitus tehdään kohteessa stabilointi- tai sekoitusjyrsimen avulla.

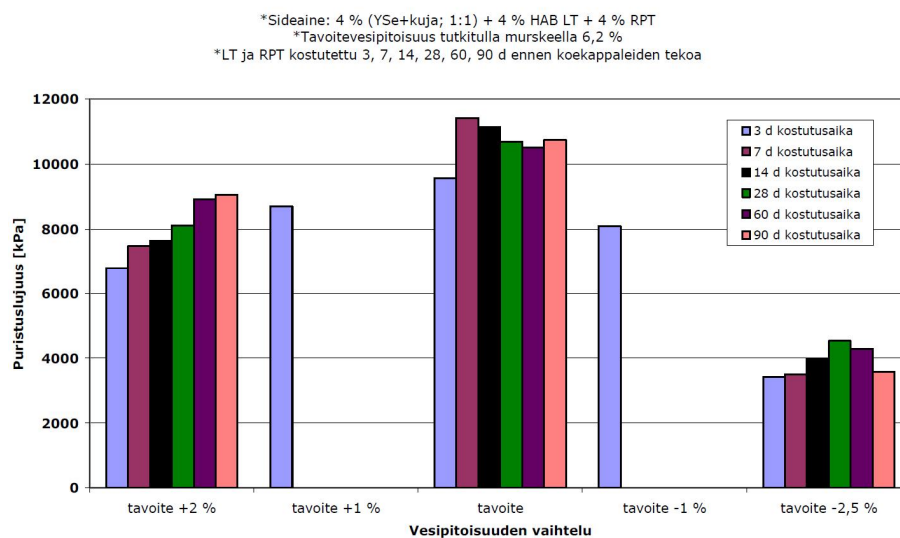
Bitumisideaineella toteutettavassa stabiloinnissa voidaan käyttää lisäksi paikallasekoitus- ja asemasekoitusmenetelmiä yhdistävää remix-stabilointia. Remix-stabilointi toteutetaan paikallasekoitusmenetelmällä vaahtobitumi- tai bitumiemulsiosideainetta käyttäen. Remix-stabiloinnissa vanha päällyste ja kantava kerros lämmitetään ensin säteilylämmittimen avulla, jonka jälkeen se jyrsitään remix-stabilointilaitteestoon. Remix-stabilointilaitteistossa massa sekoitetaan ja lämmitetään sekä siihen voidaan lisätä tarvittaessa uutta bitumisideainetta ja kiviainesta (Tiehallinto 2007 d). Lämmityksen ansiosta vanha päällyste ja kantavan kerroksen yläosa sekoittuvat ja homogenisoituvat hyvin. Lisäksi massa on hyvin tiivistettävissä, jolloin sen kestävyysominaisuudet ilmaston- ja liikenteen kuormitusta vastaan paranevat (Tiehallinto 2007 c).

2.3 Muut työvaiheet

Kastelu

Uusiomateriaalisideaineita käytettäessä sideaineseoksen komponentit sementtiä lukuunottamatta voidaan esisekoituksen yhteydessä kostuttaa, jolloin stabilointikohteella voidaan vähentää kuivan sideaineseoksen käsittelyssä tapahtuvia pölyämishaittoja. Etukäteen suoritettava sideainekomponenttien kostutus helpottaa myös stabilointimassan vesipitoisuuden säätöä tavoitetasolle ja se vähentää veden tarvetta. Rakentamisen yhteydessä stabilointimassan vesipitoisuus saatetaan esikokeissa määritettyyn tavoitetasoon lisäämällä rakenteeseen vettä, joko erillisellä kasteluajoneuvolla tai lisäämällä vesi suoraan stabilointijyrsimen rumpuun. Uusiomateriaalisideaineseoksen kostutuksen yhteydessä on huomattava, että turpeen ja puun polttoprosessissa syntyvän lentotuhkan lujittumisominaisuudet heikkenevät, jo lyhyen varastoinnin aikana, jos se varastoidaan kostutettuna (Laine-Ylijoki et. al 2002). Rakentamisvaiheessa suoritettavalla kastelulla stabilointimassan vesipitoisuus tulee saattaa riittävän lähelle esikokeissa määritettyä optimivesipitoisuutta. Liian alhaiseksi jäänyt vesipitoisuus heikentää rakenteelta saavutettavaa lujuutta. Vesipitoisuus ei saa

myöskään olla liian korkea, mutta optimivesipitoisuutta suurempi vesipitoisuus ei ole materiaaliseoksen lujuuskehityksen kannalta yhtä ongelmallinen, kuin liian alhaiseksi jäänyt vesipitoisuus. Kuvassa 5 on esitetty Ronkaisen ja Virtasen tutkimus materiaaliseoksen vesipitoisuuden ja sideaineseoksen kostutettuna varastoinnin vaikutus stabilointimassan yksiaksiaaliseen puristuslujuuteen 28 vuorokauden iässä. Tutkimuksessa käytetyn sideaineseoksen osakomponenttien (rikinpoistotuote ja lentotuhka) varastointiaika kostutettuna vaihtelee ja stabilointimassan vesipitoisuus on tarkoituksella asetettu tavoitevesipitoisuutta korkeammaksi tai alhaisemmaksi.



Kuva 5. Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen kostutettuna varastoinnin ja stabilointimassan vesipitoisuuden vaihtelun vaikutus koekappaleista määritettyyn 28 vuorokauden puristuslujuuteen (Ronkainen & Virtanen 2006).

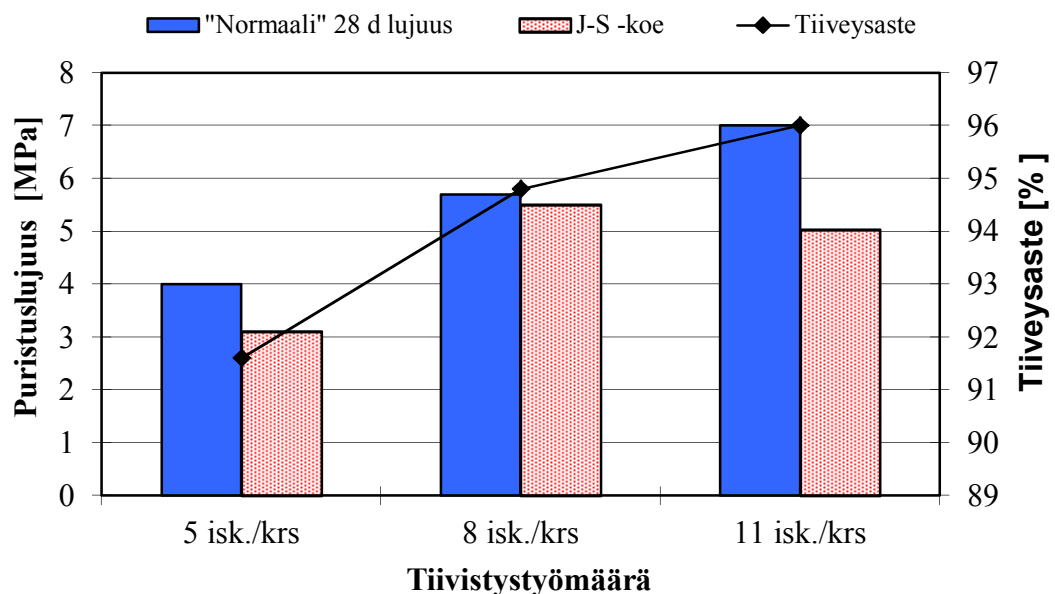
Kuvasta 5 voidaan havaita, että tavoitevesipitoisuuden alittaminen heikentää stabilointimassan 28 vuorokauden iässä määritettyä yksiaksiaalista puristuslujuutta enemmän kuin tavoitevesipitoisuuden ylittäminen. Tutkittujen sideaineiden varastointi kostutettuna ei näytä tutkimuksen perusteella heikentävän saavutettavaa yksiaksiaalista puristuslujuutta yhtä merkittävästi.

Koska tavoitevesipitoisuuden alittaminen heikentää stabilointimassan yksiaksiaalista puristuslujuutta, tulee stabilointimassan runkoaine kastella huolellisesti ennen sideaineen levitystä. Murskekerroksen kastelu tulee suorittaa juuri ennen sideaine-

seoksen levitystä, sillä tiivistämätön murskekerros pidättää vettä huonosti ja kasteluvesi voi suotautua murskekerroksen läpi ennen materiaalien sekoitusta. Kastelun yhteydessä on kuitenkin huomioitava, että liian korkea vesipitoisuus johtaa materiaalin pehmenemiseen tai häiriintymiseen tiivistettäessä. Stabilointimassan vesipitoisuutta tulee valvoa koko rakennustyön ajan ja tehdä tarvittavia säätöjä kasteluun, mikäli vesipitoisuus ei pysy asetetun vaihteluvälin sallimissa rajoissa.

Tiivistys

Stabilointimassan tiivistystyö tulee suorittaa välittömästi stabilointimassan levitystyön tai stabilointijärsintätyön jälkeen. Stabiloinnin tiivistystyötä haittaavat oleellisesti huonosti kantava tai liian märkä alusta. Kun tiivistystyö joudutaan tekemään huonosti kantavalla alustalla, stabiloidun rakenteen tiiveysaste voi jäädä liian alhaiseksi. Liian alhaiseksi jäänyt tiiveysaste vaikuttaa rakenteen pitkäaikaiskestävyyteen ja lujittumiseen. Kuvassa 6 on esitetty tiiveysasteen vaikutus lentotuhkan, rikinpoistotuotteen ja yleissemntin sideaineseoksen sekä vanhan tierakenteen kantavan kerroksen murskeesta koostuvan stabilointimassan koekappaleen yksiakiaaliseen puristuslujuuteen 28 vuorokauden lujittumisajan sekä jäädytys-sulatuskokeen (J-S koe) jälkeen.



Kuva 6. Tiiveysasteen vaikutus stabiloidun murskeen lujuuteen ja jäätymsulamiskestävyyteen (J-S -koe) (Ramboll 2000 a).

Kuvasta 6 voidaan havaita, että suuri tiiveysaste parantaa stabiloidun murskeen yksiaksiaalista puristuslujuutta. Tiivistystyömäärän tarve tulee selvittää rakennettavassa kohteessa tehtävällä tiivistyskokeilla. Tiivistyskokeessa määritetyn tavoitetiiveyden toteutumista tulee valvoa koko työn ajan tehtävillä tiiveysmittauksilla. Tien reunaosilla luiskien liian suuri jyrkkyys tai reunaosan kantavuuspuute voivat lisäksi haitata stabilointikerroksen riittävän hyvää tiivistymistä tien reunoilla (Tiehallinto 2005).

Päällystäminen

Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kerroksen päälle tulee ennen päällystystä levittää bitumiliima, joka sitoo päällysteen ja stabiloidun kerroksen toisiinsa. Päällysteen ja stabiloidun kerroksen välisen tartunnan varmistamiseksi stabiloitu kerros voidaan myös harjata puhtaaksi mahdollisesta irtokiviaineksesta. Tiehallinnon (2007a) stabilointiohjeen mukaan hydraulista pääsideainetta käytettäessä stabiloitu kerros tulisi päällystää aikaisintaan yhden vuorokauden kuluttua stabilointikerroksen rakentamisen jälkeen. Toisaalta rakenteen kuivumisesta tulisi myös hidastaa vähintään kolmen vuorokauden aikana, mikäli stabiloinnin sideaineseoksessa on käytetty sementtiä. Sementtiseidaineen käytön yhteydessä on todettu sideaineen liian nopean kuivumisen seurauksena kiihtyneestä lujittumisesta aiheutuvaa kutistumishalkeilua. Kuivumisen hidastamismenetelminä voidaan käyttää rakenteen kastelua, kerroksen päälle levitettävää $0,4 \text{ kg/m}^2$ bitumiemulsiokerrosta tai asfalttipäällystettä. (Tiehallinto 2007 a).

3 STABILOINNIN SIDEAINEMATERIAALIT

Stabiloinnissa käytettävä sideaine vaikuttaa oleellisesti stabiloitavan rakennekerroksen ominaisuuksiin. Kantavan kerroksen stabiloinneissa käytetään bitumisia ja hydraulisia sideaineita tai niiden yhdistelmiä. Hydrauliset ja bitumiset sideaineet luovat stabiloitavalle rakenteelle hyvin toisistaan poikkeavat ominaisuudet. Bitumisella sideaineella stabiloitu kerros on joustava ja se kestää liikenteen kuormituksesta ja lämpötilan muutoksista johtuvia toistuvia vetojännityksiä. Vastaavasti hydraulisella sideaineella saavutetaan bitumistabilointia suurempi kantavuus ja kuormituskestävyys. (Tiehallinto 2007 a) Bitumista ja hydraulista sideainetta yhdistettäessä stabiloidulla rakenteella on molempien sideainetyyppien avulla saavutettavia ominaisuuksia. Stabilointityyppien jäykkyysominaisuuseroista johtuen hydraulisella sementtisineaineella sidottuja maabetonirakenteita on käytetty tyypillisesti kohteissa, joissa alusta ei pääse liikkumaan routanousujen tai painumien seurauksena. (Tiehallinto 2002 c)

3.1 Bitumiset sideaineet

Bitumistabilointien sideaineena käytettävä bitumi valmistetaan raakaöljyn tislausprosessin loppuvaiheen tyhjiötislauksen lopputuotteesta (BP Bitumen 2007). Bitumi- ja komposiittistabiloinneissa käytettävän bitumin tulee täyttää asfalttinormeissa asetetut vaatimukset. Yleisin stabiloinneissa käytetty bitumilaji on 160/220. (Tiehallinto 2007 a). Bitumilajin merkintä, esimerkiksi 160/220, kuvaa bitumin kovuutta eli juoksevuutta ja sitä kutsutaan tunkeumaluokitukseksi. Tunkeuman arvo kuvaa vakiomuotoisen ja -paineisen neulan saavuttamaa tunkeumaa 25 °C lämpötilassa olevaan bitumiin viiden sekunnin aikana. Bitumien kovuuteen eli juoksevuuteen voidaan vaikuttaa prosessin olosuhteita säätelämällä. Bitumia luonnehditaan viskoelastiseksi materiaaliksi, koska sen mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat lämpötila ja kuormituksen kesto. Lämpötilan vaikutus bitumin ominaisuuksiin huomataan kahdella tavalla. Korkeassa lämpötilassa bitumi esiintyy juoksevana. Juoksevassa olomuodossa esiintyvää bitumia voidaan käsitellä ja sekoittaa kiviainekseen. Vastaavasti rakenteessa alhaisemman lämpötilan saavuttanut bitumi on kovaa, jolloin se kestää liikenteen kuormitusta. Tieolosuhteiden lämpötila on bitumin kovuuden ja juoksevuuden kannalta bitumin välialueen lämpötila, jolloin bitumilla on viskoosisia ja elastisia ominaisuuksia.

Matalassa lämpötilassa kovimmillaan esiintyvä bitumi kestää liikenteen kuormitusta (Ehrola 1996). Ennen bitumistabiloinnin toteutusta tulee varmistaa alustan tasaisuus sekä oikea muoto ja korkeusasema. Lisäksi alustan tulee olla tasalaatuinen ja kantavuudeltaan vähintään 70 MPa (InfraRYL 2017).

Vaahtobitumi

Vaahtobitumistabilointi on yleisimmin käytetty stabilointimenetelmä Suomessa. (Lemminkäinen 2006). Vaahtobitumistabiloinnin sideaineena käytettävä bitumi vaahdotetaan syöttämällä vähintään +140 °C lämpötilassa olevaan bitumiin vettä yli-paineessa. Ylipaineessa olevan bitumi-vesiseoksen purkautuessa normaaliin ilman-paineeseen, vesi höyrystyy nopeasti, jonka yhteydessä bitumi vaahtoutuu. Bitumin, veden ja ilman seoksesta muodostuneella vaahtobitumilla on erittäin suuri ominaispinta-ala ja pieni viskositeetti. Näiden ominaisuuksien ansiosta vaahtobitumi sekoittuu tehokkaasti maa-ainekseen ja sitoo maa-ainepartikkelit tehokkaasti toisiinsa.

Päällysrakenteen stabilointiohjeen (Tiehallinto 2007 a) mukaan bitumin lämpötila tulisi olla vähintään + 170 °C, lisätyn puhtaan veden määrä tulisi olla 2-3 massa-% sideaineen painosta ja vaahdotetun bitumin tilavuus tulisi kasvaa vähintään 15-kertaiseksi alkuperäiseen bitumin tilavuuteen nähden. (Tiehallinto 2002 b, Tiehallinto 2007 b) Vaahtobitumisideaineseoksessa käytetään usein lisäaineena erillistä tartuketta, jonka tehtävänä on parantaa stabilointimassan vedenkestävyyttä. Vaahtobitumistabilointi soveltuu bitumiemulsiostabilointia paremmin runsaasti hienoainesta sisältävien kiviainesten stabilointiin. (Tiehallinto 2007 a)

Bitumiemulsio

Bitumiemulsio on veden ja bitumin dispersio, jossa vesi on jatkuvana faasina. Bitumiemulsio valmistetaan emulgoimalla bitumi veteen, jolloin muodostuu kahden toisiinsa liukenemattoman aineen dispersio. Bitumipisaroiden tarttuessa kiviainekseen emulsio murtuu ja emulsion sisältämä vesi vapautuu. (Apilo 1996) Bitumiemulsion tarttuminen kiviainekseen ja bitumiemulsion murtumisaika tulee aina varmistaa ja sen tulee soveltua rakentamisolosuhteisiin. Bitumiemulsion bitumipitoisuus on noin 60-75 massa-%, joka tulee selvittää ennen suhteutusta tapauskohtaisesti. Vaahtobitumin tavoin bitumiemulsio lisätään aina kylmään ja kosteaan kiviainekseen. (Tiehallinto 2007 a).

Komposiittisideaine

Komposiittistabiloinnissa yhdistyvät bitumisen ja hydraulisen sideaineen ominaisuudet. Bitumin joustavuusominaisuuden avulla rakenteeseen saadaan kestävyyttä epätasaisia painumia ja routanousuja vastaan. Vastaavasti hydraulisen sideaineen avulla rakenteeseen saadaan deformaatiokestävyyttä. Komposiittistabilointimenetelmässä voidaan käyttää myös useampaa kuin kahta sideainetta samanaikaisesti. Hydraulisena sideaineena käytetään yleensä sementtiä (Lemminkäinen 2014). Komposiittistabiloinnin sideaineseoksessa bitumin ja sementin suhde on noin 3:1 (Tiehallinto 2007 a). Laukkanen ja Leivo tutkivat bitumi-sementti-komposiittien ominaisuuksia tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelman (TPPT) yhteydessä. Tehdyissä tutkimuksissaan he havaitsivat bitumi/sementtisuhteen vaikuttavan komposiittistabilointimateriaalin ominaisuuksiin seuraavasti (Tielaitos 1999):

- Pakkaskestävyystavoitteen saavuttamiseksi massan sementtipitoisuus tulee olla suhteellisen korkea.
- Korkean sementtipitoisuuden omaava komposiittistabilointimassa on vaikeasti tiivistettävää.
- Suuri sementtipitoisuus tekee komposiittistabilointirakenteesta hauraan.

Sementtipitoisuuden osalta tutkimuksen johtopäätöksenä suositellaan matalan sementtipitoisuuden käyttöä vähäliikenteisten teiden rakenteen parantamisen yhteydessä, koska vähäliikenteisillä teillä esiintyvä alusrakenteen epätasaisesta routimisesta johtuvan liikkeen aiheuttamat muodonmuutokset rikkovat hauraan komposiittistabiloinnin. Pienen sementtipitoisuuden avulla voidaan parantaa komposiittimateriaalin kykyä käyttäytyä joustavasti ja asfaltinomaisesti, jolloin se kestää paremmin alustan liikkeitä. (Tiehallinto 1999)

3.2 Hydrauliset sideaineet

Hydraulista sideainetyyppiä käytettäessä päällysrakenteesta käytetään nimitystä puolijäykkä päällysrakenne, kun vastaavasti bitumista sideainetta käytettäessä päällysrakennetta kutsutaan joustavaksi päällysrakenteeksi. Käsite hydraulinen viittaa aineen kykyyn reagoida veden kanssa siten, että reaktion lopputuote on kiinteää sekä vedenkestävää ja sitä on mahdollista muodostua sekä ilmassa että vedessä. Veden

kanssa reagoiessaan hydraulisia ominaisuuksia omaava materiaali tuottaa rakenteeseen mekaanista lujuutta niin kutsuttujen hydrataatioreaktioiden seurauksena (Aalto-yliopisto 2015, Vehmas et. al 2015). Tierakenteen suunnitteluohje (Tiehallinto 2004) luokittelee hydraulisiksi stabiloinneiksi kaikki stabiloinnit, jotka:

- sisältävät 1,3 % sementtiä tai kalkkia
- eivät kestä suolaveden kemiallisia sidoksia kuormittavia vaikutuksia
- vesitiiviytensä johdosta mahdollistavat jäälinsien kerääntymisen stabiloinnin ja päällysteen väliin.

Edellä mainituissa luokitusperusteissa asetetun sementti- tai kalkkasideainepitoisuuden alarajasta johtuen hydraulisiksi stabiloinneiksi voidaan luokitella siis suurin osa käytetyistä stabilointimenetelmistä lukuun ottamatta bitumi- ja komposiittistabilointeja. Useissa tapauksissa stabiloinnin sideaineena käytettävät uusiomateriaalit, kuten masuunihiekka, teräskuona, ja lentotuhka voivat vaatia sementin tai kalkin lisäyksen sitoutumisen varmistamiseksi (Liikennevirasto 2014). Matinlaurin (2016) mukaan lujittumisominaisuuksia omaavat lentotuhkarakenteet ja terästeollisuuden sivutuotteita sisältävät rakenteet luokitellaan puolijäykiksi päällysrakenteiksi.

3.2.1 Sementti

Sementtistabilointityössä maa-aines lujitetaan sementtisineaineen avulla. Sementtistabiloinnissa käytetyn sideaineen määrä on pienempi kuin betonointityössä. Pienempi sideainemäärä ja usein käytössä ollut suhteittamaton runkoaines johtaa siihen, että sementtistabiloinnilla ei ole saavutettu betonin kaltaisia tiiveyksiä, vaan tyhjätillaa jää 10 - 15 %. (Tielaitos 1998)

Sementtistabiloinnin etuna bitumistabilointiin nähden on stabiloidun materiaalin kyky vastustaa deformaatiota korkeissa lämpötiloissa. Jäykän sementtistabiloinnin avulla saavutetaan bitumistabilointeja suurempi kantavuus. Sementtisineaine valmistetaan erilaisista seosaineista, kipsistä ja klinkkeristä. Klinkkeri luo sementille sen hydrauliset ominaisuudet.

Sementti on nopeasti sitoutuva sideaine. Sementin sitoutumisaikaa voidaan säätää siihen lisättävällä hidastimella, kuten esimerkiksi kipsillä, joka hidastaa sitoutumista (Aalto-

yliopisto 2015). Sementin ja veden välistä reaktiota kutsutaan hydrataatioreaktioksi. Teoriassa sementin täydelliseen hydrataatioon riittävä vesimäärä on noin 25 % sementin massasta, mutta todellisuudessa vettä joudutaan lisäämään 35-45 % sementin massasta, koska vettä myös sitoutuu fysikaalisesti niin sanottuihin geelihuokosiin (Virola et. al 2000).

Belgiassa, Ranskassa ja Espanjassa maabetonin/sementtistabiloinnin valmistuksessa on hyödynnetty sementtisideaineen ohella muita hydraulisia sideaineita, kuten masuunikuonaa ja lentotuhkaa. Tällaisissa sideaineseoksissa sementtisideaineen määrä on vaihdellut 15-40 % välillä. Masuunikuonan ja sementtisideaineen seoksissa rakenteen lujuus kehittyy hitaammin kuin pelkkää sementtisideainetta käytettäessä. Lujuuden hidasta kehittymistä on pidetty vahingollisena, sillä jos lujuuskehityksen alkuvaiheessa olevaa rakennetta kuormitetaan esimerkiksi liikenteen toimesta, voi rakenteen loppulujuus kärsiä. (Rahiala 1988)

Suomessa masuunikuonajauhetta voidaan käyttää ohjeistuksen mukaan maksimissaan 70 % sementtistabiloinnin hydraulisten sideainekomponenttien kokonaismäärästä. Tällöin sementtisideaineena on käytettävä CEM I - tai CEM II/A -sementtityyppejä. CEM II/B -tyypin sementtiä käytettäessä masuunikuonan osuus saa olla korkeintaan 50 %. Masuunikuonasementtityypin CEM III yhteydessä masuunikuonajauheen käyttö on kielletty. (Tiehallinto 2007 a)

Tielaitoksen (1992) mukaan sementillä stabiloidun rakenteen ominaispiirteinä ovat

- suuri puristuslujuus ja kimmomoduuli
- suuri kyky vastustaa muodonmuutoksia
- vähäinen palautumaton painuma kuormitettaessa
- halkeilu ja alhainen murtovenymä.

Sementtistabiloinnille tyypillinen halkeilu voi johtua kovettumisen yhteydessä ilmenevästä kutistumishalkeilusta, lämpötilaerojen aiheuttamista jännityksistä sekä dynaamisten liikennekuormien aiheuttamista taivutus-vetojännityksistä (Rahiala 1988). Sementillä stabiloidun kantavan kerroksen halkeilutaipumus on havaittavissa rakenteeseen syntyvinä poikkihalkeamina 10-50 metrin välein. Halkeamat heijastuvat

usein läpi tavanomaisista ohuista päällysteistä. Halkeilutaipumusta on pyritty aiemmin lieventämään vähäliikenteisillä teillä joko sementtistabiloinnin päälle rakennettavalla murskekerroksella tai valitsemalla kulutuskerrokseen päällystetyyppi, jonka sideaineena käytetään päällysteen sitkeysominaisuutta parantavaa kumibitumia. Murskekerroksen käytön vaatimuksiksi asetettiin silloin 100 mm paksuus ja 40 mm maksimiraekoko. (Tiehallinto 2002 a) Voimassa oleva tierakenteen suunnitteluohje ei kuitenkaan tunne enää tasaumurskekerroksen käyttöä stabiloinnin päällä, vaan sidotut kerrokset tulee olla liimattuna toisiinsa sideainetyypistä riippumatta (Tiehallinto 2004).

Sementtistabilointia pidetään käyttökelpoisena ratkaisuna kohteille, joissa vaaditaan suurta kantavuutta ja kuormituskestävyyttä sekä kohteille, joissa voidaan rakentaa ohuita rakennekerroksia. Sementtistabilointi soveltuu myös uusille tierakennuskohteille, jotka ovat rakennettu routimattomiksi (Tiehallinto 2007 a). Asemasekoitteen sementtistabiloinnin rakentamisen yhteydessä alustan tulee olla rakenteeltaan tasalaatuinen, oikeanmuotoinen sekä tasainen ja sen kantavuuden tulee olla vähintään 80 MPa. Lisäksi parannettavan osuuden heikosti kantavat kohdat tulee korjata ennen stabiloidun kerroksen rakentamista. (InfraRYL 2017)

3.2.2 Uusiomateriaalisideaineet

Masuunihiekka

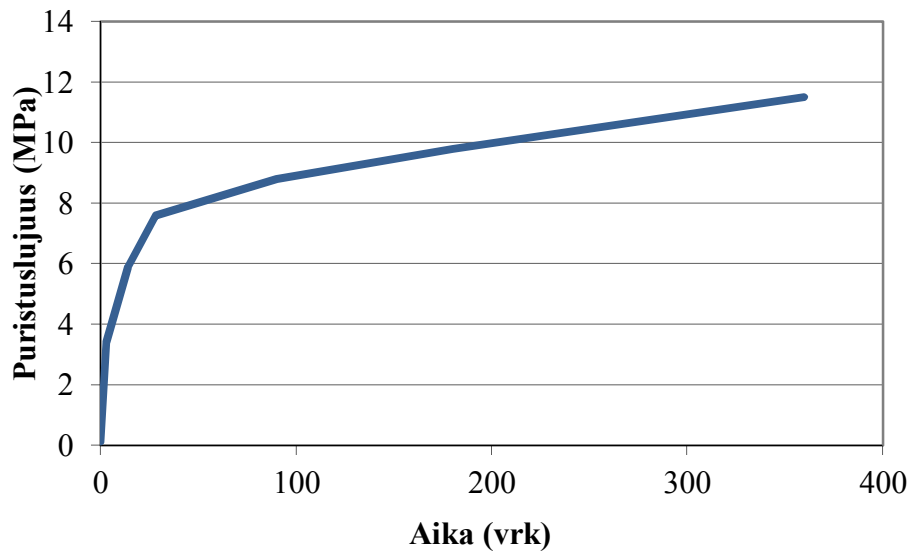
Terästeollisuudessa käytettävä raakarauta valmistetaan masuunissa raudantuojasta (sintteri, pelletti tai palamalmi), koksista ja kalkkikivestä, jolla säädetään syntyvän kuonan koostumusta. Masuunissa valmistuvaa rautatonnia kohti syntyy myös 150-250 kg masuunikuonaa. Masuunikuona koostuu rautamalmin sivukiven pelkistymättömistä oksideista, palaneen koksen tuhkasta ja kuonanmuodostajista. Kuona jää masuunissa kerrokseksi sulan raudan päälle, josta se lasketaan kuonassenkkoihin. Sulasta kuonasta voidaan valmistaa nopealla vesijähdytyksellä < 5 mm raekoon lasimaista kuonagranulia, joka on yleisin kuonankäsittelymenetelmä. Sula kuona voidaan myös käsitellä rummussa pienellä vesimäärällä kuonapelletiksi tai se voidaan kaataa sulana suoraan kuoppaan varastointialueella ja murskata jäähtymisen jälkeen. (Teknologiateollisuus ry. 2017) Masuunihiekkastabiloinnin sideaineena käytettävä masuunihiekka valmistetaan edellä kuvatulla nopealla vesijähdytysmenetelmällä eli granuloimalla. Masuunihiekan kemiallinen koostumus sisältää pääosin kalsium-, magnesium-, pii- ja

alumiiniyhdisteitä, jolloin sen koostumus on samankaltainen kuin sementin koostumus. Masuunihiekan sitoutumisominaisuudet eivät ole kuitenkaan yhtä voimakkaat kuin sementillä.

Masuunihiekan sitoutumisreaktio on hidas ja pääosa lujittumisesta tapahtuu kolmen kuukauden kuluessa. Sitoutumisreaktiota voidaan nopeuttaa käyttämällä aktivaattoria, kuten sementtiä, kuonajauhetta tai kalkkia, jota lisätään 0,5-1,5 % runkoaineen kuivamassasta. Kun stabiloinnin sideaineena käytetään pelkkää masuunihiekkaa, tulee sitä lisätä 5-15 % rakenteen painosta. Masuunihiekalla on kyky sitoutua uudestaan, mikäli sen avulla stabiloitu rakenne rikkoontuu esimerkiksi liikennekuormituksen tai epätasaisen routanousun vaikutuksesta. Masuunihiekkastabilointi soveltuu kohteille, joissa halutaan parantaa rakenteen kantavuutta sekä kohteille, joissa masuunihiekan hidasta sitoutumisaikaa voidaan hyödyntää. (Tiehallinto 2007 a)

Lentotuhka

Energiantuotantoprosessin eri vaiheessa syntyvillä tuhilla on maarakennuskäytön kannalta hyvin erilaisia ominaisuuksia. Merkittävin tuhkamateriaalin geoteknisiin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä on tuhkan lujittumisominaisuus. Tuhkien lujittuminen perustuu niiden hydraulisiin ominaisuuksiin. Lujittumisominaisuuden omaavia tuhkia voidaan käyttää sideainemaisesti stabiloinnissa. Lujittuvia lentotuhkia kutsutaan myös pozzolaaneiksi. Pozzolaanilla tarkoitetaan materiaalia, jolla on kyky muodostaa pysyviä sementtikiven kaltaisia hydrataatiotuotteita reagoidessaan kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kanssa (Aalto-yliopisto 2015). Lentotuhkien käyttö stabiloinnin sideaineena voi vaatia lisäksi pienen määrän sementtiä tai kalkkia, jonka tehtävänä on toimia aktivaattorina sitoutumisreaktiossa. Sementtisineaineen aktivaattorina toimiminen on havainnollistettu kuvassa 7, jossa on nähtävillä tuhka-sementti-sideaineseoksella stabiloidun materiaalin lujuuden kehittyminen ajan funktiona.



Kuva 7. Sementti-tuhka sideaineseoksella stabiloidun vanhan tierakenteen kantavan kerroksen murskeen yksiakiaalisen puristuslujuuden kehittyminen ajan suhteen (Ramboll 2006).

Lentotuhkien lujittumisominaisuuksiin vaikuttavat polttoprosessissa käytettävä polttoaine, tuhkapartikkelien muoto ja koko, vesipitoisuus ja materiaalin tiiveys. Lentotuhkan lujittuminen käynnistyy sen saadessa kosteutta. Käytännössä sideainekäyttöä varten lentotuhka tulisi varastoida kuivissa olosuhteissa, sillä suojaamattomana varastoidun tuhkan lujittumisominaisuudet ovat huomattavasti kuivana varastoitua tuhkaa alhaisemmat.

Rikinpoiston lopputuote

Rikinpoiston lopputuotetta syntyy kivihiilenpolton yhteydessä. Kivihiili sisältää palamatonta rikkiä, joka erotetaan polttoprosessin savukaasuista rikinpoistoprosessissa. Rikinpoistoprosessissa rikki sidotaan savukaasuista absorbentin avulla. Absorbentteina käytetään muun muassa kalsiumoksidia, kalsiumhydroksidia ja kalkkikiveä riippuen käytettävästä rikinpoistomenetelmästä. Parhaiten stabiloinnin sideainekäyttöön soveltuvaa rikinpoistonlopputuotetta syntyy kuivan- ja puolikuivan rikinpoistomenetelmän lopputuotteena. Puolikuivan menetelmän lopputuotteena saatava kalsiumsulfiitin, kalsiumsulfaatin, kalsiumhydroksidin ja lentotuhkan seos on sideainekäytön kannalta

huomattavasti märkämenetelmän lopputuotetta (kipsi) parempaa, sen sisältämän kalsiumhydroksidipitoisuuden johdosta. Vehmaksen (1995) mukaan rikinpoistotuotteiden käyttäminen maarakentamisessa edellyttää niiden sekoittamista lentotuhkan kanssa. Rikinpoistotuotteen ja lentotuhkan seokset ovat lujittuvia materiaaleja, seoksen ollessa hyvin tiivistettynä oikeassa vesipitoisuudessa. Lentotuhkasta ja rikinpoistotuotteesta edellä mainitulla tavalla toteutetun massiivirakenteen ominaisuudet vastaavat maabetonirakennetta. Tällaisen rakenteen lujuudenkehitystä voidaan parantaa lisäsideaineen, kuten sementin, masuunikuonan tai kalkin avulla. (Vehmas 1995)

Kipsi

Kipsiä syntyy Suomessa teollisuuden sivutuotteena muun muassa fosforihapon tuotannossa ja hiilivoimaloiden savukaasujen märkäpuhdistusprosessissa. Kipsiä käytetään sementtiteollisuudessa sementin sitoutumisreaktioiden säätelyssä hidastamaan sementin reaktioita. TVL:n (1979) tekemän tutkimuksen mukaan kipsillä voidaan sementin kanssa seostettuna parantaa stabiloitavan materiaalin lujittumista matalassa lämpötilassa. Tutkimuksessa havaittiin myös, että kipsin avulla voitiin korvata noin 1-2 % tarvittavasta sementtisineaineen määrästä, kun materiaalilta tavoiteltiin vastaavaa puristuslujuuden tasoa kuin pelkän sementtisineaineen tapauksessa. Kipsin käyttö tuhkapohjaisen sideaineseoksen osakomponenttina parantaa myös materiaalin pitkän ajan lujuuskehitystä.

Kalkki

Kalkkia käytetään stabiloinnin sideaineena kalsiumoksidi- ja kalsiumhydroksidimuodossa. Kalkki valmistetaan hyvälaatuisesta kalkkikivestä, jota voidaan louhia avolouhoksesta tai maanalaisesta kaivoksesta. Louhittu kalkkikivi murskataan ja seulotaan ennen varsinaista kalkin valmistusta, joka tapahtuu kalsinointimenetelmällä. Kalsinoinnissa murskattu kalkkikivi kuumennetaan korkeaan lämpötilaan, jolloin kalkkikiven sisältämä kalsiumkarbonaatti reagoi kalsiumoksidiksi. Kalsinoinnissa syntyvästä kalsiumoksidista (CaO) eli poltetusta kalkista voidaan valmistaa myös hydratoitua kalkkia (Ca(OH)₂), kun sen annetaan reagoida veden kanssa (NLA 2017). Poltetun kalkin toimintatapa stabiloinnin sideaineena perustuu sen kykyyn reagoida maamateriaalin huokosveden kanssa, jolloin siitä muodostuu kalsiumhydroksidia. Osa muodostuneesta kalsiumhydroksidista absorboituu maamateriaalipartikkeleihin.

Kalsiumhydroksidin ja maapartikkelien välillä tapahtuu ioninvaihtoreaktioita, jonka johdosta maamateriaali muuttuu kuivemmaksi ja karkeammaksi. (Åhnberg 2006)

Stabiloinneissa kalkkia voidaan käyttää hydraulisesti sitoutuvien sideaineiden, kuten esimerkiksi lentotuhkan aktivaattorikomponenttina. Aktivaattorikäytössä kalkki tuottaa hydraulisen pääsideainekomponentin lujittumisreaktiossaan tarvitseman kalsiumhydroksidin. Tarkkion (2014) mukaan kalkin käytöllä ei saavuteta kuitenkaan vastaavanveroista rakennetta lentotuhkan kanssa kuin sementtiaktivaattoria käytettäessä. Kalkkilaatuja on olemassa erilaisia, mutta stabilointiratkaisuissa yleisimmin on käytössä niin sanottu poltettu kalkki CaO ja hydratoitu kalkki Ca(OH)_2 . Kalsiumsilikaattien hydrataatiosta syntyvä kalsiumhydroksidi on reaktiivisempi kuin hydratoitunut kalkki, koska kalsiumsilikaateista muodostunut kalsiumhydroksidi on hyvin hienoa ja siten sekoittuu hyvin maa-ainekseen. (Sarkkinen et. al. 2016)

4 UUSIOMATERIAALISIDEAINESEOKSELLA STABILOITAVAN KANTAVAN KERROKSEN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Uusiomateriaalisideaineseoksella toteutettavan kantavan kerroksen stabilointirakenteen suunnittelu- ja mitoitusprosessin kulkua ohjaa ratkaisevasti se, että onko kysymyksessä uudisrakennuskohde vai olemassa olevan rakenteen parantamiskohde. Uudisrakennuskohteessa on usein mahdollista käyttää uutta laadukasta kiviainesta, jolloin stabiloidulla materiaalilla on mahdollista saavuttaa korkealuokkaisia ominaisuuksia. Vastaavasti rakenteen parantamiskohteissa suunnittelua ja mitoitusta rajoittavat usein olemassa olevien päällysrakennekerrosten heikko laatu sekä voimakkaasti roudan vaurioittamilla päällysrakenteilla esiintyvät puutteet kuivatuksessa ja alusrakenneolosuhteissa.

4.1 Kohdesuunnittelu

Olemassa olevan vanhan päällysrakenteen kantavan kerroksen stabiloinnin suunnittelun yhteydessä on tärkeää selvittää parannettavan päällysrakenteen eri rakennekerrokset ja niissä esiintyvät vaihtelut. Hyväksi havaittu menetelmä kohteen rakennekerrospaksuuksien ja -ominaisuuksien selvittämiseen on suorittaa kohteelle maatutkaluotaus ja koekuoppatutkimukset. Maatutkaluotauksen yhteydessä kohteelta voidaan kartoittaa osuudet, joihin koekuoppatutkimuksia on järkevä kohdentaa. Olemassa olevasta rakenteesta voidaan tällä menettelytavalla selvittää huonokuntoisten osuuksien tarkka sijainti. Huonokuntoisille osuuksille voidaan tarvittaessa kohdentaa kantavan kerroksen stabilointia raskaammat päällysrakenteen parantamistoimenpiteet, kuten esimerkiksi stabiloitavan kerroksen paksuuden kasvattaminen tai massanvaihdot. Koekuoppatutkimusten avulla voidaan selvittää kohteella esiintyvät olemassa olevat rakennekerrokset sekä ottaa samalla näytteet laboratoriossa suoritettavia tutkimuksia varten.

Kantavasta kerroksesta tulee ottaa näytteet riittävän useasta kohdasta, jotta voidaan selvittää tierakenteessa mahdollisesti esiintyvät laatuvaihtelut. Mikäli halutaan selvittää erityisesti kantavan kerroksen heikkolaatuisuutta, näytteenotto tulisi suorittaa ajouran kohdalta sekä erikseen kantavan kerroksen yläosasta ensimmäisen 100 mm paksuudelta (Tiehallinto 2005). Kuvassa 8 on esitetty Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteella

tehtävää näytteenottoa ja kantavan kerroksen laadun tutkimista koekuoppa-tutkimusmenetelmällä.

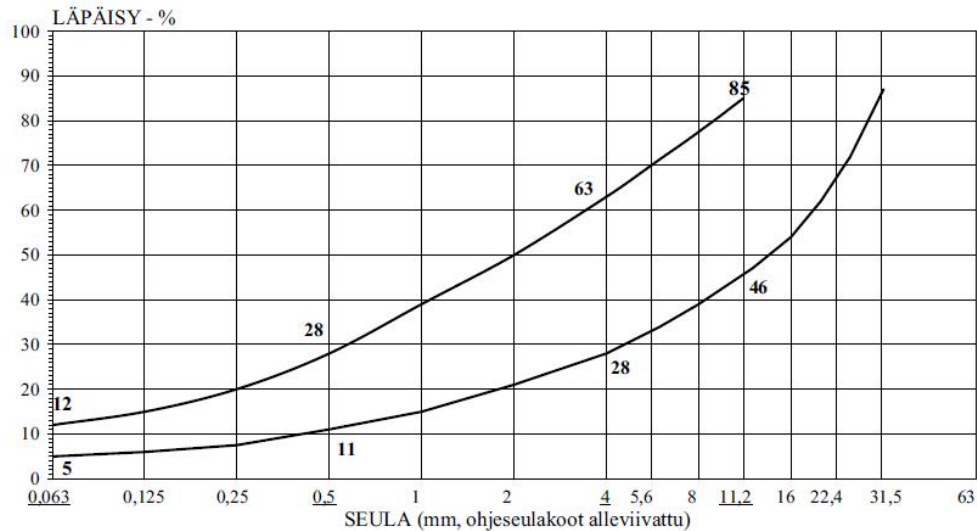


Kuva 8. Koekuoppatutkimus Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteella (Ramboll 2005).

Stabiloitavan kerroksen optimaalisen suhteituksen kannalta vanhan tierakenteen materiaalin stabiloitavuutta tulee tutkia laboratorio-olosuhteissa useista eri koekuopista otettujen näytteiden sekä eri kuopista otettujen näytteiden kokoomanäytteestä. Tästä huolimatta vanhan tierakenteen murskeessa voi esiintyä kuitenkin ennalta arvaamatonta laatuvaihtelua, joka voi vaikuttaa stabiloidun kerroksen ominaisuuksiin ja edelleen saavutettavan rakenteen tasalaatuisuuteen.

Rakenteen parantamiskohteiden kantavan kerroksen stabilointityössä vanha päällyste usein sekoitusjyrsitään asfalttirouheeksi vanhan tierakenteen kantavan kerroksen sekaan. Asfalttirouheet ovat hyvin tasalaatuisia ja niiden muotoon voi vaikuttaa hieman jyrsittävän päällysteen tyyppi ja käytössä ollut jyrsintämuoto (Tiehallinto 2005). Sekoitusjyrsintätyössä muodostuva asfalttirouhemäärä riippuu vanhan asfalttipäällyste-kerroksen paksuudesta. Sekoitusjyrsinnän jälkeen vanhasta päällysteestä muodostuneesta asfalttirouheesta tulee osa uuden kantavan kerroksen runkomateriaalia, jolloin se vaikuttaa osaltaan muodostuvan runkoainesmateriaalin rakeisuuteen. Asfalttirouhetta

ja vanhan tierakenteen materiaalia sisältävän stabilointimassan rakeisuus tulisi olla Tiehallinnon (2007 a) ohjeistuksen mukaan kuvassa 9 esitetyn rakeisuuskäyrän alueella.



Kuva 9. Rakeisuuden yleinen ohjealue bitumi-, komposiitti-, ja sementtistabiloinnin kiviainekselle (Tiehallinto 2007 a).

4.2 Stabilointimassan suhteitus

Stabilointimassan koostumuksen suunnittelua kutsutaan suhteitukseksi. Suhteitustyö voidaan tehdä joko kokemusperäisesti tai kokeellisesti. Kokemusperäistä suhteitustapaa voidaan käyttää ainoastaan bitumistabilointimenetelmän yhteydessä. Muiden stabilointimassatyypin osalta suhteitus on tehtävä aina kokeellisesti. Suhteituksen lähtökohtana on uusiomateriaalisideaineseosten osalta ollut materiaalien saatavuus lähialueiden tuottajilta sekä kokemusperäinen tieto materiaalien yhteensopivuudesta. Kokeellinen suhteitustyö suoritetaan valmistamalla laboratoriossa rakennuskohteessa käytettäväksi suunnitelluista materiaaleista useita erilaisia materiaalikoostumuksia omaavia näytteitä. Valmistetusta näytesarjasta tutkitaan keskeisimmät ominaisuudet (taulukko 1), joiden perusteella valitaan rakennuskohteessa käytettävä materiaalikoostumus.

Taulukko 1. Uusiomateriaalisideaineseoksella toteutettavan stabiloinnin materiaalikoostumuksen suunnittelua tukevat laboratoriokokeet.

Ominaisuus	Testausmenetelmä	Standardi tai ohjeistus
Lujuus	Yksiakiaalinen puristuskoe	CEN ISO/TS 17892-7:fi
Jäädytys-sulatuskestävyys	Jäädytys-sulatuskoe	VTT:n testiehdotelma
Routimisherkyys	Vakiolämpötilakoe	TPPT 6
Rapautuvuus	Pakkasrapautumiskestävyys	PANK-4305
Vedenimeytyminen	Upotuskoe	SFS-EN 1097-6
Tiivistävyys	Parannettu Proctor-koe	SFS-EN 13286-2

Hydraulisesti sidottujen stabilointimassojen tapaan uusiomateriaalisideaineseoksen osuus stabilointimassan materiaalikoostumuksesta määräytyy vertailemalla 28 ja 90 vuorokauden lujittumisajan jälkeen saavutettavaa yksiakiaalista puristuslujuutta sekä materiaaliseoksen kykyä kestää (28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen) Suomen ilmasto-olosuhterasituksia simuloivia rasisuskokeita. Materiaaliseoksen kestoä rasisuskokeen kuormitusta vastaan arvioidaan määrittämällä materiaalin yksiakiaalinen puristuslujuus rasisuskokeen jälkeen. Saatua tulosta verrataan samasta materiaalikoostumuksesta valmistetusta (28 vuorokauden ikäisestä) kappaleesta määritettyyn puristuslujuuteen ilman, että materiaaliseosta on rasisuskoestettu. Yksiakiaalinen puristuslujuus määritetään kaavalla (1):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

missä σ on puristusjännitys (kPa)

F on kappaleeseen vaikuttanut voima murtumishetkellä (N)

A on kuormitettavan kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala (m²)

Stabilointimassan optimivesipitoisuus tiivistettävyyden kannalta määritetään usein vain yhdestä materiaaliseoksesta, sillä runkoaineen laatu on optimivesipitoisuuden ja tiivistettävyyden kannalta sideainekoostumusta tai sidekoostumuksen suhteellista osuutta materiaalikoostumuksesta määräävämpi tekijä. Runkoaineen laadusta riippuen Proctor-kokeen tuloksena määritettävää optimivesipitoisuutta voidaan joutua kasvattamaan, jotta saavutetaan tavoiteltu tiiveysaste. Päällysrakenteen stabilointiohjeessa (Tiehallinto 2007 a) on esitetty, että kokeellisessa suhteituksessa näytteiden tavoitetiiveysasteen tulisi olla 96 % parannetusta Proctor-tiiveydestä.

Hydraulisille stabiloinneille on asetettu materiaaliominaisuuksia koskevia vaatimuksia ainoastaan sementti- ja masuunihiekkastabiloinnille, jotka koemateriaalien tulee täyttää kokeellisessa suhteituksessa suoritettujen kokeiden jälkeen. Esimerkiksi jäädytys-sulatuskokeen jälkeen hyväksyttävä yksiaksiaalisen puristuslujuuden alenema on sementtistabiloinnilla 33 % ja masuunihiekkastabiloinnilla 60 %. (Tiehallinto 2007 a) Kiviniemi et. al (2012) mukaan tuhkasideaineseoksella stabiloitavan materiaalin puristuslujuuden alenema jäädytys-sulatuskokeessa tulisi olla alle 20 %. Lisäksi yleisenä vaatimuksena kaikille stabilointityypeille on routimattomuus. Stabiloitava materiaali ei saa olla routivaa ja se ei saa muuttua routivaksi, mikäli sideaineen sidokset murtuisivatkin ajan saatossa (Tiehallinto 2004).

4.3 Kuormituskestävyysmitoitus

Tierakenteen kuormituskestävyydellä tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa liikennesäätöä johtuvia muodonmuutoksia ja jännityksiä siten, että rakenteessa ei tapahdu haitallisia vaurioita tai deformaatiota. Tierakenteen kokonaispaksuus määräytyy usein kuitenkin routamitoituksen perusteella. Kuormituskestävyysmitoituksessa määritetään sittemmin saadun kokonaispaksuuden avulla päällysrakennekerrosten paksuudet riittävän kantavuuden saavuttamiseksi. Perinteisten rakenneratkaisuiden tapauksessa kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävät kuormitusluokat ja tavoitekantavuudet valitaan päällystetyypin ja kuormituskertaluvun avulla. Kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävän kuormitusluokan perusteella määräytyy myös stabiloidun kantavan kerroksen yhteydessä käytettävän päällysteen vähimmäispaksuus. Esimerkiksi sementtistabiloinnin yhteydessä päällysteen vähimmäispaksuus on 80-130 mm kuormitusluokkien 0,8-25 AB välillä (Tiehallinto 2004).

Tierakenteen kuormituskestävyysmitoitus tehdään yleensä Odemarkin kaavalla (2) ja sen lisäehdoilla. Vaihtoehtoisena mitoitustapana voidaan käyttää monikerroslaskentaa, joka tulee kysymykseen erikseen määrättäessä.

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

- missä EA on mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)
 EP on mitoitettavankerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa)
 E on mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuli (MPa)
 h on mitoitettavan kerroksen paksuus (m)
 a on Levykuormituslaitteiston kuormituspinnan säde (0,15 m)

Odemarkin mitoitusmenetelmä toimii perinteisten päällysrakennetyyppien osalta, joista on kokemusta. Odemarkin mitoitusmenetelmässä oletetaan rakenteen jäykkyyden korreloivan rakenteen kestävyuden kanssa, mikä voi muodostua ongelmalliseksi hauraan jäykän rakennekerroksen tapauksessa. Kerroksellisen tierakenteen toimivuuden kannalta kriittisimmiksi tekijöiksi on todettu sidotun rakennekerroksen alaosaan syntyvän vetojännitys ja alusrakenteen yläosaan syntyvä puristusjännitys (Matinlauri 2016). Tarkkion (2014) mukaan jäykkien lentotuhkarakenteiden suunnittelussa voisi olla hyvä käyttää vaakasuorat jännitykset huomioivaa mitoitustapaa, jolloin tuhkarakenne voitaisiin suunnitella ilman että rakenteeseen syntyy vetoa. Uusiomateriaaleja hyödyntävän stabiloidun kantavan kerroksen mitoitus olisi kuitenkin ensiarvoisen tärkeä kyetä tekemään samoilla mitoitusperiaatteilla kuin tavanomaisten rakenneratkaisujen tapauksessa.

Hydraulisen stabiloinnin kuormituskestävyysmitoituksessa stabiloinnin alustalle asetetaan 80 MPa:n laskennallinen kantavuusvaatimus. Stabiloidun kerroksen vähimmäispaksuuden tulee olla kaksi kertaa suurempi kuin suurimman raekoon halkaisija. Käytännön kokemukset ovat osoittaneet, että uusiomateriaalisideaineilla stabiloitavan kantavan kerroksen paksuuden tulisi olla yli 200 mm ja mielellään jopa yli 250 mm (Jyrävä 2017).

4.4 Routamitoitus

Routa on Suomen olosuhteissa tierakennetta eniten kuormittava ympäristötekijä. Roudan koko tierakennetta koskeva kuormitusvaikutus syntyy pääasiassa sitomattomissa rakennekerroksissa ja tien alusrakenteessa (Ehrola 1996). Maa-ainesten routaantuessa sen sisältämä huokosvesi jäätyy ja maakerros kovettuu. Routa on ongelmallista tierakenteen toiminnan kannalta silloin, kun tien päällystys- tai alusrakenteessa esiintyvään routivaan materiaaliin on mahdollista kulkeutua vettä jäätyessä. Jäätyneen seurauksena materiaalin tilavuus kasvaa, kun jäätyneeseen virtaava vesi jäätyy. (Oulun yliopisto 2013) Materiaalin tilavuuden kasvun seurauksena maakerroksen pintakerroksessa tapahtuu routanousua. Routivan alustan ollessa sekalaatuista, routimisesta aiheutuu epätasaista routanousua, joka johtaa pituus- suuntaisiin halkeamiin ja epätasaisuuksiin (Tiehallinto 2004). Pohjamaan ollessa tasaista, routanousu on tasaista. Tasainen suuri routanousu aiheuttaa pituus- suuntaisia halkeamia erityisesti kapeilla teillä. Suuren routanousun toistuminen tai epätasainen sulaminen johtaa pysyviin epätasaisuuksiin ja halkeamiin.

Routanousua voi esiintyä myös päällysrakennekerroksessa, mikäli siihen on päässyt imeytymään runsaasti vettä esimerkiksi puutteellisen kuivatuksen seurauksena. Päällysrakennekerroksessa tapahtuva routanousu heikentää rakenteen tiiviyyttä ja kevyällä roudan sulaessa rakenne voi tiivistyä uudelleen, jolloin päällyste voi deformoitua. (Matinlauri 2016) Epätasaisen routanousun korjaamisen kannalta pysyvä ratkaisu saadaan aikaiseksi routaeristysratkaisuilla tai vaihtoehtoisesti rakentamalla vaurioitunut osa kokonaan uudelleen. Kun rakennekerrokset uusitaan kokonaisuudessaan, uusi päällysrakenne routamitoitetaan ja rakennusala homogenisoidaan. Routaeristeen käyttö routaheittojen korjaamisessa soveltuu kohteille, joissa pohjamaaolosuhteet ovat vaihtelevia, osuudella esiintyy useita heittoja ja kallion pinnanvaihtelut ovat äkillisiä (Tiehallinto 2005).

Päällysrakenteen pintakerrokseen asennetut routaeristerakenteet voivat estää lämmön siirtymisen päällysrakenteen alaosaan ja alusrakenteesta päällysteen pintaan. Estynyt lämmön siirtyminen kasvattaa päällysteen pinnan jäänmuodostumisriskiä (Watn et. al 2004). Liukkausriskin vähentämiseksi päällysrakennekerrokset tehokkaan routaeristeen päällä tulee rakentaa mineraalimaakerroksista ja mineraalimaakerroksen paksuus tulee

olla vähintään 0,7 metriä päällysteet mukaan lukien (RIL 261 - 2013). Forsmanin (2017) mukaan 0,7 metriä ohuempi paksuus voi olla riittävä. Stabiloidun murskerakenteen kerroksen sisältämän päällysrakenteen yhteydessä liiallisesta eristävydestä aiheutuva liukkausriski on pieni, sillä stabiloidun materiaalin vastaavuus eristävyden kannalta (a_i) on 1,0 (Kiviniemi et. al 2012). Sen sijaan stabiloidun tuhkarakenteen routaeristävyys ($a_i = 1,6$) voi aiheuttaa ongelmia tien kunnossapidon ja liikenneturvallisuuden kannalta. Esimerkiksi Inkoon (Yt 11146) koerakennuskohteen massiivituhkarakenteosuudella on havaittu vertailurakennetta useammin toistuvaa päällysteen pinnan jäätymistä.

Tierakenteen laskennallinen routanousu (RN_{lask}) mitoitetaan kaavalla (3), kun rakenteessa käytetään routimattomia materiaaleja.

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 \text{ jne.}) * t/100 \quad (3)$$

missä RN_{lask} on laskennallinen routanousu (mm)

S on mitoitusroudansyvyys (mm)

R_i on routimattoman kerroksen paksuus (mm), i on kerroksen numero

a_i on materiaalin vastaavuus eristävyden kannalta

t on alusrakenteen routaturpoama (%)

Kun tien päällysrakenteessa käytetään lievästi routivia materiaaleja, kuten jakavan kerroksen moreenimurske tai lievästi routiva suodatinhiekkä, laskennallinen routanousu määritetään kaavalla (4)

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 - a_{rva} * R_{rva} \text{ jne.}) * t/100 + R_{rva} * t_{rva}/100 \quad (4)$$

missä RN_{lask} on laskennallinen routanousu (mm)

S on mitoitusroudansyvyys (mm)

R_i on routimattoman kerroksen paksuus (mm), i on kerroksen numero

a_i on materiaalin vastaavuus eristävyden kannalta

t on alusrakenteen routaturpoama (%)

- R_{rva} on routivan kerroksen paksuus (mm)
 a_{rva} on routivan kerrosmateriaalin vastaavuus eristävyuden kannalta

Kuivatus

Kuivatuksen avulla huolehditaan veden poistumisesta väylärakenteesta ja sen pinnalta. Pintakuivatuksen avulla huolehditaan rakenteen pinnalle kertyvän tai ympäristöstä kulkeutuvan huleveden poistaminen pintakaltevuuksien avulla sivuojiin, sadevesikaivoihin tai koururakenteisiin. Puutteellisesta pintakuivatuksesta ja päällysteen halkeilusta voi aiheutua tierakenteeseen päätyvän vajoveden määrän lisääntyminen, joka tehostuu riittämättömän kaltevuuden ja päällysteen urautumisen seurauksena. (Tiehallinto 2002 c)

Hydraulisella sideaineella sidotulla rakenteella kuivatus on erittäin tärkeä tekijä rakenteen toiminnan kannalta. Hydraulisesti sidottuun rakenteeseen ei saisi päästä vettä rakenteen ylä- tai alaosan kautta. Stabiloitu ehjä rakennekerros läpäisee vettä huonosti. Esimerkiksi Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteen kantavan kerroksen stabilointia varten tehdyistä koekappaleista määritetyt vedenläpäisevyysarvot olivat luokkaa 10^{-6} - 10^{-7} m/s. Tämän johdosta sementtiä sisältävien hydraulisten stabilointien käyttö tie-rakenteen kantavassa kerroksessa vaatii kuivatuksen kannalta poikkeavia ratkaisuja, verrattuna sitomattomista materiaaleista rakennettuun päällysrakenteeseen, jossa päällysteen läpi suotautunut vajovesi on suunniteltu johdettavaksi rakennekerrosten läpi pohjamaanahan.

Päällysteen läpi kulkeutunut vesi voi jäätyessään vaurioittaa sekä kantavan kerroksen sidottua rakennetta että päällystettä. Lisäksi päällysteen pinnalta voi liueta sade- ja sulamisvesiin liukkauden torjunnassa käytettyjä kemikaaleja, joista erityisesti suolaveden on todettu rapauttavan sementillä sidottuja materiaaleja. Lisäksi tien reunalle syntynyt palle heikentää pintakuivatuksen toimivuutta, koska se estää veden kulkeutumista sivuojiin (Kiemunki 2012). Pintakuivatuksen lisäksi tierakenteen alempien kerroksien syväkuivatus on yhtäläillä tärkeää, koska alempiin rakennekerroksiin jäävä vesi mahdollistaa rakenteen routimisen ja heikentää kuormitus-

kestävyyttä. Syväkuivatuksesta huolehtiminen voidaan toteuttaa rakenteen parantamiskohteilla parantamalla olemassa olevien avo-ojien ja rumpujen kuntoa.

Kantavan kerroksen päälle suunniteltavan päällystetyypin valinnan yhteydessä on huomioitava stabiloidun kerroksen vesitiiviys. Vesitiivis stabilointi asettaa päällysteelle vesitiivisyysvaatimuksen, koska jos vesi pääsee päällysteen läpi, se kerääntyy vesitiiviin stabiloidun kerroksen pintaan. Stabiloidun kerroksen pintaan kerääntynyt vesi voi jäätyessään irroittaa yläpuolisen päällysteen (Tiehallinto 2004). Suolattaville teille rakennettavien sementti- ja masuunihiekkastabilointien päälle ohjeistetaan rakennettavaksi vähintään 70 mm:ä paksu päällyste, kun päällystetyyppinä käytetään asfalttibetonia. Asfalttibetonin tyhjätila saa tällöin olla yksittäisestä näytteestä mitattuna korkeintaan 5 % (Tiehallinto 2007 a).

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

5.1 Kohdetutkimukset

Työhön valittiin tutkittavaksi eri-ikäisiä asfalttipäällystettyjä päällysrakennekohteita, joissa kantava kerros on stabiloitu. Koerakennuskohteissa lähtökohdat ovat olleet toisistaan poikkeavia, sillä rakenteen parantamisen lisäksi osalla kohteista on suoritettu pelkän kantavan kerroksen stabiloinnin lisäksi myös järeämpiä rakenteen parantamistoimenpiteitä tai rakennettu kokonaan uutta päällysrakennetta. Koerakennuskohteiden tarkastelu pohjautuu rakentamisen ja seurannan aikana syntyneeseen dokumentaatioon, Liikenneviraston julkaisemaan avoimeen mittausdataan sekä tässä työssä suoritettujen maastotutkimusten yhteydessä tehtyihin havaintoihin.

Tämän työn puitteissa ei ollut mahdollista suorittaa yksityiskohtaista tarkastelua kaikille koerakennuskohteille. Yksityiskohtaisempi maastotutkimus tehtiin kohteissa, joista oli saatavilla vähemmän seuranta-aineistoa. Lisäksi tarkasteltavaksi valittiin myös kohteita, joista uusi seuranta-aineisto voisi olla hyvin yhdistettävissä aikaisempien seuranta-tutkimuksen yhteydessä tuotetun aineiston kanssa. Aineiston yhdistämisen avulla voidaan saada entistä kattavampi käsitys rakenteen pitkäaikaiskäyttäytymistä koerakennusolosuhteita vastaavassa päällysrakenteessa. Vauriokartoituksen ja rakennäytteenoton sisältämistä seuranta-tutkimuksista päädyttiin rajaamaan pois Inkoon (Yt 11146) koerakennuskohde. Tarkempiin tutkimuksiin valittiin viisi kohdetta, jotka on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Työssä tutkitut vuosien 2004-2010 aikana toteutetut kantavan kerroksen uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidut koerakenteet.

Kohde	Tie	Rakennusvuosi	Seuranta- ajanjakso	Stabiloinnin paksuus (mm)	Päällyste	KVL (KVLRAS) ajon./vrk
Rautavaara	87	2004	2004-2008	250 ja 300	PAB-B 16/100	442 (63)
Teuroinen	14547	2006	2006-2007	250 ja 300	AB ja PAB 16/100	170 (15)
Hanhikemppi	14800	2007	2007	300	AB 16/100	236 (8)
Seppola Kaipola	- 16563	2010	2010-2013	250	AB 22/120	1823 (157)
Hiidenmäki Vaheri	- 16573	2010	2010-2013	250	AB 22/100	604 (24)

Osassa koerakennuskohteista esiintyi kantavan kerroksen stabilointirakenteen lisäksi myös muita uusiomateriaalirakennetyyppejä, joita ei käsitellä tässä diplomityössä. Koerakennuskohteiden suunnittelun ja rakentamisen erityispiirteet sekä aikaisemmin toteutetussa seurannassa tehtyjä havaintoja on käsitelty rakentamista- ja seuranta tarkastelevissa raporteissa (taulukko 3).

Taulukko 3. Tutkittujen koerakennuskohteiden rakentamista ja seuranta koskevat raportit.

Koerakennus- kohde	Raportit			
	Rakentaminen	Seuranta	Seuranta	Seuranta
Inkoo (Yt 11146)	Ahlqvist (2000)	Ramboll (2008 a)	Tarkkio (2014)	-
Rautavaara (Kt87)	Tiehallinto (2005 a)		Ramboll (2008 b)	-
Teuroinen (Yt 14547)	Hietala (2008 a)		-	-
Hanhikemppi (Yt 14800)	Hietala (2008 b)		-	-
Seppola-Kaipola (Yt 16563)	Kiviniemi (2010)	Kiviniemi (2011)	Kiviniemi (2012)	Tarkkio (2014)
Hiidenmäki- Vaheri (Yt 16573)	Kiviniemi (2010)	Kiviniemi (2011)	Kiviniemi (2012)	Tarkkio (2014)

5.1.1 Päälystevaurioinventointi

Työhön tutkittavaksi valittujen kohteiden vaurioitumista tarkasteltiin visuaalisen vaurioinventoinnin avulla, jonka suorittaminen on kuvattu Tielaitoksen vuonna 1994 julkaisemassa menetelmäohjeessa (Tielaitos 1994). Vaurioinventoinnissa mitatuista havainnoista lasketaan tienkäyttäjän vauriosumma ($m^2/100\text{ m}$) käyttämällä mitattujen vaurioiden kertoimina taulukossa 4 esitettyjä kertoimia.

Taulukko 4. Tienkäyttäjän vauriosummaa laskettaessa käytettävät kertoimet (Petäjä & Spoof 2001).

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

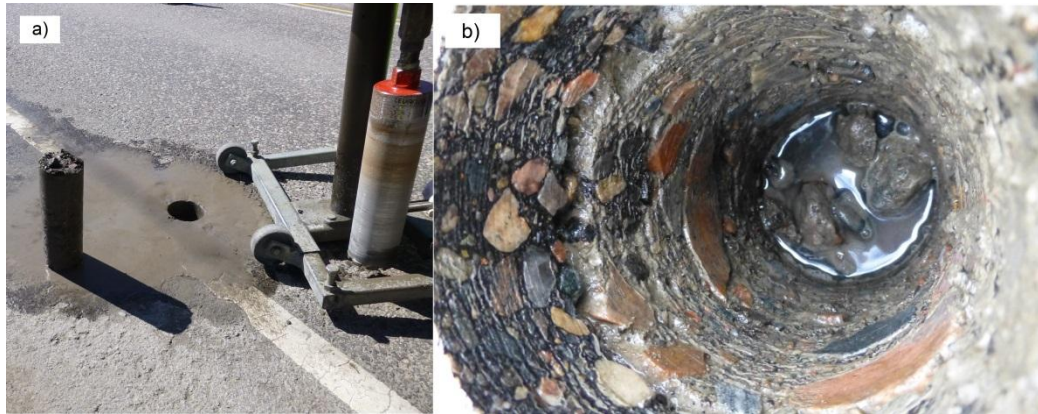
Tienkäyttäjän vauriosumman määrittämisen avulla pyrittiin arvioimaan erilaisiin olosuhteisiin rakennettujen koerakennuskohteiden kuntoluokkaa taulukossa 5 esitetyn määritelmän mukaisesti. Lisäksi vauriosumman kehittymistä tarkasteltiin kohteilla, joilla oli aiempina vuosina suoritettu vauriokartoitus. Vauriokartoitustyö ajoitettiin tehtäväksi toukokuun loppuun, koska aikaisemmat vauriokartoitukset oli tehty myös kyseisenä ajankohtana.

Taulukko 5. Kuntoluokkien määrittäminen vauriosumman perusteella 100 metrin jaksoissa (Tiehallinto 2005 b).

KVL (ajon./vrk)	Nopeusrajoitus (km/h)	Vauriosumman raja-arvot kuntoluokittain (m ² /100m)				
		Erittäin hyvä	Hyvä	Tyydyttävä	Huono	Erittäin huono
6000 ^	120	≤ 5,0	5,1-15,0	15,1-60,0	60,1-90,0	> 90,1
	100	≤ 5,0	5,1-15,0	15,1-60,0	60,1-90,0	> 90,1
	80	≤ 5,0	5,1-15,0	15,1-60,0	60,1-90,0	> 90,1
	≤ 60	≤ 5,0	5,1-15,0	15,1-60,0	60,1-90,0	> 90,1
1500-6000	100	≤ 5,0	5,1-15,0	15,1-60,0	60,1-90,0	> 90,1
	80	≤ 5,0	5,1-20,0	20,1-70,0	70,0-100,0	> 100,1
	≤ 60	≤ 5,0	5,1-25,0	25,1-80,0	80,1-110,0	> 110,1
350-1500	100	≤ 5,0	5,1-35,0	35,1-90,0	90,1-130,0	> 130,1
	80	≤ 5,0	5,1-40,0	40,1-100,0	100,0-140,0	> 140,1
	≤ 60	≤ 10,0	10,1-45,0	45,1-110,0	110,0-150,0	> 150,1
< 350	100	≤ 10,0	10,1-55,0	55,1-130,0	130,0-180,0	> 180,1
	80	≤ 10,0	10,1-65,0	65,1-140,0	140,0-190,0	> 190,1
	≤ 60	≤ 10,0	10,1-70,0	70,1-150,0	150,0-200,0	> 200,1

5.1.2 Rakennetutkimukset

Koerakennuskohteiden stabiloitua kerrosta tutkittiin poranäytteenotoilla. Stabiloidun kantavan kerroksen rakennetutkimuksissa poraus suoritetaan päällysteen läpi aina jakavan kerroksen yläpintaan saakka. Porauksen yhteydessä mitataan saadusta näytekappaleesta päällysteen paksuus ja näytekappaleen pituus. Poraukset tehtiin samoista poikkileikkauksista kuin kohteille aiemmin tehdyt koeporaukset. Tällä menettelytavalla poranäytteenotossa tehtäviä havaintoja voidaan verrata aiemmissa tutkimuksissa tehtyihin havaintoihin stabiloidun kantavan kerroksen eheydestä. Lisäksi poranäytekappaleiden puristuslujuuden määrittämisessä saatavia tuloksia voidaan verrata aiemmin saatuihin tuloksiin lujuuden kehityksen arviointia varten. Kuvassa 10 on esitetty poranäytteenoton välineistöä, saatu poranäyte ja porareikästä otettu valokuva kerrosrakenteesta.



Kuva 10. Stabiloidun kantavan kerroksen rakennetutkimus. Poranäytteenoton välineistöä ja porattu näytekappale (a) sekä valokuva poratusta reiästä (b) (16.5.2017, Ilari Harju).

5.2 Laboratoriokokeet

5.2.1 Yksiakselialinen puristuskoe

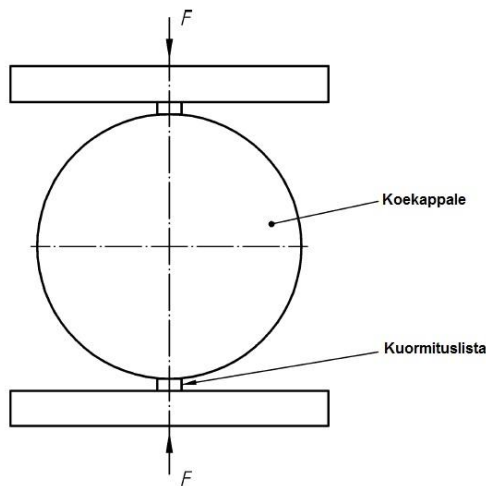
Tässä työssä rakennekerroksen lujuuden pitkäaikaista kehittymistä tutkittiin määrittämällä porattujen näytekappaleiden yksiakselialinen puristuslujuus standardin SFS 179 – 2 – CEN ISO/TS 17892-7.fi mukaisesti. Poratut näytekappaleet valmistettiin puristuslujuuden määrittämistä varten laboratoriossa siten, että näytekappaleen halkaisija/pituus-suhde on 1 ja koestettava näyte on stabiloidun kerroksen keskiosasta. Puristuskoetta varten lieriön muotoisen näytekappaleen (kuva 11) molemmat päät tasattiin sementtilaastin avulla.



Kuva 11. Yksiakiaalista puristuskoetta varten valmisteltu näyttekappale, jonka päät on tasattu sementtilaastilla (26.5.2017, Ilari Harju).

5.2.2 Epäsuora vetokoe

Stabiloidut materiaalit lukeutuvat kontinuumimateriaaleihin, joilla on vetolujuusominaisuuksia. Vetolujuus voidaan määrittää halkaisuvetolujuutena tai taivutusvetolujuutena. Tässä työssä tutkittiin materiaalin halkaisuvetolujuutta epäsuoran vetolujuuden määrittystavalla (kuva 12), jota kutsutaan myös Brasiliankokeeksi (Tammirinne et. al 2000). Koe suoritettiin standardissa SFS-EN 13286 – 42 kuvattujen ohjeiden mukaisesti.



Kuva 12. Koejärjestely epäsuoran vetolujuuden määrittämisessä (Suomen standardisoimisliitto 2003, muokattu).

Epäsuoran vetolujuuden määrittämistä varten mitattiin koestettavan kappaleen halkaisija ja korkeus. Koestuksen aikana mitattiin kappaletta kuormittavaa voimaa sekä kirjattiin kappaleeseen kohdistunut voima murtumishetkellä. Epäsuora vetolujuus voidaan määrittää kaavalla 5. (Suomen Standardisoimisliitto 2003)

$$R_{it} = \frac{2 * F}{\pi * l * d} \quad (5)$$

missä R_{it} on epäsuora vetolujuus (MPa)

F on kappaleeseen vaikuttanut puristusvoima murtumishetkellä (N)

l on kuormitettavan kappaleen pituus (mm)

d on kuormitettavan kappaleen halkaisija (mm)

5.3 Muut menetelmät

5.3.1 PTM-mittaukset

Tien päällysteen kuntoa mitataan palvelutasomittauksilla (PTM). PTM-mittauksia suoritetaan vilkkaasti liikennöidyltä verkolta vuosittain ja vähäliikenteisiltä teiltä harvemmin. PTM-mittaukset suoritetaan jatkuvatoimisena mittauksena mittausautoon asennettujen mittauslaitteiden avulla. Palvelutasomittauksissa tien päällysteestä mitataan pituus- ja poikkisuuntaista epätasaisuutta kuvaavia tunnuslukuja, joita ovat urasyvyys (URA, mm), tasaisuus (IRI, mm/m), sivukaltevuus ja harjanteen korkeus (mm). Mitattavien tunnuslukujen avulla voidaan luokitella päällystetyn tien kuntoa. (Tiehallinto 2001) Taulukoissa 6 ja 7 on esitetty luokitusperusteet mitatun urasyvyyden ja IRI-arvon perusteella.

Taulukko 6. Kuntoluokkien määrittäminen urasyvyyden perusteella 100-metrin jaksoissa (Tiehallinto 2007 e).

KVL (ajon./vrk)	Nopeusrajoitus (km/h)	Urien raja-arvot kuntoluokittain				
		Erittäin hyvä	Hyvä	Tyydyttävä	Huono	Erittäin huono
6000 Λ	120	≤ 5,0	5,1-8,0	8,1-13,0	13,7-17,0	> 17,0
	100	≤ 5,0	5,1-9,0	9,1-14,0	14,1-18,0	> 18,0
	80	≤ 5,0	5,1-10,0	10,1-15,0	15,1-19,0	> 19,0
	≤ 60	≤ 5,0	5,1-11,0	11,1-17,0	17,1-20,0	> 20,0
1500-5999	100	≤ 6,0	6,1-10,0	10,1-14,0	14,1-19,0	> 19,0
	80	≤ 6,0	6,1-11,0	11,4-15,0	15,1-20,0	> 20,0
	≤ 60	≤ 6,0	6,1-12,0	12,1-17,0	17,1-21,0	> 21,0
350-1499	100	≤ 7,0	7,1-11,0	11,1-15,0	15,1-20,0	> 20,0
	80	≤ 7,0	7,1-12,0	12,1-16,0	15,1-21,0	> 21,0
	≤ 60	≤ 7,0	7,1-13,0	13,1-18,0	18,1-22,0	> 22,0

Taulukko 7. Kuntoluokkien määrittäminen IRI-arvojen perusteella 100-metrin jaksoissa (Tiehallinto 2007 e).

KVL (ajon./vrk)	Nopeusrajoitus (km/h)	Tasaisuuden raja-arvot kuntoluokittain				
		Erittäin hyvä	Hyvä	Tyydyttävä	Huono	Erittäin huono
≥ 6000	120	≤ 1,0	1,01-1,4	1,41-1,8	1,81-2,8	> 2,8
	100	≤ 1,0	1,01-1,6	1,61-2,2	2,21-3,2	> 3,2
	80	≤ 1,2	1,21-2,0	2,01-2,8	2,81-3,8	> 3,8
	≤ 60	≤ 1,2	1,21-2,4	2,41-3,6	3,61-4,6	> 4,6
1500-5999	100	≤ 1,0	1,01-1,8	1,81-2,6	2,61-3,6	> 3,6
	80	≤ 1,2	1,21-2,2	2,21-3,2	3,21-4,2	> 4,2
	≤ 60	≤ 1,4	1,41-2,6	2,61-4,0	4,01-5,0	> 5,0
350-1499	100	≤ 1,2	1,21-2,2	2,21-3,2	3,21-4,4	> 4,4
	80	≤ 1,4	1,41-2,4	2,41-3,8	3,81-5,0	> 5,0
	≤ 60	≤ 1,6	1,61-3,0	3,01-4,6	4,61-5,8	> 5,8
< 350	100	≤ 1,4	1,41-2,6	2,61-4,0	4,01-4,8	> 4,8
	80	≤ 1,6	1,61-2,8	2,81-4,6	4,61-5,8	> 5,8
	≤ 60	≤ 1,8	1,81-3,4	3,41-5,4	5,41-6,0	> 6,6

5.3.2 Pudotuspainolaitemittaukset

Tierakenteen käyttäytymistä liikennekuormituksessa voidaan simuloida kantavuusmittauksissa käytettävällä pudotuspainolaitteella. Pudotuspainolaitemittauksessa laitteiston massa pudotetaan kuormituslevylle, joka välittää putoavan massan aiheuttaman voiman tierakenteeseen. Pudotuspainolaitteessa käytetään yleisimmin 10 tonnin akselipainon omaavan kuorma-auton aiheuttamaa 50 kN:n ekvivalenttivoimaa. Putoava massa aiheuttaa tierakenteeseen painuman, jota mitataan anturien avulla kuormituslevyn alla sekä eri etäisyyksillä kuormituslevystä. Taipumamittausanturien etäisyyksiä voidaan pudotuspainolaitteessa usein säätää portaattomasti, mutta etäisyyksillä 0, 300, 600 ja 900 mm:ä kuormituslevystä sijaitsevia antureita tulee käyttää. Yhdistämällä eri etäisyyksillä sijaitsevien anturien rekisteröimät taipumat, voidaan määrittää kuormituksen tierakenteeseen aiheuttama taipumakuvio eli taipumasuppilo. Taipumasuppilon muotoa tarkastelemalla voidaan arvioida tierakenteen eri kerrosten kuntoa ja ominaisuuksia kuvaavia parametreja, jotka on esitetty taulukossa 8. (Petäjä & Spoof 2000)

Taulukko 8. Pudotuspainolaitemittauksen taipumasuppilosta määritettäviä parametreja (Petäjä & Spoof 2000).

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	μm	Kuvaa päällysrakenteen yläosan kuntoa
Base Curvature Index, BCI	$d_{n-1}-d_n$	μm	Kuvaa päällysrakenteen alaosan kerrosten / pohjamaan kuntoa
Base Damage Index, BDI	d_1-d_r	μm	Kuvaa päällysrakenteen kuntoa

Taipumasuppiloparametreista laskettavien SCI- ja BCI-indeksien avulla voidaan Euroopan Unionin alueilla toteutettujen Roadex-projektien yhteydessä koottujen asiantuntijankemysten mukaan luokitella tien kuntoa (taulukko 9). (Roadex Network 2017)

Taulukko 9. Suositeltavat BCI- ja SCI-arvojen raja-arvot eri tyyppisillä teillä (Roadex Network 2017).

Luokka	Ohutpäällysteiset tiet ja soratiet		Päällystetyt tiet	
	SCI (μm) 0 - 200 mm	BCI (μm) 900 - 1200 mm	SCI (μm) 0 - 200 mm	BCI (μm) 900 - 1200 mm
Hyvä	< 180	< 10	< 120	< 10
Riittävä	180 - 300	10 - 30	120 - 200	10 - 30
Puutteellinen	180 - 300	30 - 60	200 - 250	30 - 40
Huono	300 - 600	60 - 120	250 - 400	40 - 60
Erittäin huono	> 600	> 120	> 400	> 60

5.3.3 Materiaalin jäykkyysominaisuuksien määrittäminen

Hydraulisilla sideaineilla sidotun murskeen käyttäytyminen kuormitustilanteessa oletetaan olevan lineaarisesti kimmoista. Lineaarisesti kimmoisen materiaalin jännityksen ja venymän suhde on lineaarinen, jolloin se noudattaa Hooken lakia. Kun lineaarisesti kimmoista materiaalia kuormitetaan yksiakselisessa puristuskokeessa, Hooken laki voidaan esittää yhtälön 6 muodossa

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} * 100 \% \quad (6)$$

missä ε on materiaalin suhteellinen muodonmuutos (%)
 σ on jännitys (Pa)
 E on muodonmuutosmoduuli (Pa)

Puristuskokeessa määritetystä jännitys-muodonmuutoskuvaajasta voidaan määrittää edellä mainitun Hooken lain perusteella materiaalin muodonmuutosmoduuli. E_{50} -muodonmuutosmoduuli määritetään 50 % materiaalin murtotilaa vastaavan jännityksen aikana mitatun suhteellisen muodonmuutoksen suhteesta. 0 – 50 % jännitysväliltä määritettyä moduulia kutsutaan myös materiaalin sekanttimoduuliksi. Muodonmuutosmoduulilla voidaan arvioida toteutetun rakenteen kantavuusominaisuuksia.

Materiaalin E-moduuliarvoa voidaan arvioida myös Odemarkin laskentakaavalla tehtävän takaisinlaskennan avulla. Odemarkin laskentakaavan käyttö takaisinlaskennassa edellyttää rakenteelle tehtyjä kantavuusmittauksia, tietoa rakennettujen kerrosten paksuuksista ja kantavuuksista sekä tiedon pohjamaan kantavuusominaisuudesta.

Pudotuspainolaitemittausten parametrien avulla voidaan takaisinlaskea rakennekerroksen muodonmuutosmoduuli. Kaavassa 7 esitetty pintamoduuli kuvaa rakenteen muodonmuutosmoduulia taipuma-anturin etäisyyttä (r) vastaavalta ekvivalenttisyvyydeltä. (Petäjä & Spoof 2000)

$$E_r = \frac{(1 - \nu^2) * \sigma_0 * a^2}{r * d_r} \quad (7)$$

missä E_r on pintamoduuli (MN/m²)
 ν on Poissonin luku (vakio)
 σ_0 on kosketuspaine (MN/m²)
 a on kuormituslevyn säde (m)
 r on taipuma-anturin etäisyys kuormituslevystä (m)
 d_r on taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä (m)

5.3.4 Vaurioitumisnopeuden vertailu

Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloitavan kantavan kerroksen sisältämän päällysrakenteen vauriokehitystä ja pitkäaikaiskestävyyttä tutkittiin vertailemalla rakenteen vaurioitumista vaihtoehtoisten rakenneratkaisujen vaurioitumiseen. Vertailtavia stabilointirakenteita tutkimuksessa edustivat Vöyrin (Mt 718) koerakennuskohteelle toteutetut stabilointiosuudet, joissa on käytetty erilaisia sideaineseoksia ja rakennekerrospaksuuksia. Vertailtavaa vaihtoehtoista rakennetyyppiä tutkimuksessa edusti Rautavaaran (Kt 87) koerakennuskohteen itä- ja länsipuolelle toteutettu teräsverkkorakenne. Näissä kohteissa vertailtavat parametrit edustivat PTM-mittaus tuloksista saatavia tasaisuuden (IRI) ja urasyvyyden arvoja.

Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen urautumista verrattiin myös sitomattoman kantavan kerroksen sisältämän rakenteen urautumiseen. Hanhikempin (Yt 14800) ja Seppola-Kaipola (Yt 16563) ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteiden yhteyteen on toteutettu rakentamisen yhteydessä myös osuuksia, joissa päällysteen alapuoliset kerrokset on rakennettu sitomattomista materiaaleista. Koerakennuskohteiden yhteydessä olevat vertailuosuudet ovat kuitenkin lyhyitä, jolloin niissä havaittavan urautumisen vertaaminen tutkittavien koerakenteiden välillä ei ole perusteltua. Koeosuuksilta voidaan tehdä kuitenkin vertailevia havaintoja päällysteen vaurioitumisesta. Tässä työssä koerakennuskohteiden päällysteen urautumista verrattiin Suomen tieverkkotasolta mitattuihin urasyvyksiin. Dettenborn (2017) on laatinut tätä tutkimusta varten mallit päällysteen urautumisesta tutkittuja koerakennuskohteita vastaavissa olosuhteissa. Olosuhdetekijät urautumismallin laadinnassa ovat olleet:

- Tieluokka
- Päällystetyyppi
- Pohjamaalaji
- Tien leveys
- Keskivuorokausiliikenne

6 TUTKIMUSTULOKSET

6.1 Koerakenteiden kunto

Vauriokartoituksessa tehdyistä havainnoista laskettiin kohdekohtaiset tienkäyttäjän vauriosummat (taulukko 10). Vauriosummien keskiarvon perusteella Rautavaaran (Kt 87) ja Hanhikempin (Yt 14800) ovat kuntoluokaltaan tyydyttäviä. Teuroisten (Yt 14547), Seppola-Kaipola (Yt 16563) ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteiden kuntoluokka on hyvä. Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteen vauriosumman maksimiarvon suuruus suhteessa kohteen vauriosumman keskiarvoon kuvaa kohteella esiintyneiden yksittäisiä huonokuntoisia osuuksia.

Taulukko 10. Tutkittujen koerakennuskohteiden tienkäyttäjän vauriosummat 2017.

Kohde	KVL (KVLRAS) ajon./vrk	Rakennus vuosi	Tienkäyttäjän vauriosumma (m ² /100m)					
			Maksimi	Minimi	Keski arvo	Ala- kvartiili	Ylä- kvartiili	Kehitys- nopeus
Rautavaara (Kt 87)	442 (63)	2004	240,5	11,8	80,4	17,1	118,4	6,2
Hanhikemppi (Yt 14800)	236 (8)	2007	248,5	0	78,6	0	139,7	7,9
Teuroinen (Yt 14547)	170 (15)	2006	431,4	0	59,5	1,5	81	5,4
Seppola- Kaipola (Yt 16563)	1823 (157)	2010	226,5	0	12,8	0	9,6	1,8
Hiidenmäki – Vaheri (Yt 16573)	604 (24)	2010	60,3	0	8,2	0	10,8	1,2

Teuroisten (Kt87) ja Hanhikempin (Yt 14800) koerakennuskohteet sijoittuvat alempiasteiselle tieverkolle, joka lienee syynä siihen ettei niille ole suoritettu PTM-mittauksia rakentamisen jälkeen. Taulukoihin 11 ja 12 on koottu IRI-arvot ja urasyvytydet uusiomateriaalisidaineseoksella toteutetuista Jämsän (16563 ja 16573) ja Rautavaaran (Kt 87) kantavan kerroksen stabilointikohteista. Lisäksi taulukoissa on esitetty referenssinä Vyörin (Mt 718) koerakennuskohteelta sekä Rautavaaran (Kt 87) teräsverkkorakenneosuudelta mitatut arvot. IRI-keskiarvojen perusteella koerakennuskohteiden kuntoluokka on hyvä lukuun ottamatta Inkoon (Yt 11146) koerakennuskohdetta, jonka kuntoluokka on tyydyttävä.

IRI-tasaisuuden kehittymistä vertailtaessa on huomioitava kohteelle suoritettujen PTM-mittausten eriaikainen ajoittuminen rakennusvuoteen nähden, mikä on huomioitava tuloksia vertailtaessa. Maksimiurasyvyyden kasvun osalta on puolestaan huomioitava kohteella vallitsevat liikennemäärät. PTM-mittaustuloksia käsiteltäessä seurantamittaus-tulosten joukosta poistettiin havainnot, jotka olivat pienempiä kuin edeltävässä mittauksessa määritetty arvo. Käytetty tarkastelutapa on perusteltavissa sillä, että tien päällysteen kunto ei voi parantua mittausten välillä ilman että mittavan kohteen päällysteelle on kohdistettu ylläpitotoimenpiteitä. Tällä tavoin mittausvirheet eivät vääristä laskelmien avulla määritettävän PTM-tunnusluvun kasvunopeuden kehittymistä tarkasteltavalla ajanjaksolla liian alhaiseksi.

Taulukko 11. Stabiloidun kantavan kerroksen sisältämien rakenteiden ja vertailurakenteiden tasaisuus.

Kohde	Menetelmä /paksuus (mm)	KVL (KVLRAS) ajon./vrk	Rakennus -vuosi / PTM-mittaus-vuosi	IRI-keskimääräinen kasvunopeus (mm/m/v) kehitys ajanjaksolla	IRI (mm/m)		
					Maksimi/Minimi	Keski-arvo	Alakvartili/Yläkvartili
Kt 87	KSTAB/250	442 (63)	2004/2012	0,09 (2008-2012)	3,23/0,50	1,44	0,99/1,73
Kt 87	Teräsverkko	442 (63)	2004/2012	0,07 (2008-2012)	4,49/0,74	1,65	1,03/2,07
Yt 16563	STAB/250	1823 (157)	2010/2016	0,14 (2014-2016)	4,67/0,80	1,62	1,23/1,83
Yt 16573	STAB/250	604 (24)	2010/2015	0,21 (2014-2015)	4,86/0,69	1,59	1,24/1,85
Yt 11146	STAB/250	509 (59)	2000/2015	0,17 (2008-2015)	6,36/1,01	3,11	2,26/3,74
Yt 11146	VBST/150	509 (59)	2000/2015	0,19 (2008-2015)	9,40/1,38	3,19	1,66/4,11
Mt 718	KOST/150	754 (84)	2004/2014	0,13 (2008-2010)	2,71/1,11	1,9	1,44/2,34
Mt 718	KOST/100	754 (84)	2004/2014	0,18 (2008-2010)	6,84/1,11	2,35	1,59/2,72
Mt 718	MHST/100	754 (84)	2004/2014	0,17 (2008-2014)	3,81/1,26	2,24	1,73/2,45
Mt 718	MHST/150	754 (84)	2004/2014	0,21 (2008-2014)	6,06/1,24	2,64	1,81/3,24
Mt 718	REST/TS	754 (84)	2004/2014	0,17 (2008-2014)	3,20/1,56	2,35	1,77/2,99
Mt 718	REST/100	754 (84)	2004/2014	0,39 (2008-2014)	3,20/1,56	2,35	1,77/2,99
Mt 718	REST/150	754 (84)	2004/2014	0,39 (2008-2014)	3,20/1,56	2,35	1,77/2,99
Mt 718	REST/PER1	754 (84)	2004/2014	0,23 (2008-2014)	5,28/1,44	2,82	2,05/3,35
Mt 718	REST/PER2	754 (84)	2004/2014	0,11 (2008-2014)	3,48/1,62	2,31	1,92/2,55
Mt 718	VBST/100	754 (84)	2004/2014	0,18 (2008-2014)	4,95/1,10	2,37	1,72/2,93
Mt 718	VBST/150	754 (84)	2004/2014	0,27 (2008-2014)	4,79/1,71	3,01	2,28/3,54

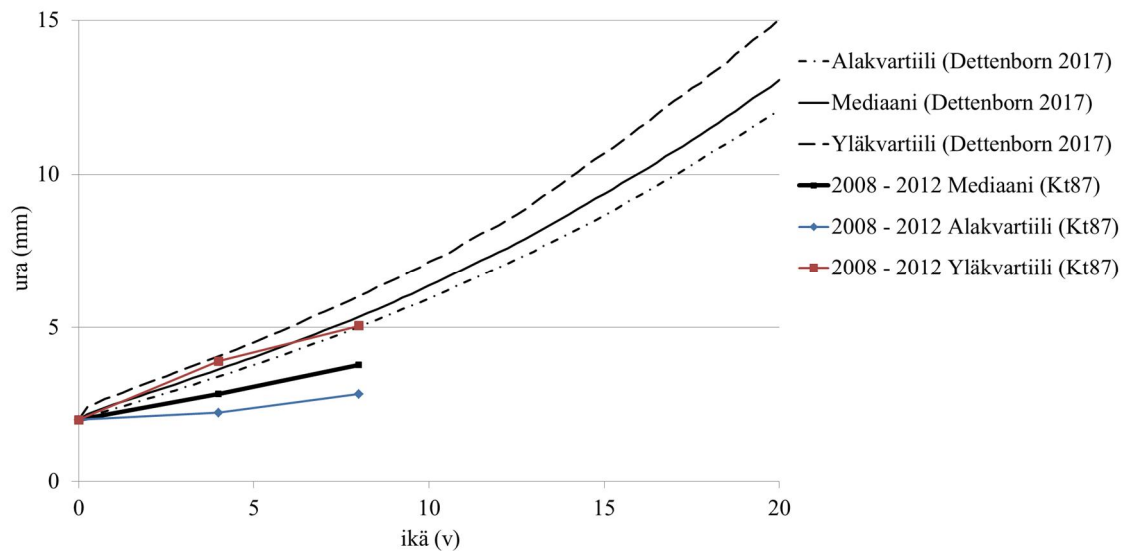
Taulukko 12. Stabiloidun kantavan kerroksen sisältämien rakenteiden ja vertailurakenteiden urasyvyys.

Kohde	Menetelmä /paksuus (mm)	KVL (KVLRAS) ajon./vrk	Rakennusvuosi / PTM-mittausvuosi	Uramax kasvunopeus (mm/m/v) kehitys ajanjaksolla	URAmx (mm)		
					Maksimi/Minimi	Keski arvo	Alakvartii/Yläkvartii
Kt 87	STAB/250	442 (63)	2004/2012	0,28	10,79/1,51	4,24	2,84/5,06
Kt 87	Teräsverkko	442 (63)	2004/2012	0,22	9,96/1,32	3,82	2,37/4,71
Yt 16563	STAB/250	1823 (157)	2010/2016	0,69	11,73/2,82	6,86	6,05/7,69
Yt 16573	STAB/250	604 (24)	2010/2015	0,58	18,71/1,54	4,89	3,70/5,49
Yt 11146	STAB/250	509 (59)	2000/2015	0,80	25,21/1,92	7,59	3,67/9,84
Yt 11146	VBST/150	509 (59)	2000/2015	1,09	29,13/1,02	9,61	3,18/14,44
Mt 718	KOST/150	754 (84)	2004/2014	0,29	8,29/2,73	4,96	3,36/6,86
Mt 718	KOST/100	754 (84)	2004/2014	0,31	12,30/1,6	5,1	3,21/7,05
Mt 718	MHST/100	754 (84)	2004/2014	0,78	15,48/4,53	9,75	6,74/12,14
Mt 718	MHST/150	754 (84)	2004/2014	0,96	22,03/4,20	11,55	6,54/14,85
Mt 718	REST/TS	754 (84)	2004/2014	0,67	14,65/6,59	8,68	6,77/9,91
Mt 718	REST/100	754 (84)	2004/2014	0,89	18,77/6,81	10,89	7,67/12,06
Mt 718	REST/150	754 (84)	2004/2014	0,9	19,84/7,13	10,99	8,34/13,57
Mt 718	REST/PER1	754 (84)	2004/2014	0,74	12,74/7,13	9,36	7,80/10,72
Mt 718	REST/PER2	754 (84)	2004/2014	0,79	19,84/2,57	9,91	4,10/14,33
Mt 718	VBST/100	754 (84)	2004/2014	0,71	18,50/2,58	9,11	6,41/10,75
Mt 718	VBST/150	754 (84)	2004/2014	0,63	9,46/3,52	6,33	5,14/7,31

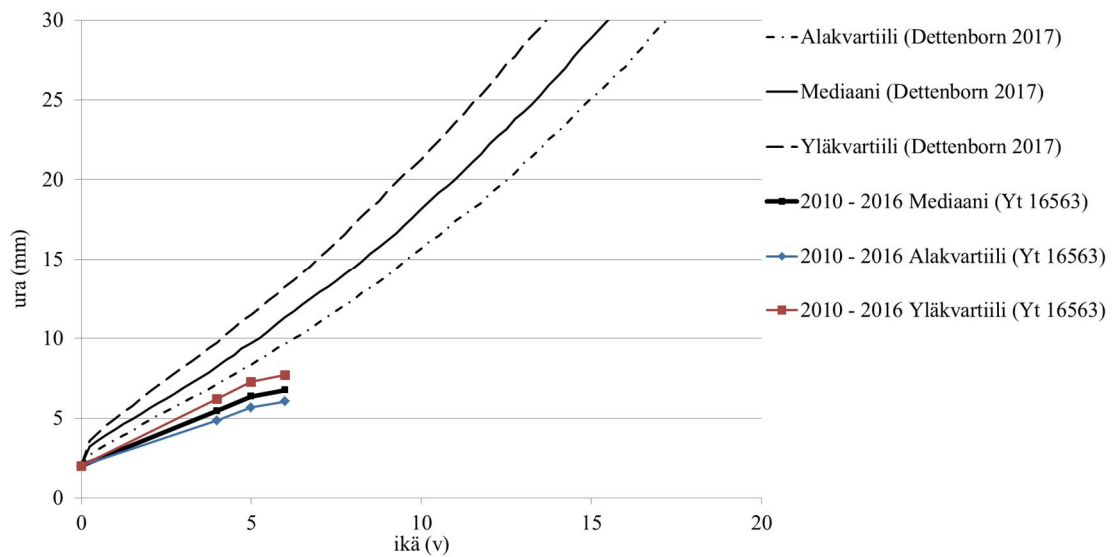
Taulukossa 12 esitettyjen maksimiurasyvyyden keskiarvojen perusteella koerakennuskohteiden kuntoluokka on hyvä lukuun ottamatta Rautavaaran (Kt 87) ja Hiidenmäki – Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteita sekä Vöyrin (Mt 718) komposiittistabilointiosuutta (KOST), joissa kuntoluokka on erittäin hyvä. Vöyrin (Mt 718) komposiittistabilointiosuuden urasyvyyden kehittyminen on ollut hitaampaa, kuin koerakennuskohteen muilla stabilointiosuuksilla.

Kuvissa 13 - 15 on tarkasteltu Jämsän ja Rautavaaran koerakennuskohteiden urautumista verrattuna Dettenbornin (2017) laatimiin malleihin Suomen tieverkko-tasolla havaittavaan urautumiseen koerakennuskohteita vastaavissa olosuhteissa. Kuvissa 13 - 15 on havaittavissa koerakennuskohteilta mitatun urautumisen hitaampi kehittyminen laadittuihin malleihin verrattuna. Urautumista vertailtaessa on

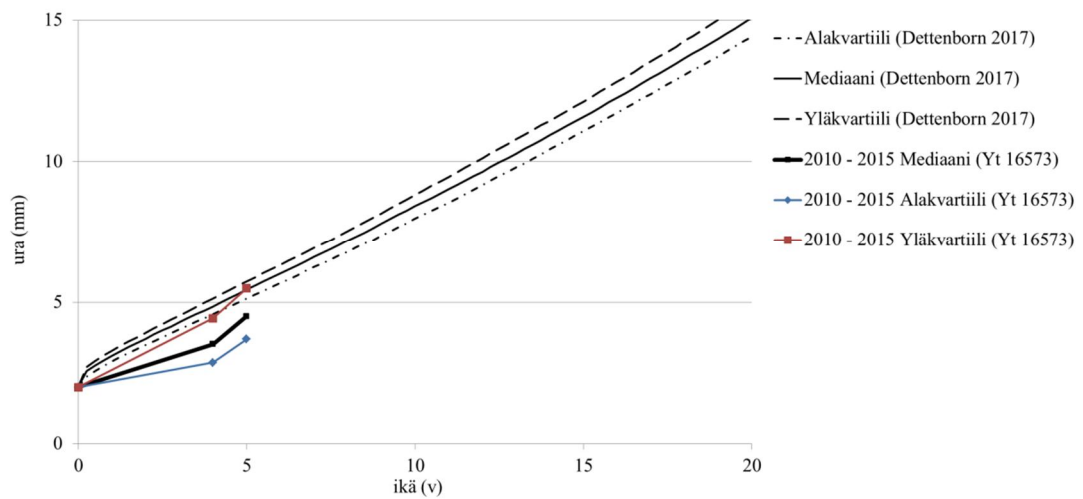
huomioitava, että Suomen tieverkolla päällystekerrosten alapuoliset kerrokset ovat yleensä rakennettu sitomattomista materiaaleista. Koerakennuskohteilla päällysteen paksuudet vaihtelevat välillä 40-50 mm. Koerakennuskohteiden päällystepaksuudet ovat Tierakenteen suunnitteluohjeessa (Tiehallinto 2004) esitettyä minipaksuutta (80 mm) ohuempia. Urautumista tarkasteltaessa on tehty oletus päällysteen alku-urautumisesta ajanhetkellä 0 vuotta, jonka suuruudeksi on arvioitu 2,0 mm.



Kuva 13. Rautavaaran (Kt87) koerakennusosuuden urautuminen vuosina 2008 - 2012.



Kuva 14. Seppola-Kaipola (Yt 16563) koerakennuskohteen urautuminen vuosina 2010 - 2016.



Kuva 15. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteen urautuminen vuosina 2010 – 2015.

6.2 Kantavuus

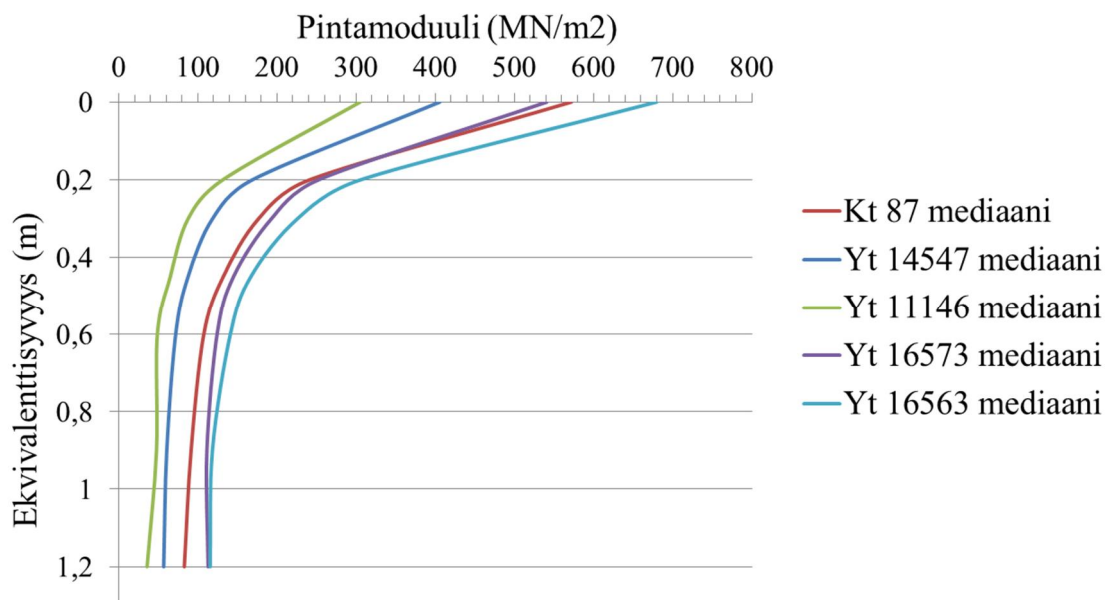
Tämän tutkimuksen yhteydessä koerakennuskohteille ei suoritettu uusia pudotuspainolaitemittauksia rakenteiden kantavuuden määrittämiseksi, vaan mittaustulokset on kerätty aiemmin suoritetuista mittauksista. Kohdekohtaisesti määritetty laskennallinen kantavuus ja pudotuspainolaitemittaustulosten mittausarvoista laskettujen parametrien

mediaaniarvot on esitetty taulukossa 13. Kaikilla koerakennuskohteilla mitatut kantavuudet (E2_T) ovat tavoitekantavuutta suurempia.

Taulukko 13. Koerakennuskohteille tehtyjen pudotuspainolaitemittausten tulokset.

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

Tutkimuskohteille mitatuista taipumasuppiloista määritettiin pintamoduulikuvaajat. Kuvassa 16 on esitetty tutkimuskohteille mitattujen taipumasuppiloiden mediaaniarvoista määritetyt pintamoduulikuvaajat.



Kuva 16. Tutkimuskohteiden taipumasuppiloiden mediaaniarvoista määritetyt pintamoduulikuvaajat.

Kuvan 16 pintamoduulikuvaajista on havaittavissa, kuinka ekvivalenttisyvyysvälillä noin 0-0,3 sijaitseva jäykkä stabiloitu kantava kerros vaikuttaa mitatun pintamoduulin suuruuteen ja muuttaa kyseisellä välillä kuvaajien kulmakertoimia voimakkaasti.

6.3 Yksiaksaalinen puristuslujuus

Tässä tutkimuksessa suoritetun rakennenäytteenottotyön yhteydessä porattujen kappaleiden yksiaksaalisessa puristuskokeessa määritetyt puristuslujuudet ja niistä lasketut E50-moduuliarvot on esitetty taulukossa 14. Taulukkoon on koottu lisäksi aikaisemman rakennenäytteenoton yhteydessä määritetyt puristuslujuudet sekä koerakennuskohteiden ennakkokokeiden laboratoriolujuudet. Puristuslujuustuloksia tarkasteltaessa on huomioitava poranäytteenotossa näytteeseen kohdistuva mekaaninen rasitus, joka voi pahimmassa tapauksessa rikkoa rakennenäytteen. Taulukon 14 tulokset kuvaavat rakenteen lujuuden pitkäaikaiskehitystä ja lujuuden säilymistä kuormitettuna.

Taulukko 14. Koerakennuskohteilta vuonna 2017 porattujen näytteiden puristuskoetulokset ja jännitys-muodonmuutoskuvaajista lasketut E₅₀-moduulit.

Kohde	Rakennus -vuosi	Poraukset /Saadut näytteet 2017 (kpl)	Puristuslujuus (MPa)				E50 - sekanttimoduuli, 2017 (MPa)	
			Ennakkokoe	Aiemmat tulokset / Vuosi	Keski-arvo (2017)	Mediaani (2017)	Keski arvo	Mediaani
Kt87	2004	13/6	4,8	3,56/2005	3,83	3,9	254	211
Yt 14547	2006	14/12	4,0 - 6,0	4,67/2006	7,47	8,22	613	542
Yt 14800	2007	4/4	3,0 - 4,0	2,37/2007	3,58	3,58	431	444
Yt 16563	2010	7/5	3,5	4,3/2013	3,31	2,93	378	364
Yt 16573	2010	5/3	3,3	3,3/2013	3,18	3,56	354	354

6.4 Materiaalin jäykkyys

Stabiloidun murskeen jäykkyysmoduulia (E-moduuli) tutkittiin rakennenäytteiden yksiaksiaalisten puristuskokeiden avulla määritettyjen E_{50} -sekanttmoduulien (taulukko 14) lisäksi myös Odemarkin mitoitusyhtälön (kaava 2) avulla tehdyllä takaisinlaskennalla. Takaisinlaskennassa tarkasteltiin Rautavaaran (Kt87), Teuroisten (Yt 14547), Seppola-Kaipola (Yt 16563) ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteita (taulukko 15). Takaisinlaskenta suoritettiin samoille paalulukemille, joista on porattu rakennenäytteitä seurantatutkimuksissa. Käytettävissä ollut aineisto on kuitenkin erittäin pieni, joka on syytä huomioida laskennan tuloksia tarkasteltaessa.

Takaisinlaskennassa hyödynnettiin kantavuuden lisäksi pudotuspainolaitemittauksista määritettyjä pintamoduuleja. Pintamoduulien avulla pyrittiin arvioimaan stabiloidun kantavan kerroksen alapuolisten rakennekerrosten kantavuusominaisuuksia. Odemarkin mitoitusyhtälön avulla tehdyt takaisinlaskennat on esitetty liitteessä 4.

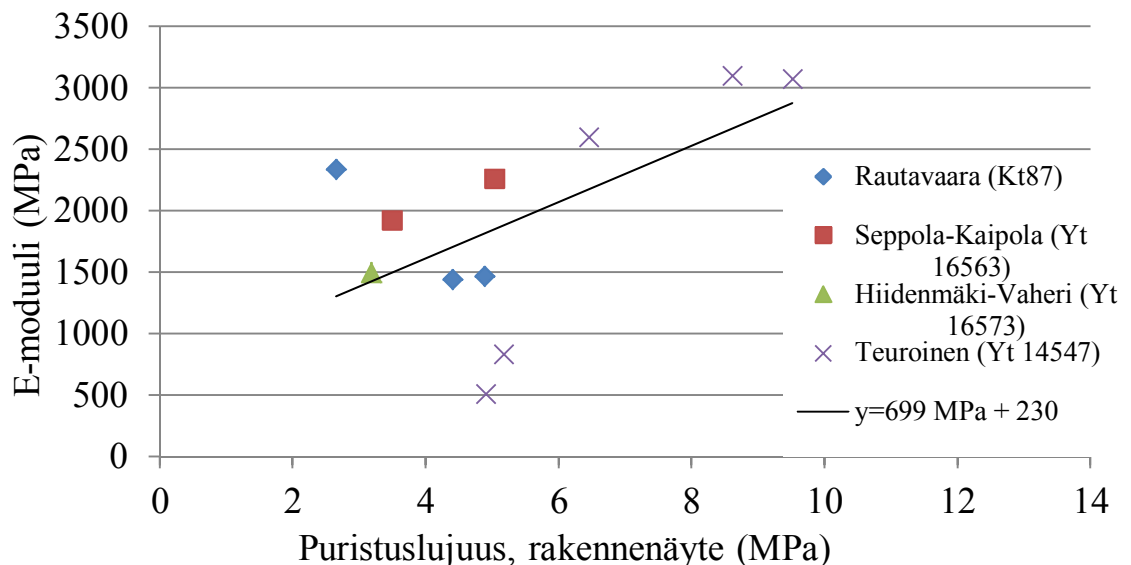
Takaisinlasketut E-moduulit, rakennenäytteiden yksiaksiaalisten puristuskokeiden avulla määritetyt E_{50} -sekanttmoduulit ja rakennenäytteiden yksiaksiaalisten puristuskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 15. Taulukkoon on laskettu myös näiden arvojen välisiä vuorosuhteita Viatekin (1998) esittämien periaatteiden mukaisesti.

Taulukko 15. Koerakennuskohteiden rakennenäytteistä tehtyjen yksiaksiaalisten puristuskokeiden tulosten (puristuslujuus ja E_{50} -sekanttmoduuli) sekä kantavuusmittausten mediaaniarvoista takaisinlaskettujen rakennemoduulien (E-moduuli) väliset vuorosuhteet.

Kohde	E-moduuli /vuosi (MPa)	Puristuslujuus 2017 (MPa)	E/puristuslujuus 2017	E_{50} – sekanttimoduuli (MPa)	E/ E_{50}
Rautavaara (Kt87)	2020 / 2008	3,9	518	211	10
Teuroinen (Yt 14547)	1480 / 2007	8,22	180	542	2,7
Seppola-Kaipola (Yt 16563)	1920 / 2012	2,93	655	364	5
Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573)	1440 / 2012	3,56	404	354	4

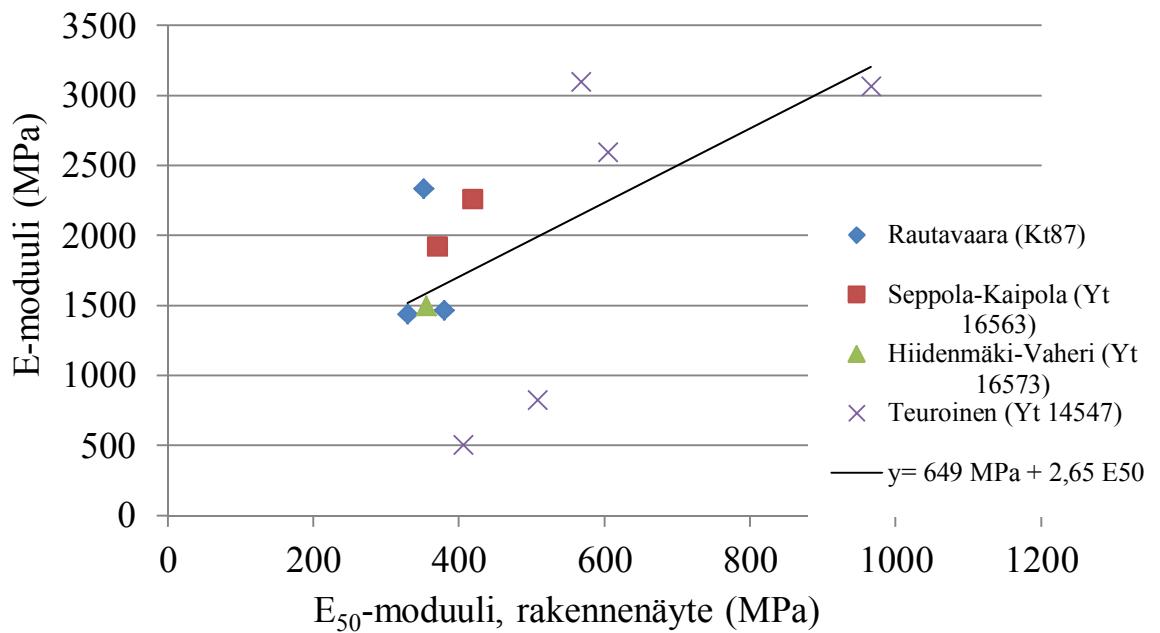
Taulukon 15 tuloksista on havaittavissa takaisinlaskettujen E-moduulien suuret arvot. E-moduulin ja E_{50} -moduulin välinen suhde on Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteella varsin pieni, johon todennäköisenä syynä on heti rakennusvuotta seuraavana keväänä tehdyistä kantavuusmittauksista takaisinlaskettu E-moduuli. Muilla koerakennuskohteilla E-moduulien takaisinlaskennassa on hyödynnetty kantavuusmittauksia, jotka on tehty useampi vuosi rakentamisen jälkeen. Rakenteiden pitkän ajan lujuuskehitys erottuu näistä tuloksista siten, että takaisinlasketut E-moduuliarvot ovat suurempia.

Rakennenäytteiden yksiakselisen puristuslujuuden ja E-moduulin välistä korrelaatiota tutkittiin määrittämällä havaintopisteiden läpi kulkeva korrelaatio-suora (kuva 17).



Kuva 17. Koerakennuskohteiden rakennenäytteistä määritetyn yksiakselisen puristuslujuuden ja Odemarkin mitoitusyhtälön avulla takaisinlasketun E-moduulin välinen korrelaatio.

Kuvassa 18 on esitetty vastaavasti rakennenäytteiden E_{50} -sekanttimoduulien ja takaisinlasketun E-moduulin välinen korrelaatio.



Kuva 18. Rakennenäytteiden yksiaksaalisien puristuskokeiden avulla määritettyjen E_{50} -sekanttimoduulien ja takaisinlaskettujen E-moduulien välinen korrelaatio.

Kuvissa 17 ja 18 esiintyvä hajonta Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteen tuloksissa johtuu todennäköisesti siitä, että kantavuusmittaukset sijoittuvat ajankohtaan, jolloin rakenne on ollut vielä lujittumisvaiheessa, eikä ole saavuttanut vielä samaa lujuustasoa kuin vuonna 2017 poratut rakennenäytteet.

6.5 Epäsuora vetolujuus

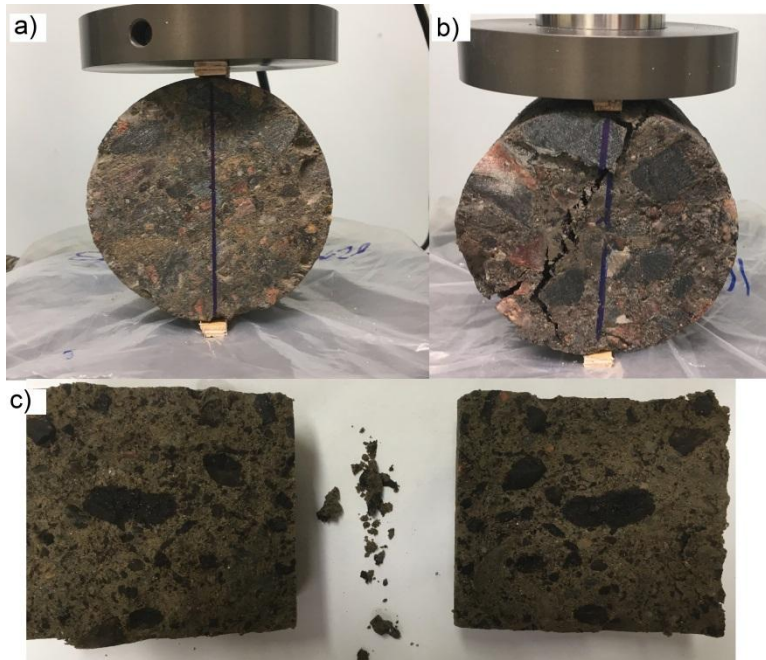
Porakappaleiden epäsuora vetolujuus (taulukko 16) määritettiin kolmesta näytteestä, jotka olivat peräisin Rautavaaran (Kt87), Hanhikempin (Yt14800) ja Seppola-Kaipola (Yt 16563) koerakennuskohteilta.

Taulukko 16. Tutkittujen rakennenäytteiden epäsuora vetolujuus.

Kohde	Kappaleen tunnus	Epäsuora vetolujuus (MPa)
Rautavaara (Kt87)	87/14/9801/KA	0,24

Hanhikemppi (Yt 14800)	14800/1/650/RA	0,48
Seppola-Kaipola (Yt 16563)	16563/1/900/RA	0,33

Kuvassa 19 on esitetty käytetty koejärjestely, koekappaleen murtuminen sekä murtuneen koekappaleen leikkauspinnat.



Kuva 19. Epäsuoran vetokokeen koejärjestelyt (a), kappaleen murtuminen (b) ja kappaleen leikkauspinnat (c) (Ilari Harju, 27.7.2017).

Taulukossa 17 on esitetty tässä tutkimuksessa määritettyjen epäsuoran vetolujuuden arvoja ja eräiden muiden stabiloitujen materiaalien epäsuoran vetolujuuden arvoja.

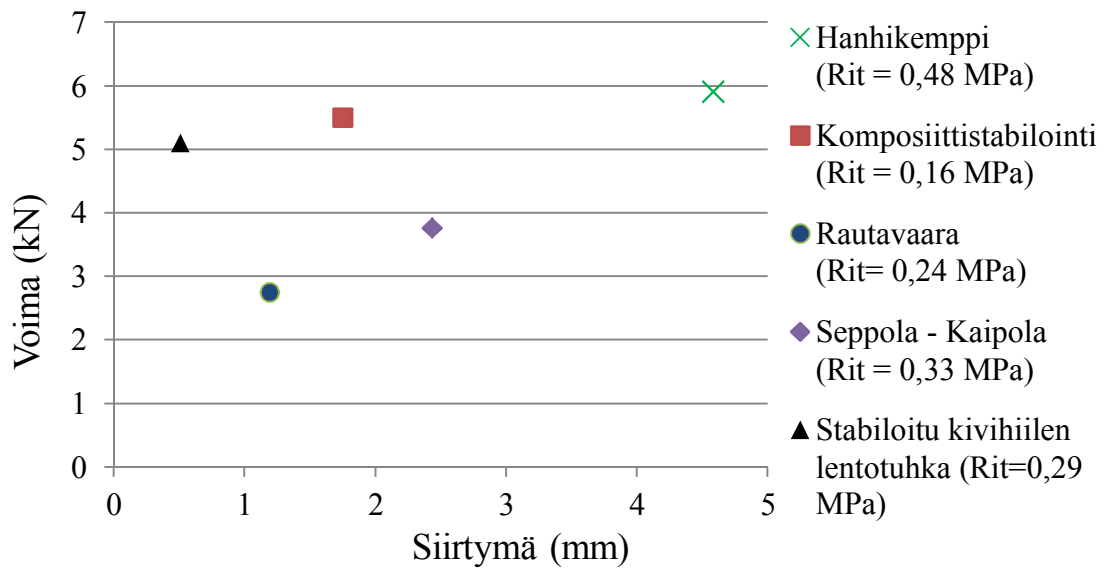
Taulukko 17. Eräiden stabiloitujen materiaalien epäsuoran vetolujuuden arvoja. Stabiloitua kivihiilen lentotuhkanäytettä ei ole rasitettu jäädytys-sulatuskokeessa ennen

epäsuoraa vetokoetta. Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloitu murskeen epäsuora vetolujuus on mitattu rakennenäytteestä, johon on kohdistunut lukuisia jäätymsulamissyklejä (Laukkanen & Leivo 2007, Tammirinne et. al. 2000).

	Materiaali/Näytteen ikä				
	Uusiomateriaali-sideaineseoksella stabiloitu murske/ Rakennenäyte	Komposiitti-stabilointi/ 60 vrk	Vaahto-bitumi-stabilointi/6 0 vrk	Remix-stabilointi/6 0 vrk	Stabiloitu kivihiilen lentotuhka/ 28 vrk
Epäsuora vetolujuus ka. (MPa)	0,35	0,58	0,59	0,24	0,29

Taulukossa 17 esitetyt bitumia sisältävien stabiloitujen materiaalien epäsuoran vetolujuuskokeen tulokset on määritetty Laukkasen ja Leivon (2007) suorittamassa tutkimuksessa 60 vuorokauden ikäiseltä materiaalilta jäädytys-sulatuskokeen jälkeen. Stabiloidun kivihiilen lentotuhkan vetolujuuden tulos on määritetty Tammirinne et. al (2000) tutkimuksessa 28 vuorokauden ikäisellä koekappaleella.

Kuvassa 20 on esitetty tässä tutkimuksessa tehtyjen eräiden hydraulisesti sitoutuvaa sideainetta sisältävien materiaalien epäsuorassa vetokokeessa määritetyt voima-siirtymäkuvaajat. Kuvaan on lisätty vertailumateriaalina komposiittistabilointimateriaalin tulokset, joissa voiman, siirtymän ja epäsuoran vetolujuuden (Rit) arvot on arvioitu Tielaitokset (1999) julkaisemasta tutkimuksesta (liite 4, kuvaaja G). Stabiloidulle lentotuhkalle vastaavat arvot ovat Tammirinne et. al tutkimuksesta (liite 9).



Kuva 20. Voiman ja siirtymän suhde epäsuorassa vetokokeessa komposiitti- ja uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidulla murskeella sekä sementillä stabiloidulla lentotuhkalla (Laukkanen & Leivo 2007, Tammirinne et. al 2000).

Kuvasta 20 on havaittavissa tehtyjen kokeiden tulosten hajonta. Laukkasen ja Leivon (2007) suorittamassa koetuksessa vaahtobitumistabilointi- ja remix-stabilointimateriaalit kestivät komposiittistabilointimateriaalia noin kaksi kertaa suurempaa absoluuttista siirtymää murtohetkellä, kun kappaleet koestettiin jäädytys-sulatuskokeen jälkeen.

7 TUTKIMUSTULOSTEN TARKASTELU

Kohteiden toimivuutta tai vaurioitumista tutkittaessa esiintyi haasteita selkeästi alimitoitettujen rakenteiden tapauksissa, joita olivat Hanhikemppi (Yt 14800), Teuroinen (Yt 14547) ja Rautavaara (Kt87). Kyseisillä kohteilla oli esiintynyt ennen rakenteen stabilointia huomattavia vaurioita, joiden syynä olivat routivien alusrakennolosuhteiden aiheuttamat epätasaiset routanousut. Ongelmaa kohteilla korostivat vielä ohuet ja huonolaatuiset vanhat päällysrakennekerrokset sekä tierakenteen puutteellinen kuivatus. Alimitoitettujen koerakenteiden analysointi ja arviointi voi johtaa väärin johtopäätöksiin koerakenteiden käyttökelpoisuudesta, mikäli alimitoitusta ei huomioida rakenteiden toimivuutta arvioitaessa. Yhteenveto koerakennuskohteiden lähtötilanteesta, stabiloidun materiaalin ominaisuuksista ja rakenteiden toimivuudesta on esitetty liitteessä 8.

7.1 Koerakennuskohteiden vaurioituminen

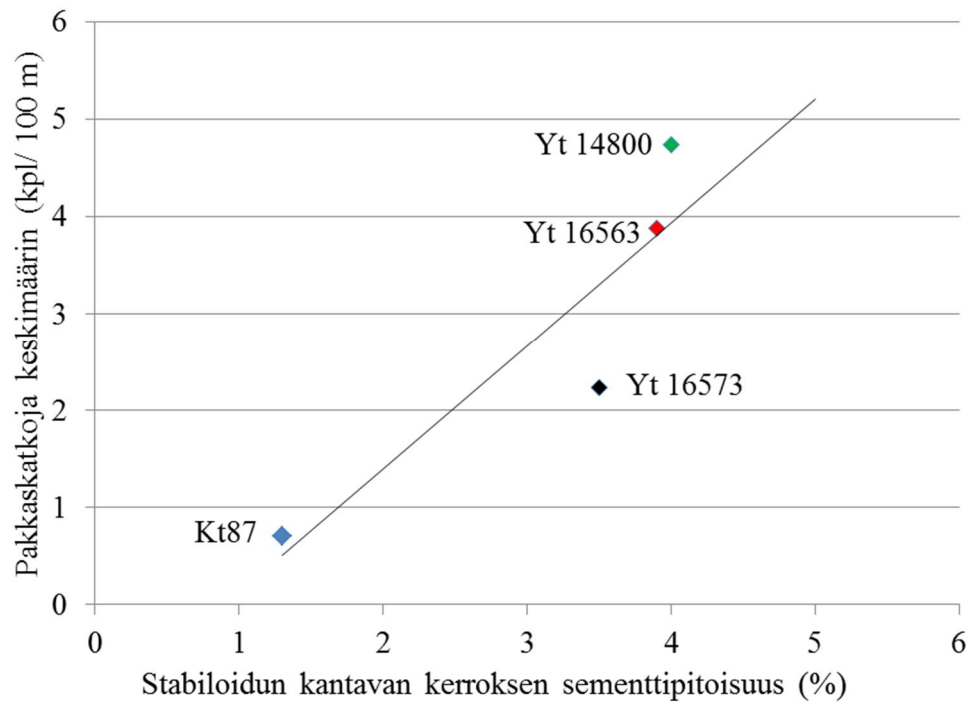
Vauriokartoitukset

Tutkimuskohteille suoritettujen vauriokartoitusten yhteydessä kohteilla havaittiin paikoin runsaastikin päällysteessä esiintyviä pituus- ja poikkisuuntaisia halkeamia. Yhtenä selittävänä tekijänä halkeamien muodostumiselle on stabiloitujen kantavien kerrosten halkeamien heijastuminen päällysteeseen. Hanhikemppin (Yt14800) ja Seppola-Kaipola (Yt 16563) koerakennuskohteiden yhteydessä olevien vertailuosuuksien päällysteissä ei esiintynyt halkeamia vastaavissa määrin kuin osuuksilla, joissa oli stabiloitu kantava kerros. Myös Rautavaaran (Kt87) teräsverkkorakenteen sisältämällä vertailuosuudella halkeamien esiintyminen oli vähäistä. Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteella dokumentointiin heijastushalkeaman muodostumista hyvin havainnollistava tilanne (kuva 21), jossa irronneen päällysteen alta paljastuneen stabiloidun kantavan kerroksen pinnassa esiintyvä halkeama kulkee poikkisuunnassa koko kaistan leveydellä ja heijastuu päällysteen halkeamaksi ehjän päällysteen saumakohdassa.



Kuva 21. Stabiloidun kantavan kerroksen halkeaman heijastuminen päällystehalkeamaksi Teuroisten koerakennuskohteella (17.5.2017, Ilari Harju).

Ohuiden pituus- ja poikkihalkeamien ja etenkin poikkihalkeamien esiintymistiheys vaihteli tutkimuskohteiden välillä suuresti. Kirjallisuusselvityksen viitetiedon mukaan sementtistabiloidussa rakenteessa esiintyvien halkeamien määrä on suoraan verrannollinen stabilointimassan sisältämän sementtipitoisuuden kanssa (Rahiala 1988). Kuvassa 22 on esitetty tarkastelu tässä työssä tutkittujen koerakennuskohteiden stabilointimassan sementtisideainepitoisuuden ja koerakennuskohteilla esiintyneiden kapeiden poikkisuuntaisten halkeamien (pakkaskatkojen) keskimääräisen esiintymistiheyden vuorovaikutuksesta.



Kuva 22. Pakkaskatkojen esiintymistiheys stabilointimassan sisältämän sementtipitoisuuden suhteen.

Kuvan 22 tulkinnassa on huomioitava, että pakkaskatkojen esiintymistä koskeva tarkastelu on voimakkaasti yksinkertaistettu koskemaan sementtipitoisuutta. Koerakennuskohteiden sideaineseoksissa on käytetty muitakin sideainekomponentteja, joiden suhteelliset osuudet eivät käy ilmi kuvaajasta. Huomionarvoista kuvassa on Rautavaaran (Kt87) koerakennuskohde, jonka sideaineseoksen osakomponenttina on käytetty kipsiä.

Tarkastelun perusteella uusiomateriaalideaineseoksen sisältämä sementtipitoisuus selittää vain kohtalaisesti stabiloidun rakenteen päällysteessä esiintyvien pakkaskatkojen määrää. Hanhikempin (Yt 14800) osalta alhainen alusrakenteen kantavuus on voinut aiheuttaa sen, että osa havaituista pakkaskatkoista on kutistumishalkeamien sijasta liikenteen kuormituksen tai routanousun aiheuttamia poikkisuuntaisia halkeamia.

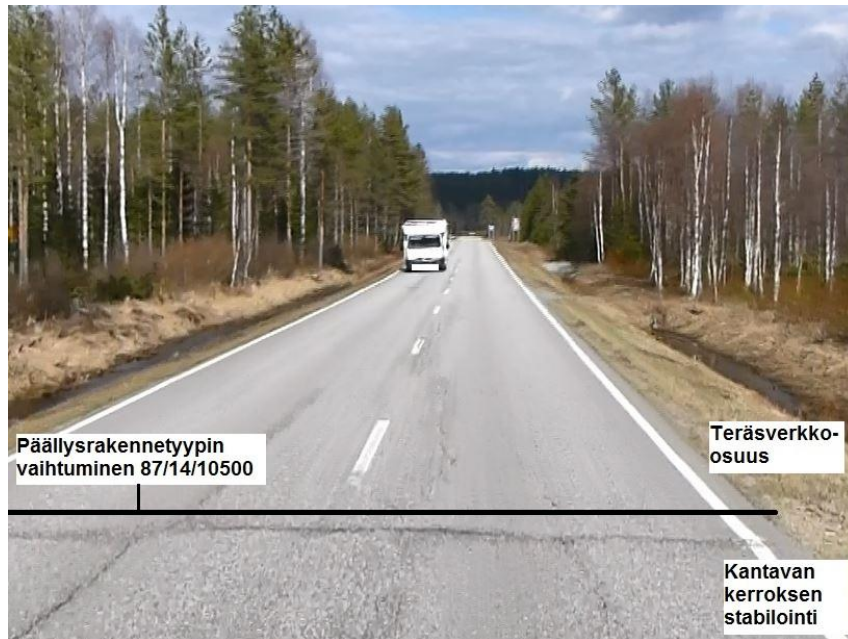
Pakkaskatkojen lisäksi muilla kuin Jämsän alueelle sijoittuneilla Seppola-Kaipola (Yt 16563) ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteilla tavattiin pituus-

suuntaisia halkeamia (kuva 23) tien keski- ja reunaosilla. Halkeamien yhteenlasketut pituudet muodostavat myös suurimman osan kohteille määritetyistä vauriosummista. Havaitut pituussuuntaiset halkeamat ovat tyypillisiä tien alusrakenteen ja/tai pohjamaan epätasaisen routanousun aiheuttamia päällystehalkeamia.



Kuva 23. Keskisaumahalkeama Rautavaaran (Kt 87) koerakennuskohteella (22.5.2017, Ilari Harju).

Rautavaaran (Kt87) stabiloidun kantavan kerroksen koerakennusosuuden itä- ja länsipuolelle on samanaikaisesti rakennettu vertailuosuus, jossa rakenteen parantamisessa käytettiin teräsverkkoa ja kantavan kerroksen lisämursketta. Kuvasta 24 on havaittavissa, kuinka stabiloidun kantavan kerroksen sisältämän rakenteen päättymisen jälkeisellä osuudella päällysteen pituussuuntaista halkeilua ei esiinny enää vastaavalla tavalla, kuin stabiloidun kantavan kerroksen sisältämällä osuudella.



Kuva 24. Päällysrakennetyypin vaihtuminen stabiloidun kantavan kerroksen sisältämästä rakenteesta, teräsverkolla vahvistetun kantavan kerroksen sisältämään rakenteeseen Rautavaaran (Kt87) koerakennuskohteella. (22.5.2017, Ilari Harju)

Rautavaaran koerakennuskohteen pohjamaalaji on GTK:n (2013) mukaan moreenia. Rakennetyypin vaihtuessa pohjamaaolosuhteissa ei tapahdu merkittävää muutosta, jolloin pohjamaan routimisolosuhteiden voidaan arvioida olevan vastaavanlaisia stabiloidun kantavan kerroksen sisältämällä osuudella sekä koerakennusosuuden itäpuolelle sijoittuvalla teräsverkkorakenteen sisältämällä osuudella.

Kuvan 24 ojissa oleva vesi kuvastaa Rautavaaran (Kt87) koerakennusosuuden sekä vertailurakennusosuuden heikkoja kuivatusolosuhteita. Tierakenne padottaa rinteestä valuvia sulamisvesiä, jotka lisäävät tien alusrakenteen ja pohjamaan vesipitoisuutta. Huomionarvoinen seikka on myös kuvassa 24 havaittava poikittaishalkeama, joka tuntui ajaessa myös tien pituussuuntaisena epätasaisuutena. Poikittaishalkeaman kohdalla ei havaittu kohdetutkimuksissa tien alittavaa rumpurakennetta, joten sen esiintymisen selittäväksi tekijäksi pääteltiin päällysrakennetyypin muutoskohdan puutteellinen siirtymäkiilarakenne.

7.2 Uusiomateriaalisideseoksella stabiloidun materiaalin ominaisuudet

Jännitys-muodonmuutosominaisuudet

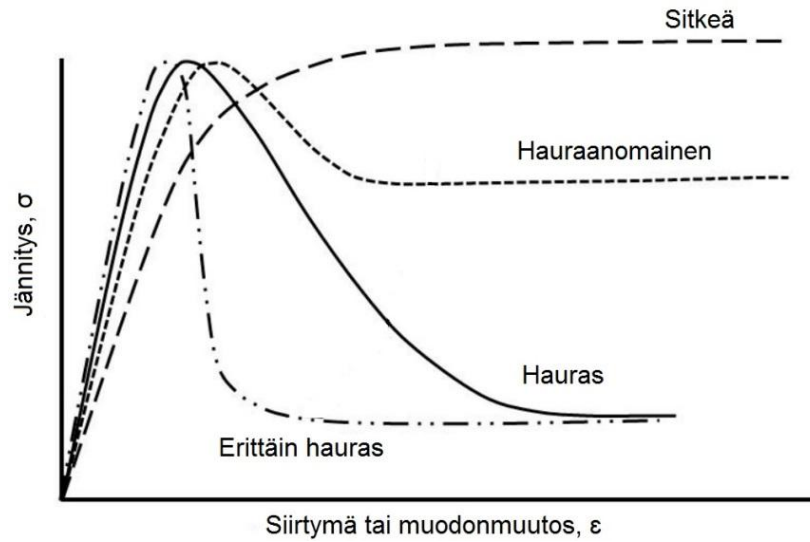
Uusiomateriaalisideseoksella stabiloitu materiaali on ominaisuuksiltaan jäykkä. Matinlaurin (2016) mukaan jäykkä rakenne on myös hauras ja se voi vaurioitua nopeasti rakenteen alapintaan syntyvän toistuvan vetojännityksen johdosta. Liikenneviraston (2016) julkaisemassa tutkimuksessa on esitetty laskelmia erilaisilla menetelmillä vetojännityksen suuruuden määrittämiseksi stabiloidun kantavan kerroksen alapinnassa. Tehtyjen laskelmien tulokset on esitetty taulukossa 18, jossa on nähtävillä vetojännityksen suuruus 150 mm paksun stabiloidun kantavan kerroksen alapinnassa erilaisissa alusrakennelosuhteissa.

Taulukko 18. Eri laskentamenetelmien avulla määritetty vetojännityksen suuruus kerrosstabiloidun rakenteen alapinnassa erilaisissa alusrakennelosuhteissa (muokattu, Liikennevirasto 2016).

Pohjamaan jäykkyys	Vetojännitys	
	Lineaarielastinen kerrosrakennemalli (kPa)	Elementtimenetelmään perustuva malli (kPa)
20	1717	1295
35	1613	1176
70	1498	1056

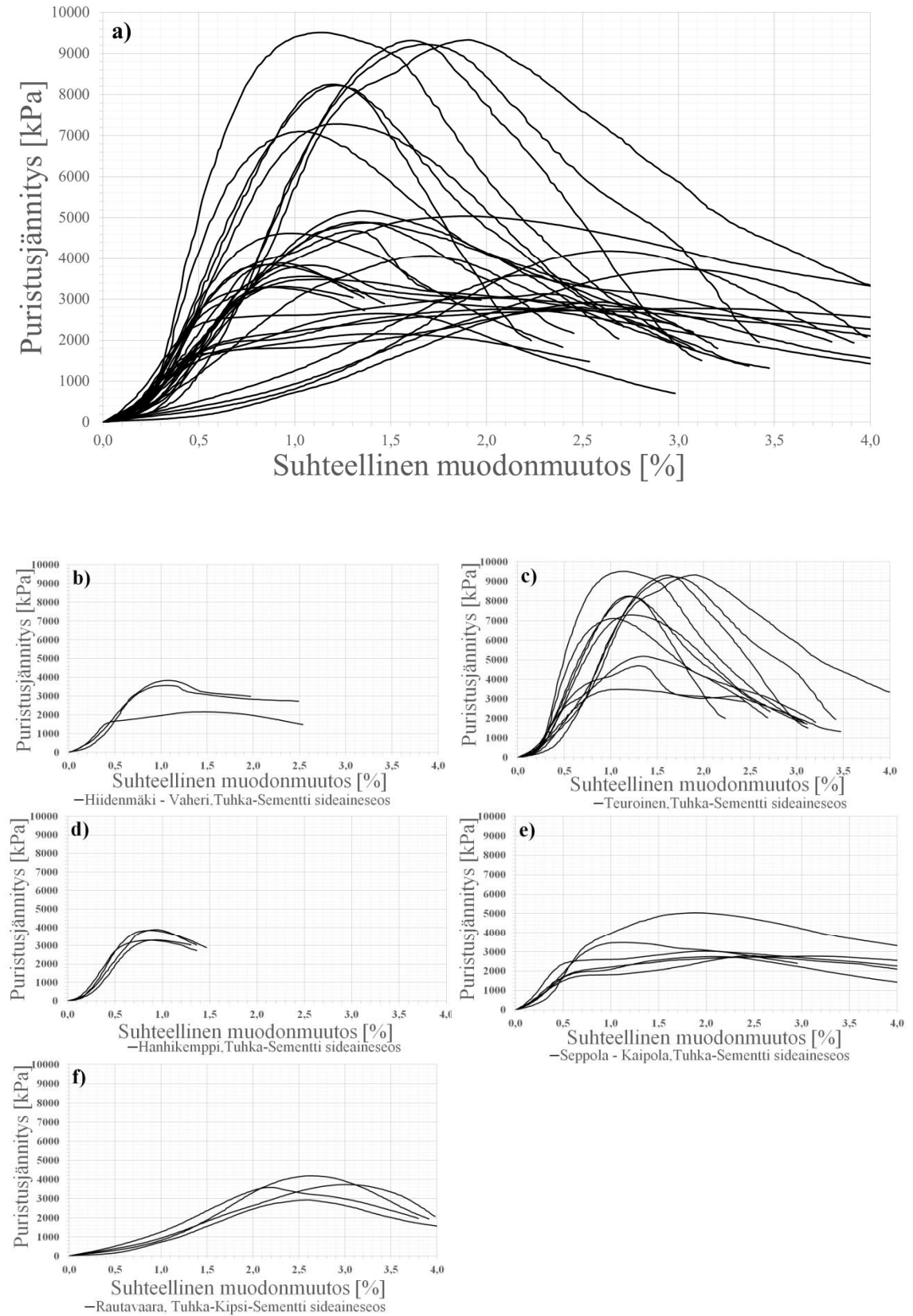
Kantavan kerroksen stabilointia ei toteuteta suoraan pohjamaan varaan, vaan kantavan kerroksen alle jäävät aina vanhan tierakenteen mukaiset jakavan- ja suodatinkerroksen rakenteet. Uudisrakentamisessa stabiloidun kantavan kerroksen alapuoliset rakenteet taas määräytyvät tehdyn mitoituksen perusteella. Liikenneviraston (2016) laskennan tuloksista on kuitenkin havaittavissa, kuinka stabiloidun kerroksen alapintaan muodostuvien vetojännitysten suuruus kasvaa, kun alla olevan pohjamaan tai muun rakenteen jäykkyysominaisuudet heikkenevät. Jotta laskennallisesti määritettyjen vetojännitysten suuruuksia voitaisiin soveltaa mitoitustyössä, olisi suunnitellun stabiloidun kantavan kerroksen alapinnan sietämän vetojännityksen suuruus kyettävä määrittämään. Sidotun tierakennekerroksen jäykkyys- ja haurausominaisuutta on käsitelty myös muissa tutkimuksissa. Tammirinne et. al (2000) mukaan kuormitetuissa maarakenteissa käytettävien sidottujen uusiomateriaalien yhteydessä hauraus on

materiaalin halkeiluerkkyyttä kuvaava suure. Lätti (2016) arvioi tutkimuksessaan materiaalin sitkeän ja hauraan muodonmuutuskäyttäytymisen eroavaisuuksia Quinnin (2009) esittämän periaatteen mukaisesti (Kuva 25).



Kuva 25. Sitkeän ja hauraan materiaalin jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen (Quinn 2009, muokattu).

Kuvassa 26 on esitetty tässä diplomityössä tutkituista, erilaisilla uusiomateriaalideaineseoksilla stabiloidusta kantavasta kerroksesta porattujen rakennenäytteiden yksiakselisessa puristuskokeessa määritetyt jännitys-muodonmuutoskuvaajat.



Kuva 26. Rakennäytteiden yksiakselisessa puristuskokeessa määritetyt jännitys-muodonmuutoskuvaajat (a). Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) tuhka-sementti sideaineseos

(b), Teuroinen (Yt 14547) tuhka-sementti sideaineseos (c), Hanhikemppi (Yt 14800) tuhka-sementti sideaineseos (d), Seppola-Kaipola (Yt 16563) tuhka-sementti sideaineseos (e) ja Rautavaara (Kt87) tuhka-kipsi-sementti sideaineseos (f).

Kuvissa 25 ja 26 esitetyjä kuvaajia vertailtaessa voidaan havaita yhtenevyys tuhka-sementti-sideaineseoksella stabiloitujen rakennenäytekappaleiden (b,c,d ja e) ja Quinin (2009) esittämän hauraan materiaalin muodonmuutoskäyttäytymisen välillä. Huomion-arvoista on myös tuhka-kipsi-sementti-sideaineseoksella (f) stabiloidun rakenteen koe-kappaleiden poikkeava jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen yksiakiaalisessa puristuskokeessa. Kipsin lisäyksen havaittiin parantavan materiaalin kykyä kestää suhteellista muodonmuutosta tuhka-sementti-sideaineseoksella stabiloituun materiaalin kykyyn nähden lähes kaksinkertaisesti.

Jäykkyys

Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteen E-moduulin takaisinlaskennan tuloksissa havaittiin suurta vaihtelua (510 - 3100 MPa). Kun Teuroisten koerakennuskohteen tuloksia ei huomioida, uusiomateriaalisideaineseoksilla stabiloidun murskeen takaisinlasketut E-moduulit vaihtelivat karkeasti 1400-2500 MPa:n välillä. Takaisinlasketut E-moduuliarvot ovat varsin suuria. E-moduuliarvojen suuruus havaittiin myös pintamoduulikuvaajien muodoissa.

Materiaalin jäykkyysmoduulien määrittämisen yhteydessä laadittiin korrelaatiot rakennenäytteistä mitatun puristuslujuuden ja takaisinlasketun E-moduulin välille (8) sekä rakennenäytteiden puristuskokeiden avulla määritetyn E_{50} -sekanttimoduulin ja takaisinlasketun E-moduulin välille (9).

$$E = 699 \text{ MPa} + 230\sigma \quad (8)$$

$$E = 649 \text{ MPa} + 2,65 E_{50} \quad (9)$$

- missä E on rakennemuoduli (MPa)
 σ on rakennenäytteen yksiakiaalinen puristuslujuus (MPa)
 E_{50} on yksiakiaalisen puristuskokeen muodonmuutosmoduuli (MPa)

Korrelaatioita tarkasteltaessa on huomioitava, että moduulit ja yksiakiaaliset puristuslujuudet perustuvat rakennenäytteistä tehtyihin määrityksiin. Yksiakiaalisen puristuslujuuden ja rakennemuodulin välinen korrelaatio tulisikin määrittää suhteituksen yhteydessä saavutettavan puristuslujuuden perusteella. Toisaalta tämän tutkimuksen yhteydessä havaittiin myös uusiomateriaalideaineseoksen avulla saavutettava lujuuden pitkäaikaiskehitys, jolloin korrelaatioyhtälöiden kertoimet muuttuvat ajan suhteen.

Puristuslujuus

Puristuslujuudet määritettiin tässä työssä vain ehjinä saaduista rakennenäytteistä. Rikkoontuneet rakennenäytteet (kuva 26) jätettiin koestamatta, koska se antaisi virheellisen kuvan koko rakenteen lujuudesta. Valittu tarkastelutapa voi toisaalta johtaa siihen, että koestettavat rakennenäytteet edustavat koerakennuskohteen kaikista lujimpia osuuksia. Näin ollen mitatut puristuslujuudet ovat todennäköisesti ainakin jonkin verran suurempia, kuin koerakennuskohteen rakenteen keskimääräinen puristuslujuus.



Kuva 27. Rikkoontunut rakennenäyte (22.5.2017, Ilari Harju).

Tutkittujen koerakennuskohteiden rakennenäytteistä määritettyjen puristuslujuuksien keskiarvot ovat kasvaneet edelliseen mittaukseen nähden kaikilla muilla paitsi Seppola-Kaipola (Yt 16563) ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteilla, joissa puristuslujuuden arvot ovat laskeneet laboratorioissa ennen rakentamista määritettyjä

tavoitteita alhaisemmiksi. Puristuskokeiden tulosten tarkastelun yhteydessä on huomioitava, että rakennenäytekappaleisiin on kohdistunut jäätymis-sulamissyklistä aiheutuvia kuormituksia.

Puristuslujuuksien keskihajonta vaihteli kohteittain välillä 0,28-1,67 MPa, joista suurin keskihajonta oli Teuroisten (Yt 14547) rakennenäytteiden puristuslujuuksissa. Keskihajontavälin suuruus on varsin pieni ottaen huomioon se, että puristuslujuudet on määritetty rakennenäytteistä, jotka edustavat vain yksittäistä pistettä tutkittavasta rakenteesta. Teuroisten puristuslujuuksien keskihajonnan suuruus selittyy muihin tutkittuihin kohteisiin verrattuna suurella määrällä tehtyjä puristuslujuuskokeita sekä suurilla puristuslujuuden arvoilla.

Epäsuora vetolujuus

Epäsuoraa vetokoetta ei ole aiemmin suoritettu tässä työssä tutkituille stabiloiduille materiaaleille, eikä se näin ollen kuulunut tämän työn alkuperäiseen tutkimussuunnitelmaan. Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun murskeen vetolujuus on määritetty rakennenäytekappaleista, jotka porattiin tämän tutkimuksen yhteydessä useita vuosia vanhoilta koerakennuskohteilta. Rakennenäytekappaleisiin on kohdistunut vuosien aikana toistuvia jäätymis-sulamissyklejä. Tehtyjen kokeiden tulokset vastaavat ennalta asetettua käsitystä uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun materiaalin epäsuoran vetolujuuden suuruudesta

7.3 Koerakenteiden vaurioituminen

Rakennenäytteenotossa poratuista koekappaleista havaittiin lähes poikkeuksetta, että stabiloidun kantavan kerroksen päälle levitetty asfalttipäällyste oli irti stabiloidun rakenteen pinnasta, tai se irtosi porauksen yhteydessä. Huonosta tartunnasta aiheutuvia päällystevaurioita ei koerakennuskohteilla kuitenkaan esiintynyt lukuun ottamatta Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohdetta. Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteella suoritettujen tutkimusten yhteydessä havaittiin pienen kaarresäteen ja suuren sivukaltevuuden omaavissa kaarteissa paikoitellen päällysteen irtoamista (kuva 28), joka on seurausta stabiloidun kantavan kerroksen ja päällysteen välisestä heikosta tartunnasta.



Kuva 28. Stabiloidusta kantavasta kerroksesta irronnut päällyste (17.5.2017, Ilari Harju).

Seppola-Kaipola (Yt16563) koerakennuskohteella tutkimuspisteessä 16563/1/3326 päällyste pysyi porauksen ajan kiinni stabiloidussa kantavassa kerroksessa, mikä toisti Tarkkion (2014) tutkimuksessa tehdyn havainnon sekä vahvistaa käsitystä päällysteen ja stabiloidun kerroksen väliin levitettävän bitumiemulsiokerroksen toimivuudesta kerrosten välistä tartuntaa edesauttavana materiaalina. Rakennenäytteenotto-tutkimuksissa tehdyt havainnot on esitetty yksityiskohtaisemmin liitteessä 5.

Kohteille määritettyjen vauriosummien perusteella kohteiden vauriokehitys on ollut toisistaan poikkeavaa. Kohteiden vauriosumman keskiarvon ja kohteen iän perusteella määritetyn keskimääräisen vuosikohtaisen vaurioitumisnopeuden perusteella koerakennuskohteista Rautavaara (Kt87), Hanhikemppi (Yt14800) ja Teuroinen (Yt14547) ovat vaurioituneet keskimääräisesti muita kohteita nopeammin. Yhden tarkasteluvuoden mittausten keskiarvon jakaminen kohteen iällä ei kuvaa kohteen vaurioiden kehittymistä todellisessa tilanteessa. Se antaa kuitenkin osviittaa kohteiden välisistä vaurioitumisnopeuksien eroista. Taulukossa 19 on esitetty kohteiden vaurioitumisnopeudet ja kohteiden nykyhetken kuntoluokitus vauriosumman perusteella.

Taulukko 19. Koerakennuskohteiden vauriosummaan perustuva kuntoluokitus sekä vauriosumman kehittyminen.

Kohde	KVL (KVLRAS) ajon./vrk	Rakennusvuosi	Vauriosumman keskiarvo (m ² /100m)	Vauriosumman kehittyminen (m ² /100m) / (Tarkasteluaajanjakso)	Kohteen kuntoluokitus vuoden 2017 vauriosumman keskiarvon perusteella
Kt 87	442 (63)	2004	80,4	6,2 (2004-2017)	Tyydyttävä
Yt 14800	236 (8)	2007	78,6	7,9 (2007-2017)	Tyydyttävä
Yt 14547	170 (15)	2006	59,5	5,4 (2006-2017)	Hyvä
Yt 16563	1823 (157)	2010	12,8	1,8 (2010-2017)	Hyvä
Yt 16573	604 (24)	2010	8,2	1,2 (2010-2017)	Hyvä

PTM-mittaukset

PTM-mitatuista koerakennuskohteista Seppola-Kaipola (Yt 16563), Hiidemäki-Vaheri (Yt 16573) ja Rautavaara (Kt87) ovat kuntoluokitukseltaan viimeisimpien PTM-mittausten IRI-tasaisuuden keskiarvon perusteella hyvä. Sen sijaan Inkooseen (Yt 11146) vuonna 2000 rakennetun koerakennuskohteen vuonna 2015 mitattu IRI-tasaisuus on ollut tyydyttävä. IRI-tasaisuuteen perustuvassa vertailussa Rautavaaran (Kt87) kantavan kerroksen stabiloinnin ja teräsverkkorakenteen välillä ei ole esiintynyt suurta eroa vuoden 2012 mittauksissa. Mittausaineistosta määritetty IRI:n kasvunopeus on ollut stabiloidun kantavan kerroksen sisältämällä osuudella teräsverkkorakennosuutta noin 28 % suurempi. Kasvunopeuden lukuarvo on kuitenkin erittäin alhainen molemmissa tapauksissa. Lisäksi Rautavaaran (Kt87) stabiloidun kantavan kerroksen yhden kilometrin mittaisella koerakennosuudella rakennetyyppi vaihtuu yhteensä viisi kertaa. Tällä on todennäköisesti erittäin suuri merkitys IRI-tasaisuuteen.

Rautavaaran (Kt87) koerakennuskohteen maksimiurasyvyys on ollut vuonna 2012 kahdeksan vuotta rakentamisen jälkeen alhainen ja kohteen urasyvyyteen perustuva kuntoluokitus on ollut erittäin hyvä. Rautavaaran (Kt87) stabiloidun kantavan kerroksen sisältämän osuuden urautuminen on ollut teräsverkkorakenteen sisältämään osuuteen nähden 28 % nopeampaa. Sen sijaan uran maksimisyvyys on stabiloidun kantavan kerroksen sisältämällä osuudella ollut edellisessä mittauksissa vain 11 % teräsverkkorakennosuutta suurempi. Rautavaaran koerakennuskohteen stabiloidun

kantavan kerroksen sisältämän osuuden päällysteen urautuminen on ollut hitaampaa verrattuna koko Suomen tieverkon keskimääräiseen urautumiseen.

Jämsän koerakennuskohteista Seppola-Kaipola (Yt 16563) on ollut maksimiurasyvyyden keskiarvon perusteella vuoden 2016 mittauksissa kuntoluokaltaan hyvä ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) erittäin hyvä. Urautumisnopeudeltaan Seppola-Kaipola (Yt 16563) on poikennut Suomen tieverkon keskimääräisestä urautumisnopeudesta kaikista merkittävimmin tarkastelluista kohteista. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) urautumisnopeuden mediaani on ollut myös alhaisempi kuin Suomen tieverkon keskimääräinen urautuminen. Inkoon koerakennuskohteella (Yt 11146) vaahtobitumistabilointiosuuden maksimiurasyvyys on ollut vuoden 2015 mittauksissa 26 % suurempi ja urautumisnopeus 36 % suurempi kuin uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämällä rakenteella. Molempien rakenteiden urasyvyyteen perustuva kuntoluokka on kuitenkin ollut vuonna 2015 luokaltaan hyvä.

Maksimiurasyvyyden keskimääräisen kasvunopeuden perusteella uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämät rakenteiden urautuminen on ollut hitaampaa tai samaa suuruusluokkaa kuin Vöyrin (Mt 718) koerakennuskohteen stabilointikoerakenteilla. Ainoastaan Vöyrin koerakennuskohteen komposiittistabilointiosuuden maksimiurasyvyyden kasvunopeus on ollut hitaampaa kuin uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämän rakenteen urautuminen. Vöyrin (Mt 718) koerakennuskohteen komposiittistabilointiosuus on vain 200 metrin pituinen lyhyt osuus, jonka varrella sijaitsee sivuteiden liittymiä. Toisaalta Vöyrin (Mt 718) komposiittistabilointiosuus on urautunut hitaammin kuin samalle koerakennuskohteelle rakennetut bitumistabilointiosuudet. Tämä tukee teoriaa hydraulisella sideaineella stabiloidun kantavan kerroksen vaikutuksesta päällysteen deformatiivisuudesta hidastavana tekijänä.

7.3.1 Tasaumurskekerroksen vaikutus päällysteen vaurioitumiseen

Tässä työssä tutkittiin myös stabiloidun kantavan kerroksen ja päällysteen väliin rakennetun tasaumurskekerroksen vaikutusta päällysteen vaurioitumiseen. Tasaumurskeen sisältämiä rakennetyyppejä on rakennettu Rautavaaran (Kt87), Inkoon (Yt 11146) ja Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteille. Tasaumurskeen vaikutuksen

arvioiminen päällysteen vaurioitumiseen tienkäyttäjän vauriosumman perusteella ei ole tutkituilla kohteilla aivan yksiselitteistä. Rautavaaran (Kt 87) ja Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteille tehdyissä vauriokartoituksissa tasausmurskeen sisältämälle osuudelle laskettu tienkäyttäjän vauriosumman keskiarvo oli alhaisempi kuin kohteiden muulla osuudella. Vauriokartoitus on kuitenkin subjektiivinen tapa arvioida päällysteen kuntoa. Lisäksi osuuksien vaurioitumiseen vaikuttavat vertailuosuuksien väliset olosuhdetekijät. PTM-mittauksissa määritetyn urasyvyyden voidaan arvioida kuvaavan paremmin tasausmurskekerroksen vaikutusta päällysteen vaurioitumiseen. Urautumisen perusteella (taulukko 20) tasausmurskekerroksen sisältämän rakennetyypin päällyste vaurioituu nopeammin kuin osuus, jossa päällyste on rakennettu suoraan stabiloidun kerroksen päälle.

Taulukko 20. Rautavaaran (Kt87) ja Teuroisten (Yt 14547) tasausmurskeosuuksien urautuminen.

Rakenne	Rautavaara				Teuroinen	
	Ei tasausmursketta		Tasausmurske		Ei tasausmursketta	Tasausmurske
PTM-vuosi	2012	2008	2012	2008	2007	2007
Keskiarvo	3,32	2,22	4,96	2,72	1,42	1,49
Mediaani	3,20	2,30	4,43	2,79	1,20	1,30
Min	1,98	1,15	1,51	1,06	0,40	0,50
Max	5,60	3,30	10,79	5,29	4,90	10,40
Alakvartiili	2,49	1,88	3,68	1,99	0,90	0,90
Yläkvartiili	4,08	2,57	5,95	3,27	1,70	1,70

7.4 Kantavuus

Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämän päällysrakenteen erinomaiset kantavuusominaisuudet ovat tulleet useissa yhteyksissä ilmi rakentamista ja seuranta koskevassa tutkimuksessa. Uusiomateriaalisideaineseoksen avulla toteutetulla stabiloinnilla on voitu parantaa kantavuuden keskiarvoa lähtötilanteeseen verrattuna jopa 270 % (Tiehallinto 2005 a). Lisäksi aiemmin tehdyissä tutkimuksissa on voitu osoittaa uusiomateriaalisideaineiden avulla saavutettava stabiloidun kantavan kerroksen lujuuden pitkäaikaiskehittyminen, joka on havaittu myös tierakenteen kantavuuden pitkäaikaisena kehittymisenä.

Pudotuspainolaitemittauksista tutkittiin tässä työssä pääasiallisesti kantavuuden (E2-moduuli) sijasta päällysrakenteen kuntoa kuvaavia indeksejä (BCI ja SCI). Lisäksi mittausaineistosta määritettiin rakenteen kantavuutta päällysrakenteen eri ekvivalenttisyvyyksillä kuvaavat pintamoduulit E20_T ja E120_T. Koerakennuskohteille lasketuissa SCI, d_0 - d_{300} -mediaaniarvoissa havaitaan poikkeavan suuruisia tuloksia Inkoon (Yt11146) ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteilla. Tarkkion (2014) tekemässä rakennetutkimuksessa Inkoon ja Hiidenmäki-Vaheri koerakennuskohteilla oli havaittu haasteita poranäytteenotossa. Kantavasta kerroksesta oli ollut haastavaa saada ehjiä näytekappaleita ja rakenne oli ollut rikkonainen. Tämän tutkimuksen yhteydessä suoritetuissa rakennetutkimuksissa Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteella tehtiin myös sama havainto. Rakennenäytteenotto-tutkimuksissa tehdyt havainnot sekä muista kohteista poikkeavat SCI, d_0 - d_{300} -mediaaniarvot vahvistavat käsityksen siitä, että Inkoon ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteilla stabiloitu kantava kerros ei ole lujittunut suunnitellulla tavalla, vaan on jäänyt osittain rakeiseksi, sitomatonta materiaalia muistuttavaksi kerrokseksi.

Koerakennuskohteiden päällysrakenteen alaosan/pohjamaan jäykkyyttä kuvaavista BCI-indeksin mediaaniarvoissa havaitaan poikkeavan suuruisia mittaustuloksia Teuroisten (Yt 14547) ja Inkoon (Yt 11146) koerakennuskohteilla. Roadex-projektin (2017) asiantuntijoiden näkemysten mukaan Teuroisten (Yt 14547) BCI-indeksin arvoa (43) voidaan pitää huonona ja Inkoon (Yt 11146) koerakennuskohteen arvoa (63) erittäin huonona. Lisäksi molemmille kohteille määritetyt pohjamaan kantavuutta kuvaavat E120_T-arvot ovat selkeästi muita kohteita alhaisempia. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteella BCI-indeksin arvo (29) on luokitukseltaan riittävä. Samoin kohteen alusrakenteen kantavuutta kuvaava E120_T-arvo (113 MPa) on huomattavasti suurempi, kuin Inkoon (Yt 11146) ja Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteilla. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteen stabiloidun kantavan kerroksen heikko sitoutuminen ja huono lujuus ei selity siis rakenteen tiivistämisen kannalta riittämättömistä pohjamaan kantavuusominaisuuksista, vaan todennäköinen syy huonolle lujuuskehitykselle on rakentamisen aikana liian alhaiseksi jäänyt materiaali-seoksen vesipitoisuus.

Pudotuspainolaitemittauksista määritetyt E120_T -mediaaniarvot ovat Seppola-Kaipola (Yt 16563) ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteilla 113 ja 116 MPa. Rautavaaran (Kt 87), Teuroisten (Yt 14547) ja Inkoon (Yt 11146) koerakennuskohteilla E120_T -mediaaniarvot jäävät sen sijaan merkittävästi näitä alhaisemmiksi. Pohjamaan kantavuuden arvot selittävät kohteiden toisistaan poikkeavan vauriokehityksen. Huonosti kantavalla pohjamaalla alusrakenne ei anna riittävää tukea stabiloidulle kantavalle kerrokselle, jolloin kerrokseen syntyy vetojännityksiä ja rakenne vaurioituu.

7.5 Rakenteen elinkaarikustannustarkastelu

Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteeseen on laadittu kattava tarkastelu rakenteen elinkaarikustannuksista vaihtoehtoisissa skenaarioissa, jotka koskevat rakenteen peruskorjaustarvetta 40 vuoden elinkaarella (Maijala 2008). Tämän tutkimuksen yhteydessä Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteen havaittiin vaurioituneen pohjamaan/alusrakenteen alhaisen kantavuuden ja routimisen seurauksena, jolloin kohteen vauriokehitys ei ole ollut vuonna 2008 tehdyssä elinkaarikustannustarkastelussa esitettyjen skenaarioiden mukainen. Näin ollen aiemmin tehtyä elinkaarikustannustarkastelua ei ole perusteltua päivittää sellaisenaan Teuroisten (Yt14547) koerakennuskohteelle. Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteen elinkaarikustannustarkastelun päivitys vaatisi tässä tutkimuksessa tehtyjen havaintojen perusteella uuden arvion heikkolaatuisen pohjamaan vaikutuksesta laadittuihin elinkaarimalleihin.

Tässä tutkimuksessa on sovellettu Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteelle tehtyä elinkaarikustannustarkastelutapaa Seppola-Kaipola (Yt 16563) koerakennuskohteelle. Seppola-Kaipola (Yt 16563) koerakennuskohteesta on dokumentoitua tietoa rakentamiskustannuksista sekä tämän tutkimuksen yhteydessä syntynyttä tietoa rakenteen kunnan kehittymisestä seitsemän vuoden (2010 - 2017) tarkastelujaksolla. Kohteen päällysteen elinkaari katsotaan tässä laskelmassa päättyvän, kun tien kuntomittauksissa IRI, urasyvyys ja tienkäyttäjän vauriosumma saavuttavat raja-arvot, joissa päällysteen kunto luokitellaan huonoksi Tiehallinnon (2007e) määritysten mukaisesti. Seppola-Kaipola (Yt 16563) -koerakennuskohteen olosuhteissa raja-arvot ovat urasyvyydelle 15 mm, tasaisuudelle (IRI) 3,21 mm/m ja tienkäyttäjän vauriosummalle 70,0 m²/100m. Laskennan yksinkertaistamiseksi kuntomuuttujien kehittymistä on tarkasteltu tässä työssä määritettyjen kuntoa kuvaavien parametrien kasvunopeuksien perusteella. On

huomioitava, että tierakenne ei todellisuudessa vaurioidu laskennassa esitetyllä tavalla. Taulukossa 21 on esitetty laskennan tuloksena määräytyvä päällysteen uusimisen ajankohta tarkasteltujen kuntomuuttujien perusteella.

Taulukko 21. Päällysteen ylläpitotoimenpideajankohdan määräytyminen Seppola-Kaipola-koerakennuskohteella eri kuntoparametrien ylittymisen perusteella.

Rakenne	Rakennus- kustannukset (€/km)	Päällysteen kuntoa kuvaavan parametrin raja-arvon arvioitu ylittyminen (vuotta rakentamisesta)		
		IRI	Urasyyvyys	Tienkäyttäjän vauriosumma
Pelkkä päällystys	62 573 €	-	9	-
Kantavan kerroksen stabilointi+päällystys	108 573 €	23	16	39

Pelkän uudelleenpäällystämisen sisältämän rakenteen tapauksessa 15 mm maksimiurasyyvyttä koskevan raja-arvon ylittymisajankohta on laskettu Dettenbornin (2017) laatimaan Seppola-Kaipola (Yt 16563) koerakennuskohteen olosuhteita vastaavan päällysteen urautumismallin mediaaniarvokuvaajasta. Stabiloidun kantavan kerroksen sisältämän rakenteen urasyyvyden raja-arvon ylittymisen ajankohta on laskettu kohteelle vuosina 2014 ja 2015 suoritettujen PTM-mittaustulosten sekä 2 mm alku-urasyyvyden arvon avulla määritetyn lineaarisen trendin avulla. Maksimiurasyyvyden raja-arvon ylittymisajankohtien avulla on laadittu taulukossa 20 esitetyt erilaiset elinkaarimallit (Ekm) molempien rakenteiden päällysteen ylläpitotarpeelle.

Seppola-Kaipola (Yt 16563) koerakennuskohteen stabiloidun kantavan kerroksen lujuuden heikkenemistä ei ole havaittu vuosina 2011, 2012, 2013 ja 2017 tehtyjen rakennenäytetutkimusten perusteella. Näin ollen stabiloidun rakenteen elinkaarelle ei voida tehdä arviota tämän tutkimuksen perusteella, vaan sen elinkaarta tarkastellaan laskelmassa kolmen vaihtoehdoisen elinkaarimallin (Ekm) avulla laadittujen skenaarioiden avulla (taulukko 22), vastaavasti kuin Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteelle laaditun elinkaarikustannustarkastelun tapauksessa. Pelkän uudelleenpäällystämisen sisältämän rakenteen parantamisajankohta elinkaarimallissa (Ekm) 1.2 on asetettu vastaavaksi kuin Teuroisten (Yt 14547) elinkaarikustannustarkastelussa (Maijala 2008).

Taulukko 22. Arvio ylläpitotoimenpiteiden (uudelleenpäällystys UP) ja peruskorjaustoimenpiteiden (rakenteen parantaminen RP) tarpeesta eri elinkaarimalleilla (ekm) 40 vuoden tarkastelujaksolla.

Rakenne	Elinkaari- malli (ekm)	Arvio 40 vuoden kunnossapitajaksolla toteutettavien kunnossapitotoimenpiteiden/ peruskorjausten ajankohdista						
		10v	15v	20v	25v	30v	35v	40v
Pelkkä päällystys	1.1	UP	-	UP	-	UP	-	UP
	1.2	UP	-	UP	-	RP	-	UP
Kantavan kerroksen stabilointi+päällystys	2.1	-	UP	-	-	UP	-	-
	2.2	-	UP	-	-	RP	-	-
	2.3	-	RP	-	-	RP	-	-

Rakenteen parantamisen tapauksessa (RP) kohteelle suoritetaan myös uudelleenpäällystys. Tämän elinkaarilaskelman yhteydessä ei ole tarkasteltu vaihtoehtoa, jossa stabiloitu kantava kerros leikattaisiin, kuljetettaisiin pois ja läjitettäisiin, koska tutkimuksen yhteydessä saatujen tulosten perusteella rikkonainen/lujittumaton stabiloitu kantava kerros toimii murskeesta rakennetun kantavan kerroksen veroisesti Seppola-Kaipola (Yt 16563) -koerakennuskohteen kaltaisissa riittävän hyvin kuivatetuissa päällysrakenteissa. Taulukossa 23 on esitetty laskelma kunnossapitajakson eri toimenpiteiden kustannuksista tiekilometria kohden. Kustannustiedot ovat peräisin Seppola-Kaipola (Yt 16563) -koerakennuskohteen rakentamisen yhteydessä dokumentoiduista kustannuksista.

Taulukko 23. Tarkasteltavien ylläpito (UP)- ja rakenteen parantamistoimenpiteiden (RP) rakennuskustannukset tiekilometria kohden.

Kustannus	UP	RP
AB 22/120	6,8 €/m ²	6,8 €/m ²
Vanhan päällysteen jyrshintä ja kuljetus	1,65 €/m ²	
Yhteensä	77 740 €/tie-km	
Kantavan kerroksen stabilointi uusiomateriaalisideaineseoksella		5,0 €/m ²
Yhteensä		108 560 €/tie-km

Stabiloidun kantavan kerroksen rakenteen parantamisen yksikkökustannukseen (5,0 €/m²) sisältyy sideaineseoksen hankinnasta ja käsittelystä sekä stabilointijyrsinnästä aiheutuvat kustannukset.

Elinkaarikustannuslaskelma on suoritettu nykyarvomenetelmän kaavalla (10). Nykyarvomenetelmässä tarkasteltavan kunnossapitoajanjakson kustannukset muutetaan nykyarvoon.

$$K_N = R_N + H_N + KP_N - J_N \quad (10)$$

missä	K_N	on kustannusten nykyarvo (€)
	R_N	on rakennuskustannusten nykyarvo (€)
	H_N	on hoitokustannusten nykyarvo (€)
	KP_N	on kunnossapitokustannusten nykyarvo (€)
	J_N	on jäännösarvon nykyarvo (€)

Eri kustannustekijöiden nykyarvo lasketaan kertomalla eri elinkaarimalleissa arvioitujen ylläpitomenetelmien rakennuskustannukset kyseisen vuoden diskonttaustekijällä c_k (11).

$$c_k = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (11)$$

missä	c_k	on diskonttaustekijä
	i	on laskentakorko (%)
	n	on vuosi

Laskettujen kokonaiskustannusten nykyarvo voidaan muuttaa vuosikustannuksiksi kertomalla kokonaiskustannukset vuosikustannuskertoimen c_n kaavalla (12).

$$c_n = \frac{i \cdot (1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]} \quad (12)$$

missä	c_n	on vuosikustannuserroin
	i	on laskentakorko (%)
	n	on vuosi

Elinkaarikustannuslaskennan laskentakorkona käytettiin 4 % korkoa. Lisäksi laskennassa oletettiin, että kaavassa 8 esitetty päällysrakenteen jäännösarvo (J_N) on rakenteen elinkaaren lopussa 0 €. Taulukossa 24 on esitetty eri elinkaarimalleilla lasketut rakenteiden nykyarvot ja vuosikustannukset tarkasteluajanjaksolla. Tarkempi laskelma vuosikustannuksien muodostumisesta on esitetty liitteessä 7.

Taulukko 24. Tarkasteltavien rakennevaihtoehtojen kustannusten nykyarvo ja vuosikustannukset eri elinkaarimalleilla (Ekm).

	Kantavan kerroksen stabilointi			Pelkkä päällystys	
	Ekm 2.1	Ekm 2.2	Ekm 2.3	Ekm 1.1	Ekm 1.2
Nykyarvo	67 135 €	76 637 €	93 751 €	128 159 €	137 661 €
Vuosikustannus	3 392 €	3 872 €	4 737 €	6 475 €	6 955 €

Vuosikustannusten välisistä eroista voidaan havaita, että kantavan kerroksen stabilointi päällysteen urautumista hidastavana tekijänä laskee rakenteen elinkaarikustannuksia huomattavasti pienemmälle tasolle kuin pelkän uudelleen päällystämisen tapauksessa, jolloin päällyste urautuu nopeammin. Lisäksi laskelmasta voidaan havaita, että vaikka stabiloinnin sisältämä rakenne jouduttaisiin parantamaan stabiloimalla kantava kerros uudelleen (Ekm 2.2 ja 2.3), rakenteen elinkaarikustannukset jäävät silti alhaisemmiksi kuin pelkän uudelleenpäällystyksen sisältämän rakenteen tapauksessa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa vahvistui käsitys siitä, että hydraulisesti sitoutuvalla uusiomateriaalisideaineiden ja sementin seoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämällä rakenteella voidaan toteuttaa hyvän kantavuusominaisuuden omaavia päällysrakenteita sekä parantaa olemassa olevan tierakenteen kantavuutta. Työssä tehtyjen laboratorio-tutkimusten perusteella uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloitu materiaali säilyttää lujuusominaisuutensa Suomen ilmastorasituksissa ja sen lujuus kehittyi rakenteessa ajan saatossa.

Tämän aineiston perusteella tuli esille, että paksulla ja/tai suuren puristuslujuuden omaavalla uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidulla kantavalla kerroksella ei voida poistaa kokonaan tien alusrakenteen/pohjamaan routimisen seurauksena tapahtuvaa päällysteen halkeilua. Routivissa olosuhteissa stabiloidun kantavan kerroksen alapuolisissa rakenteissa tulee käyttää routaeristerakenteita. Routaeristerakenteeksi soveltuu tämän tutkimuksen perusteella esimerkiksi Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteella käytetty jakavan kerroksen massiivituuhkarakenne.

Poikkisuuntaisia halkeamia esiintyi eniten rakenteissa, joissa lentotuhkan lisänä sideaineseoksessa oli käytetty suhteessa eniten sementtipohjaista sideainetta. Uusiomateriaalisideaineita käyttämällä voidaan vähentää sementtisideaineesta aiheutuvaa kantavan kerroksen poikkihalkeilua, mutta sitä ei voida poistaa kokonaan. Päällysteen ja stabiloidun kerroksen väliin rakennettavalla murskekerroksella ei voida vähentää päällysteen vaurioitumista. Päällysteen ja stabiloidun kerroksen väliin levitettävä bitumiemulsiokerros parantaa stabiloidun kerroksen ja päällysteen välistä tartuntaa.

Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun murskeen rakennenytyksestä saatiin tässä työssä määritettyä halkaisuvetolujuus. Mitattu halkaisuvetolujuus oli suuruusluokaltaan suurempi, kuin esimerkiksi stabiloidulla tuhalla. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloitu kantava kerros hidastaa päällysteen deformaatiosta aiheutuvaa urautumista. Paremmen deformaatiokestävyyden avulla voidaan vähentää tien ylläpidon vuosikustannuksia, kun alusrakenne ei ole liian routivia, hyvin kuivatettuja ja omaavat riittävän hyvän kantavuusominaisuuden.

Riittäväenä kantavuusominaisuutena voidaan pitää tässä tutkimuksessa tehdyn tarkastelun perusteella 80 MPa:n suuruusluokkaa.

Tehtyjen tutkimusten perusteella uusiomateriaalisideainseoksella stabiloitavan murskeen jäykkyyshuomattavissa esiintyy huomattavia vaihteluita eri kohteiden välillä ja siihen vaikuttaa käytettävä runkoainemateriaali. Mitoitusta varten materiaalin jäykkyyshuomattavissa tulisi määrittää aina laboratorio-olosuhteissa suoritettavien kokeiden perusteella. Hydraulisia sideainseoksia käytettäessä stabilointimassan vesipitoisuuden säätäminen rakentamisen aikana on erittäin tärkeää materiaalin lujuuskehityksen kannalta. Tulevissa stabilointikohteissa materiaaliseoksen laadunvalvonnassa vesipitoisuuden sallittuun vaihteluväliin tulisi tehdä tiukennuksia siten, että tavoitevesipitoisuuden alituksia ei sallittaisi.

Päällyste tulisi tehdä suoraan stabiloidun kantavan kerroksen päälle ilman kantavan kerroksen ja päällysteen väliin asennettavaa murskekerrosta. Päällysteen kiinnittyminen stabiloituun kantavaan kerrokseen on tärkeää varmistaa. Tässä tutkimuksessa havaittiin stabiloidun kerroksen päälle levitetyn bitumiemulsiokerroksen parantavan päällysteen tartuntaa. Uusiomateriaalisideainseoksilla toteutetun stabiloidun kantavan kerroksen päällä käytettävän päällysteen paksuutena voidaan tämän tutkimuksen perusteella käyttää ohjeistusta (Tiehallinto 2004) ohuempaa paksuutta. Päällystetyypeistä PAB 16/100-päällyste soveltuu tämän tutkimuksen perusteella stabiloidun kantavan kerroksen päällystetyypiksi vähäliikenteiselle teille. Jos kohde sijaitsee vilkkaasti liikennöidyllä tiellä ja päällystetyypiltä vaaditaan suurta kulutuskestävyyttä, päällystetyypinä on suositeltavaa käyttää AB 22/120 -päällystettä.

9 JATKOTUTKIMUSTARPEET

Työmenetelmät

Lietemuodossa olevan sideaineen käyttö voisi helpottaa sideainemateriaalin käsittelyä työmaalla ja vähentää myös työstä aiheutuvaa pölyämrisriskiä. Sideaineen syöttäminen suoraan stabilointijyrsimen kautta voi olla kuitenkin haasteellista suurten sideainemäärien tapauksissa. Toisaalta suuria sideainemääriä käytettäessä kuivalevitys voidaan joutua tekemään useassa vaiheessa, kuten esimerkiksi Inkoon (Yt 11146) koerakennuskohteen tapauksessa. Mikäli stabilointijyrsimen rummun läpi olisi mahdollista syöttää kuiva tai lietemuodossa oleva sideaine, stabilointityössä tarvittavien työvaiheiden määrää voisi mahdollisesti vähentää.

Materiaaliominaisuudet

Rahialan (1988) mukaan pelkällä sementtiseideaineella sidotun maabetonirakenteen taivutusvetolujuus on arviolta $1/5 - 1/8$ materiaalilta määritetyn yksiakiaalisen puristuslujuuden arvosta. Betoniteollisuudessa materiaalin taivutusvetolujuusominaisuutta parannetaan esimerkiksi muovi- ja teräskuitujen avulla silloin, kun rakennetta ei erikseen raudoiteta (Vasama 2017). Uusiomateriaaliseideaineseoksella stabiloidun materiaalin taivutusvetolujuusominaisuuksia voisi tutkia laboratoriossa esimerkiksi standardissa SFS-EN 1521 määritetyllä palkkikoejärjestelyllä. Menetelmällä voitaisiin saada selville jäykän ja laattamaisen rakenteen kyky kestää syklisen liikennekuormituksen aiheuttamia taivutusjännityksiä. Taivutusvetokokeen yhteydessä voisi tutkia myös betoniteollisuudessa käytettävien kuitujen vaikutusta materiaalin taivutusvetolujuuteen. Myös erillisen raudoitteen (teräsverkko) käyttöä stabiloidun kantavan kerroksen taivutusvetolujuuden parantamisessa voisi tutkia erityisesti asemasekoitteen stabiloinnin rakentamisen yhteydessä.

Sitkeysominaisuuksia epätasaisia routanousuja ja painumia vastaan voisi tutkia Tammirinne et. al (2000) tutkimuksessa esitetyn VTT:n yhdyskuntatekniikan osaston kehittämän ja rakentaman koejärjestelyn avulla.

Jatkotutkimuksen kannalta olisi tärkeää pyrkiä löytämään yhteys taivutusvetolujuuden, materiaalin sitkeysominaisuuden sekä yksiakiaalisen puristuslujuuden välillä. Taivutusvetokoe on yksiakiaalista puristuskoetta hitaampi ja vaikeammin toteutettava

tutkimus, jolloin se ei ole välttämättä yhtä hyvin soveltuva menetelmä käytettäväksi suhteituksessa kuin yksiakselialinen puristuskoe.

Routakestävyys

Tielaitoksen (1992) ohjeistuksessa sementtiseidaineella lujitetun suhteellisen ohuen päällysrakenteen routamitoituksen osalta on todettu, että epätasainen routanousu saisi olla tieluokasta riippuen enintään 30 - 50 mm/10 m. Sementtistabilointia ei myöskään suositella käytettäväksi, kun tasainen routanousu ylittää 100 mm raja-arvon. Tässä työssä ei voitu selvittää routanousun ja koerakennuskohteilla havaittujen vaurioiden välistä yhteyttä, sillä tutkituilla koerakennuskohteilla ei ole suoritettu pintavaaitusta. Tulevissa rakennuskohteissa pintavaaituksen avulla voitaisiin tutkia routanousun suuruuden vaikutusta rakenteen vaurioitumiseen.

Jännitys-muodonmuutoskestävyys

Koerakenteista porattujen rakennenäytekappaleiden yksiakselialisten puristuslujuusmääritysten yhteydessä havaittiin eroavaisuuksia eri sideaineseoksilla stabiloitujen materiaalien jännitys-muodonmuutoskäyttäytymisessä. Suoritetuissa kokeissa kipsiseidaineeseoksella stabiloidut rakennenäytteet kestivät suurempaa suhteellista muodonmuutosta ennen murtumista kuin pelkällä lentotuhka- ja sementtiseidaineella stabiloidut rakennenäytteet.

Laukkanen & Leivo (Tiehallinto 1999) esittivät komposiittistabiloinnissa käytettävien bitumi- ja sementtiseidaineiden suhteitusta koskevan tutkimuksen johtopäätöksenä, että suuri suhteellinen sementtipitoisuus kasvattaa rakenteen haurautta. Edellä mainitut havainnot korostavat tarvetta löytää vaihtoehtoisia uusiomateriaaliseidaineeseoksia, joiden avulla stabiloitu materiaali kestää muodonmuutosta, ilmatorasituksia, ja jolla saavutetaan riittävä alkulujuus ilman sementtiseidaineen lisäyksen tarvetta.

Kutistuminen ja lämpölaajeneminen

Suoritetuissa kenttätutkimuksissa havaittiin pakkaskatkoja kaikilla tutkimuskohteilla. Tehdyn tarkastelun perusteella pakkaskatkoja esiintyy enemmän kohteilla, joissa sideaineseoksen suhteellinen sementtipitoisuus on suuri. Käytettävän sideaineseoksen ja runkoainemateriaalin vaikutusta rakenteen kutistumiseen ja lämpölaajenemiseen voisi jatkossa tutkia tarkemmin.

Mitoitus

Matinlauri (2016) arvioi että jäykät, mutta hauraat rakenteet voivat vaurioitua nopeasti rakenteen alapintaan syntyvän toistuvan vetojännityksen johdosta ja näin ollen Odemarkin mitoitusmenetelmässä niiden kuormituskestävyydelle asetettu oletamus voi olla virheellinen. Pihlajamäki & Spoofo (2001) mukaan hydraulisilla sideaineilla stabiloitujen päällysrakenteiden vaurioitumismekanismi ei kuitenkaan olisi toistuvista vetojännityksistä aiheutuva väsyminen, vaan sideaineiden lujittumisen aikana tapahtuva kutistumishalkeilu sekä lämpötilan vaihtelun aiheuttamat jännitykset. Lisäksi he toteavat että hydraulisilla sideaineilla sidotuille rakennekerroksilla on ominaista tietty jännitys-muodonmuutostaso, jota ei saisi ylittää, jotta rakenne ei vaurioidukaan.

Tämän diplomityön osana suoritetuissa koerakenteiden vaurioinventoinneissa ei havaittu viitteitä toistuvan liikennekuormituksen synnyttämien vetojännitysten aiheuttamista vaurioista, jotka olisivat siis ilmenneet erityisesti ajourien pituus-suuntaisina halkeamina tai verkkohalkeamina. Vaurioinventoinnissa havaittiin sen sijaan Pihlajamäki & Spoofo (2001) esittämän vaurioitumismekanismiin mukaisia vaurioita. Liikenteen kuormituksen, routanousun ja stabiloidun kerroksen alapuolisen sidotun kerroksen kantavuuden vaihtelun vaikutuksesta olisi tarpeellista suorittaa laskennallinen tarkastelu. Tarkastelun avulla voitaisiin muodostaa käsitys stabiloidulta kantavalta kerrokselta vaadittavista lujuusparametreista ja niiden suuruuksilta sekä stabiloinnin minimipaksuudesta.

Tämän diplomityön yhteydessä havaittiin Hiidemäki-Vaheri (Yt16573) koerakennuskohteen stabiloidun kantavan kerroksen sitoutumisen jääneen alhaiselle tasolle, jolloin rakennenäytteenotossa stabiloitu kerros oli rikkonaista. Rikkonaisilta osuuksilta on mitattu kuitenkin tavoitekantavuuden ylittäviä tuloksia, eikä osuuksilta havaittu tässä tutkimuksessa muista osuuksista poikkeavaa vaurioitumista. Jatkossa voisikin tutkia uusiomateriaalisideaineseoksien mahdollista käyttöä erityisesti rakenteen parantamiskohteilla usein esiintyvän heikkolaatuisen runkoaineen ominaisuuksien parantamisessa siten, että sideaineen avulla sidottaisiin runkoaineen sisältämä hienoaines, mutta stabiloitavalta kerrokselta ei tavoiteltaisi sidotun rakenteen kaltaisia ominaisuuksia. Tutkimuksessa tulisi kuitenkin suhtautua erittäin kriittisesti kyseisen ratkaisun pitkäaikaiskestävyyteen, johon voi vaikuttaa esimerkiksi rikkonaiseksi jääneen stabiloinnin hienontuminen syklisen liikennekuormituksen seurauksena. Hiidemäki-

Vaheri (Yt 16573) koerakennuskohteen pitkäaikaiskestävyyden seurannan avulla voidaan mahdollisesti saada vastauksia rikkonaisen stabiloinnin pitkäaikaiskestävyyteen.

Päällyste

Hydraulisilla sideaineilla stabiloidun kantavan kerroksen kuivumiskutistumisesta ja lämpötilanmuutoksista aiheutuva halkeilun havaittiin heijastuvan päällysteen halkeiluksi koerakennuskohteille suoritetuissa vaurioinventoinnissa. PAB-päällystetyypissä käytetyn AB-päällystetyyppiä pehmeämmän bitumisideaineen ansiosta päällysteeseen syntyneiden kapeiden halkeamien on mahdollista kuroutua umpeen kesäisin korkeamman lämpötilan ansiosta, mikä havaittiin muun muassa Teuroisten (Yt 14547) koerakennuskohteella rakentamivuotta seuranneen kesän seurantatutkimuksissa (Hietala 2008a).

Rossi (2016) esitti tutkimuksessaan erilaisten lisäaineiden vaikutuksia asfalttipäällysteen ominaisuuksiin. Esimerkiksi Aramidikuidun on todettu parantavan asfalttipäällysteen halkeilukestävyyttä ja vetolujuutta. Aramidikuidun vaikutusta uusiomateriaalisideaineilla stabiloidun kantavan kerroksen päälle rakennettavan asfalttipäällysteen halkeiluerkkyyteen voisi selvittää tarkemmin.

Stabiloidun rakenteen parantaminen

Höltän (2012) mukaan vanhojen stabiloitujen teiden kunnostamisessa tullaan tulevaisuudessa käyttämään sekoitusjyrsintämenetelmää. Sekoitusjyrsintämenetelmällä voidaan Tiehallinnon (2007 b) mukaan poistaa tien pinnan alapuolisessa kerroksessa ongelmia aiheuttava päällyste tai sidottu kerros. Sekoitusjyrsintäkaluston tulee täyttää stabilointikalustolle asetetut vaatimukset, joten stabiloidut rakenteet voidaan purkaa ja asentaa takaisin paikalleen tai rakenteeseen sekoitusjyrsintäkaluston avulla (Liikennevirasto 2014). Stabiloidun kantavan kerroksen uudelleenlujittamiseen vaadittavaa uusiomateriaalisideaineseoksen sideainemäärää voisi tutkia laboratoriossa.

10 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tutkittiin uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen sisältämien päällystettyjen vanhojen tierakenteiden kuntoa ja vaurioitumista. Tutkimuksessa selvitettiin viiden koerakennuskohteen vaurioituminen visuaalisella vaurioinventointimenetelmällä. Vaurioinventoinnin perusteella laskettiin koerakennuskohtekohtaiset tienkäyttäjän vauriosummat sekä vauriosumman kehittyminen seurantajakson aikana. Kohteiden kuntoa ja vaurioitumista tutkittiin myös saatavilla olevan PTM-mittausaineston avulla. PTM-mittausaineistosta määritettiin päällysteen pituus- ja poikkisuuntaista tasaisuutta kuvaavat IRI ja urasyvyys. PTM-mittausaineistosta tutkittiin IRI ja urasyvyys myös tutkimuskohteiden vertailurakenteista, joita tässä työssä edustivat:

- Rautavaaran (Kt87) koerakennuskohteen yhteyteen rakennettu teräsverkkorakenne
- Vöyryn (Mt718) koerakennuskohteen stabiloidut kantavat kerrokset
- Inkoon (Yt 11146) koerakennuskohteen vaahtobitumistabilointiosuus

Tutkittavien koerakenteiden urautumista verrattiin Dettenbornin (2017) laatimaan malliin Suomen tieverkon keskimääräisestä urautumisesta koerakennuskohteita vastaavissa olosuhteissa.

Tutkimuksessa selvitettiin uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun materiaalin ominaisuuksia rakennenäytteenotolla viidessä koerakennuskohteessa. Rakennenäytteenotossa koerakenteista porattiin sylinterin muotoisia rakennenäytteitä, joista määritettiin laboratoriossa yksiaksiaalinen puristuslujuus. Yksiaksiaalisen puristuslujuuden määrittämisen avulla tutkittiin uusiomateriaaliseoksella stabiloidun murskeen lujuuden pitkäaikaiskehitystä. Yksiaksiaalisen puristuskokeen jännitys-muodonmuutoskuvaajista määritettiin myös rakennenäytteiden E_{50} -sekanttimoduulit.

Kolmesta rakennenäytteestä määritettiin myös halkaisuvetolujuus epäsuoralla vetokokeella. Halkaisuvetolujuuden määrittämisen tarkoituksena oli arvioida materiaalin ominaisuuksia ja kestävyyskuormitettavissa olosuhteissa syntyviä vetojännityksiä vastaan.

Uusiomateriaalisideaineseoksella stabiloidun murskeen jäykkyysmoduuli selvitettiin Odemarkin mitoitusyhtälön ja kantavuusmittausten avulla tehdyn takaisinlaskennan avulla.

Tutkimuksessa havaittiin uusiomateriaalisideaineseoksella rakennetun stabiloidun kantavan kerroksen lujuuden pitkäaikaiskehitys ja kesto Suomen ilmastorasituksissa. Uusiomateriaalisideaineseoksella voidaan toteuttaa suuren kantavuuden omaavia päällysrakenteita, mikä havaittiin pudotuspainolaitemittaustulosten käsittelyssä. Takaisinlaskennassa stabiloidun kantavan kerroksen rakennemoduulin suuruus vaihteli 1400 – 2500 MPa:n välillä.

Huonon kantavuuden omaavan alusrakenteen havaittiin kiihdyttävän uusiomateriaalisideaineseoksella toteutettavan kantavan kerroksen stabiloinnin vaurioitumista. Stabiloinnin ja päällysteen väliin rakennettavan tasausmurskekerroksen ei havaittu tässä tutkimuksessa vähentävän päällysteen vaurioitumista. Uusiomateriaalisideaineseoksella toteutettavan stabiloinnin avulla voidaan rakentaa elinkaarikustannuksiltaan luonnonkiviainesrakennetta edullisempia päällysrakenteita, mikäli alusrakennolosuhteet ovat riittävän hyvät.

LÄHTEET

- Aalto-yliopisto, 2015. Rak-82.3131 – Concrete Technology 2, luentokalvot. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/131041/mod_label/intro/Rak-82_3131_luentokalvoja.pdf/ [viitattu 4.2.2017].
- Ahlqvist, E., 2000. Teollisuuden sivutuotteiden käyttö tierakenteissa, Rakentaminen Pt 11146 Inkoo. SCC Viatek Oy.
- Apilo, L., 1996. Pehmeiden emulsiotekniikalla valmistettujen asfalttipäällysteiden suunnittelu. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 152 s. ISBN 951-38-4525-7
- BP Bitumen, 2007. Bitumen basics. Saatavissa: <http://documents.tips/documents/bitumen-basicspdf.html/> [viitattu: 13.3.2017].
- Dettenborn, T., 2017. Diplomi-insinööri, Ramboll Finland Oy. Päällysteen urautumismallin kehittäminen.
- Ehrola, E., 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy, Helsinki. 365 s. ISBN 951-682-338-6
- Eskola, K., 2016. Renkaiden osto-opas. Moottori 10/2016, Vantaa, s. 61 – 62.
- Forsman, J., 2017. Diplomi-insinööri, Ramboll Finland Oy. Haastattelut.
- GTK, 2013. Maankamara. Maanmittauslaitos. [verkkodokumentti] Saatavissa: <http://gtkdata.gtk.fi/maankamara/> [viitattu 18.9.2017].
- Hietala, P., a, 2008. LTY, Ecoroad. Pilottikohde: Teuroisten paikallistien 14547 kerrosstabilointi. Koerakenne: Vanhan päällysteen ja kantavan kerroksen stabilointi (tuhka-sementti-sideaine). Rakentaminen ja seuranta. Raportti. Ramboll Finland Oy. 44 s.
- Hietala, P., b, 2008. LTY, Ecoroad. Pilottikohde: Hanhikempin yksityistie, kerrosstabilointi. Koerakenne: vanhan päällysrakenteen yläosan stabilointi (sideaineena sementti ja lentotuhka). Rakentaminen ja seuranta. Raportti. 33 s.
- Hölttä, J., 2012. Sekoitusjyrsinnän soveltuminen alempiasteisen tieverkon parantamistoimenpiteeksi. Aalto-yliopisto, diplomityö.

InfraRYL, 2017. InfraRYL Infrarakentamiset yleiset laatuvaatimukset. Päälly- ja pintarakenteet. Rakennustietosäätiö RTS. Rakennustieto Oy. 272 s. ISBN 978-952-267-213-1

Jokinen, T., 2007. Hanhikempin (Yt 14800) koerakennuskohteen laadunvalvonta.

Jyrävä, H., 2017. Diplomi-insinööri, Ramboll Finland Oy. Haastattelut.

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

Kiviniemi, O., 2011. Keski-Suomen UUMA. Seurantatutkimukset 2011. Ramboll Finland Oy. 15 s.

Kiviniemi, O., 2012. Keski-Suomen UUMA. Seurantatutkimukset 2012. Ramboll Finland Oy. 16 s.

Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P., ja Forsman, J., 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja: energiatuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. Saatavissa: http://projektit.ramboll.fi/tuhkarakentaminen/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf [viitattu: 22.1.2017].

Laine-Ylijoki, J., Wahlström, M., Peltola, K., Pihlajaniemi, M., ja Mäkelä, E., 2002. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. VTT Tiedotteita – Research notes 2141. Espoo. 51 s. ISBN 951-38-5892-8

Laaksonen, R., & Laukkanen, K., 2007. Bitumia sisältävien kerrosstabilointien kehittämistutkimus. Laboratoriokokeet. Tiehallinnon selvityksiä 44/2007. Helsinki. 91 s. ISBN 978-951-803-963-4

Lemminkäinen, 2014. Stabilointi. Saatavissa: <http://www.lemminkainen.fi/globalassets/documents/infra/fi/paving/stabilointi.pdf> [viitattu: 24.3.2017].

Lemminkäinen, 2006. Asfalttirakenteiden suunnittelun käsikirja. Lemminkäinen päällystysyksikkö. Helsinki. 108 s.

Liikennevirasto, 2014. Uusiomateriaaliopas. Uusiomateriaalien käytön kehittäminen UUMA2-Ohjelman väylähankkeilla (Luonnos 28.2.2014). Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lr_2014_uusiomateriaaliopas_luonnos_28.2.2014_web.pdf [viitattu: 6.3.2017].

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

Maijala, A., 2008. LTY.Ecoroad - Elinkaaritarkastelut. 37 s.

Matinlauri, S., 2016. Vaihtoehtoisia maarakennusmateriaaleja sisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen. Tampereen teknillinen yliopisto, diplomityö.

NLA, 2017. National lime association. Lime the essential chemical (2017). Saatavissa: http://lime.org/documents/publications/free_downloads/lime-essential-chemical.pdf [viitattu: 6.2.2017].

PANK, 2008. Kerrosstabilointimassan jäädytys-sulatuskestävyys. Päällystealan neuvottelukunta ry. Saatavissa: http://pank.fi/file/400/387_pank_4305_2008.pdf/ [viitattu: 11.4.2017].

Petäjä, S., & Spoof, H., 2000. Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus). Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo. 15 s.

Petäjä, S., & Spoof, H., 2001. Päällysrakenteen elinkaarikustannusanalyysi. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 – 2001. Menetelmäkuvaus TPPT 20. Espoo. 42 s.

Pihlajamäki, J., & Spoof, H., 2001. Kuormituskestävyyssmitoitus – Päällysrakenteen väsyminen. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 – 2001. Menetelmäkuvaus TPPT 17. Espoo. 31 s.

Rahiala, J., 1988. Maabetoni ja betonipäällysteet. .. käytössä maailmalla, sopivatko Suomeen?... Rakennusaineteollisuusyhdistys. Tie- ja vesirakennushallitus. Betonitieprojekti. Helsinki. 275 s. ISBN 951-47-1603-5

Ramboll, 2000. Sivutuotepilotti 11146 Degerby – Tyräs, Inkoo. Kohteen yleiskuvaus.

Ramboll a, 2008. UUMA-inventaari. Lentotuhka ja rikinpoistolopputuote kerrosstabiloinnin sideaineina. Pt 11146, plv 0-5400 Solbergintie välillä Degerby – Tyräs (Inkoo). Luopioinen. 8 s.

Ramboll b, 2008. UUMA-inventaari. Kt 8714/14500-10500, Rautavaara. Fosfokipsi ja lentotuhka kerrosstabiloinnin sideaineina. 11 s.

RIL 261-2013, 2013. Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 257 s.

Roadex Network, 2017. Permanent deformation. E-Learning package. Saatavissa: <http://www.roadex.org/elearning/> [viitattu 31.7.2017].

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

Rossi, J., 2016. Modifioitujen bitumipäällysteiden soveltuvuus vähäliikenteisille teille. Tampereen teknillinen yliopisto, diplomityö.

Sarkkinen, M., Kemppainen, K., Kujala, K., Gehör, S., 2016. Biopolton lentotuhkat. Uudet symbioosituotteet ja käyttösovellutukset (Geosynergy). Kajaanin ammattikorkeakoulun julkaisusarja B 57/2016. ISBN 978-952-9853-93-9

SFS-EN 13286-42, 2003. Sitomattomat ja hydraulisesti sidotut seokset. Osa 42: Koekappaleiden epäsuoran vetolujuuden määrittäminen. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki. 8 s.

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

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

Teknoliateollisuus ry., 2017. Raudan valmistus masuunissa. Saatavissa: new.teknoliateollisuus.fi/file/7426/G_RAUTAMASUUNISSA.pdf.html [viitattu 5.2.2017].

Tiehallinto, 2001. Palvelutasomittaus (PTM) Tien rakenteen parantamisen suunnittelussa. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 – 2001. Menetelmäkuvaus TPPT 16. Espoo. 14 s. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/16-ptm.pdf> [viitattu 9.8.2017].

Tiehallinto a, 2002. Stabiloitiohje. Helsinki. 48 s. ISBN 951-726-843-2

Tiehallinto b, 2002. Kantavan kerroksen stabilointi. Helsinki. 28 s. ISBN 951-726-842-4

Tiehallinto c, 2002. Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus. Helsinki. 204 s. ISBN 951-726-868-8

Tiehallinto, 2004. Tierakenteen suunnittelu. Helsinki. 69 s. ISBN 951-803-403-6

Tiehallinto a, 2005. Fosfokipsistabilointi. Loppuraportti. S14-Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito. Tuotantotekniikat ja koerakentaminen. 24 s. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/s14/docs/loppuraportti_fosfokipsistabilointi.pdf [viitattu:10.4.2017].

Tiehallinto b, 2005. Tieomaisuuden yhtenäinen kuntoluokitus. Tiehallinnon selvityksiä 57/2005. Helsinki. 45 s. ISBN 951-803-617-9

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

Tiehallinto b, 2007. Kerrosstabilointien täysmittakaavakokeet. Helsinki. 71 s. ISBN 978-851-803-964-1

Tiehallinto c, 2007. Kerrosstabilointien kehitysprojekti INFRA-STABIL. Projektin yhteenveto. Helsinki. 23 s. ISBN 978-951-803-966-5

Tiehallinto d, 2007. Bitumia sisältävien kerrosstabilointien pohjoismaiset testausmenetelmät. Helsinki. 48 s. ISBN 978-951-803-962-7

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

Tielaitos, 1992. Sementtistabilointiohje. Helsinki. 51 s. ISBN 951-47-6848-5

Tielaitos, 1994. Päällystevaurioiden inventointiohje. Helsinki. 44s.

Tielaitos, 1998. Hydraulisilla sideaineilla sidottujen materiaalien laadunvarmistus, osa 1. Sementillä sidotut materiaalit. Kirjallisuusselvitys. Helsinki. 52 s. ISBN 951-726-437-2

Tielaitos, 1999. Bitumi-sementti-komposiittien ominaisuudet ja tutkimusmenetelmät. TPPT loppuraportti. Projekti M 41. Tielaitoksen selvityksiä 42/1999. Helsinki. 66 s. ISBN 951-726-585-9

Tielaitos, 2000. Masuunihiekkastabilointi. Helsinki. 26 s. ISBN 951-726-651-1

TVL, 1979. Kipsin ja turvetuhkan käyttö stabiloinnissa. Tie- ja vesirakennuslaitos. Kuopion piiri. Kuopio. 24 s.

Vasama, M., 2017. Betonin pahat ilmaivaivat. Yleisradio. MOT. [verkkodokumentti] Julkaistu 13.3.2017. Saatavissa: <https://areena.yle.fi/1-3849183/> [viitattu 18.9.2017].

Vehmas, M., 1995. Rikinpoistotuotteiden soveltuvuus tien ja kadun rakentamiseen. Teknillinen korkeakoulu, diplomityö.

Vehmas, T., & Kronlöf, A., 2015. Jättemateriaaleista valmistettu hydraulisesti sitoutuva muurirakenne. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 60 s.

Viatek Oy, 1998. Tuhkarakenteiden rakennemuodulien ja lämmönjohtavuuden määrittäminen mittaustuloksista takaisinlaskemalla. Teknillinen korkeakoulu, tielaboratorio, Espoo. 47 s.

Viirola, H., & Raivio, P., 2000. Portlandsementin hydrataatio. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 65 s. ISBN 951-38-5763-8

Watn, A., Øiseth, E., Johanson, M., Forsman, J., Gustavson, H., Hegnestål, L., 2004.

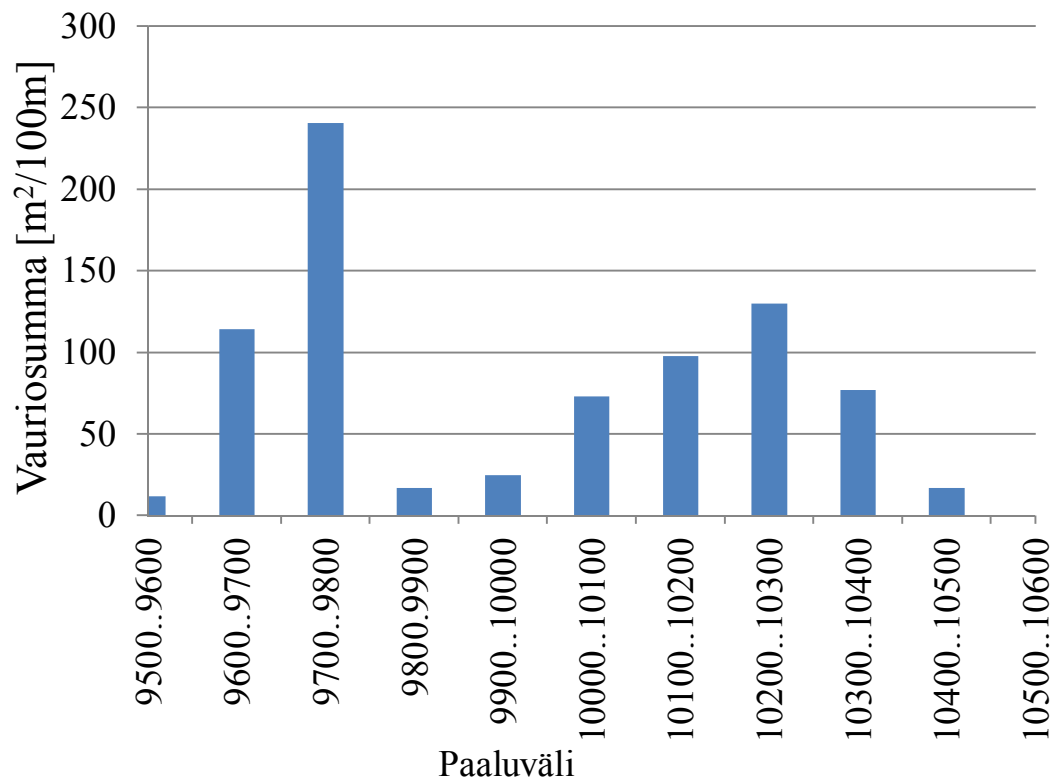
LWAgeolight: LWA for Roads and Railways. Saatavissa:

http://www.weber.se/fileadmin/user_upload/pdf/leca/dokument/LWA_Geolight_Final_report_SINTEF.pdf [viitattu: 24.3.2017].

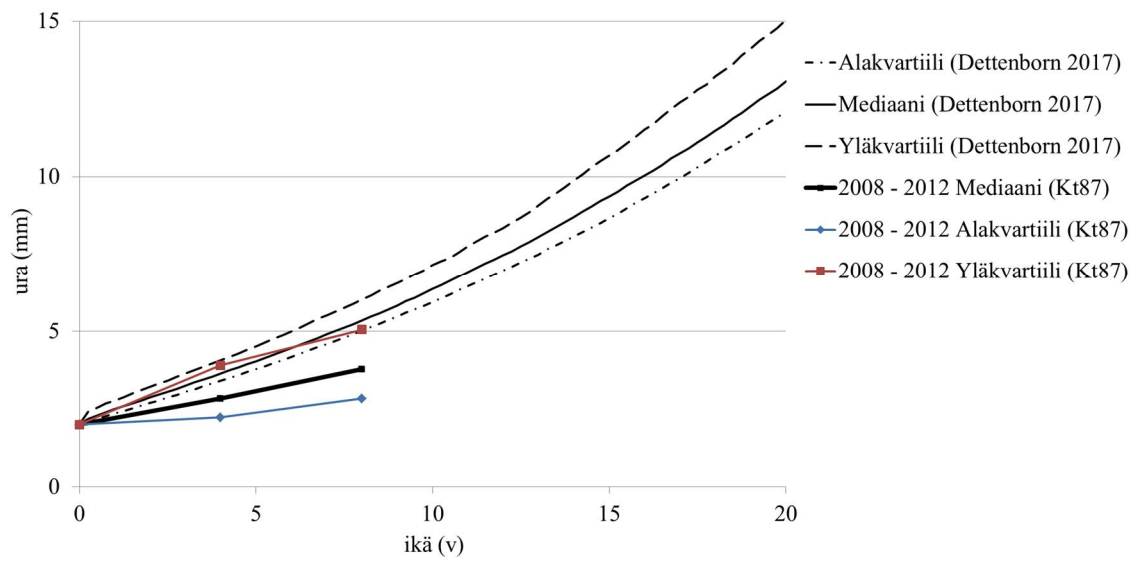
Åhnberg, H., 2006. Strength of stabilised soils – A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder. Lund University, doctoral thesis. 80 s. Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r16.pdf> [viitattu 6.2.2017].

LIITTEET

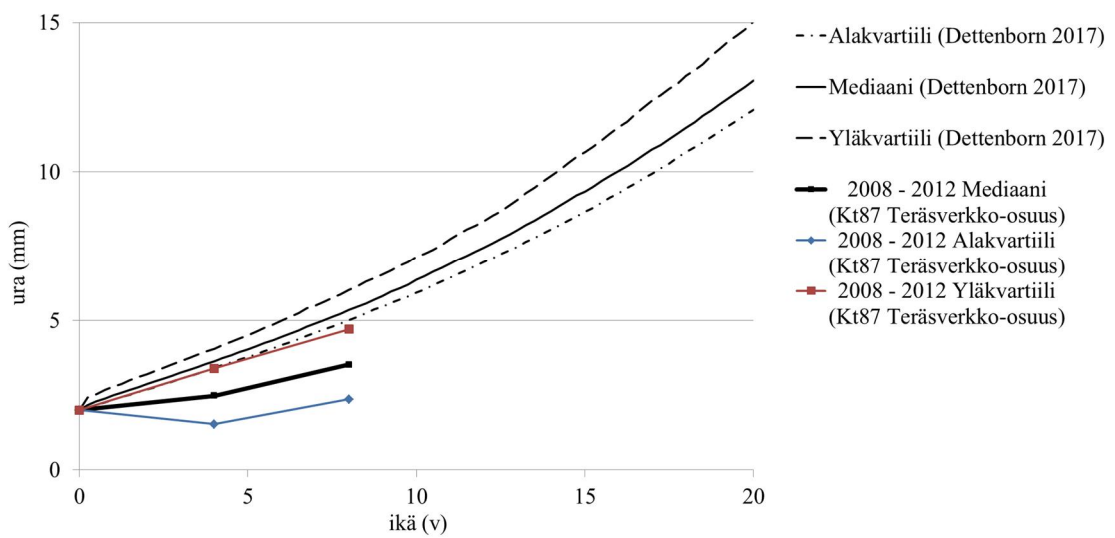
Liite 1: Tutkimuskohteiden vaurioituminen ja kunto.



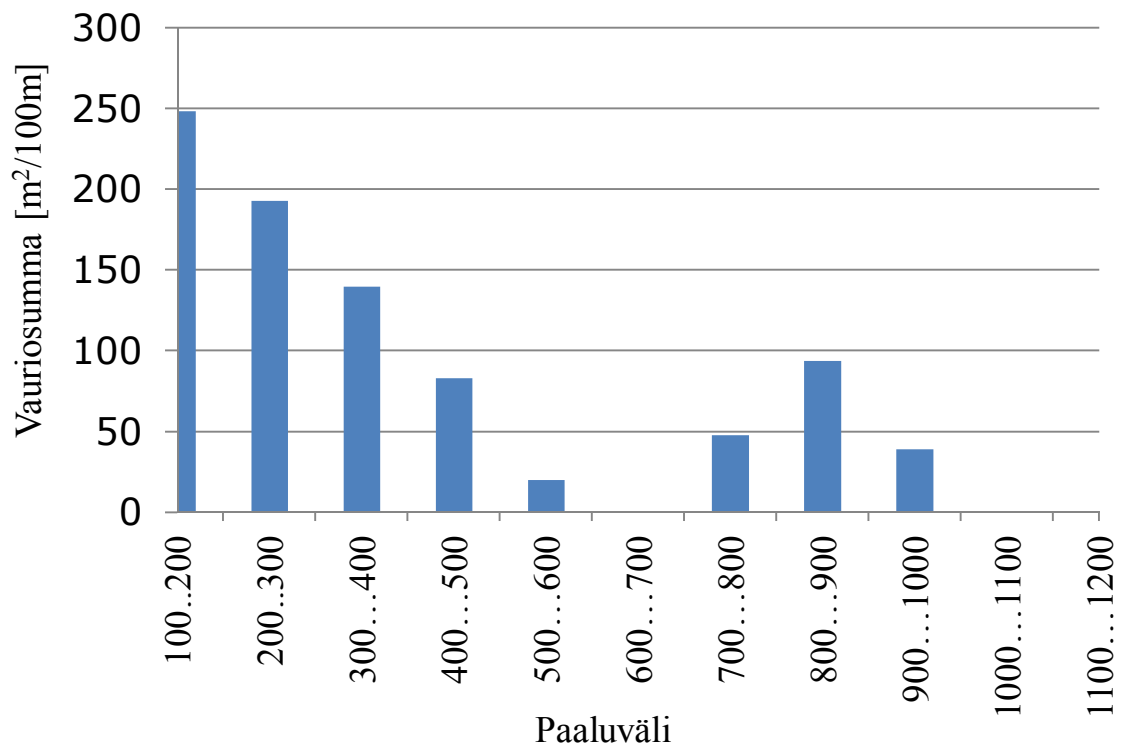
Kuva 29. Rautavaara (Kt87) tienkäyttäjän vauriosumma.



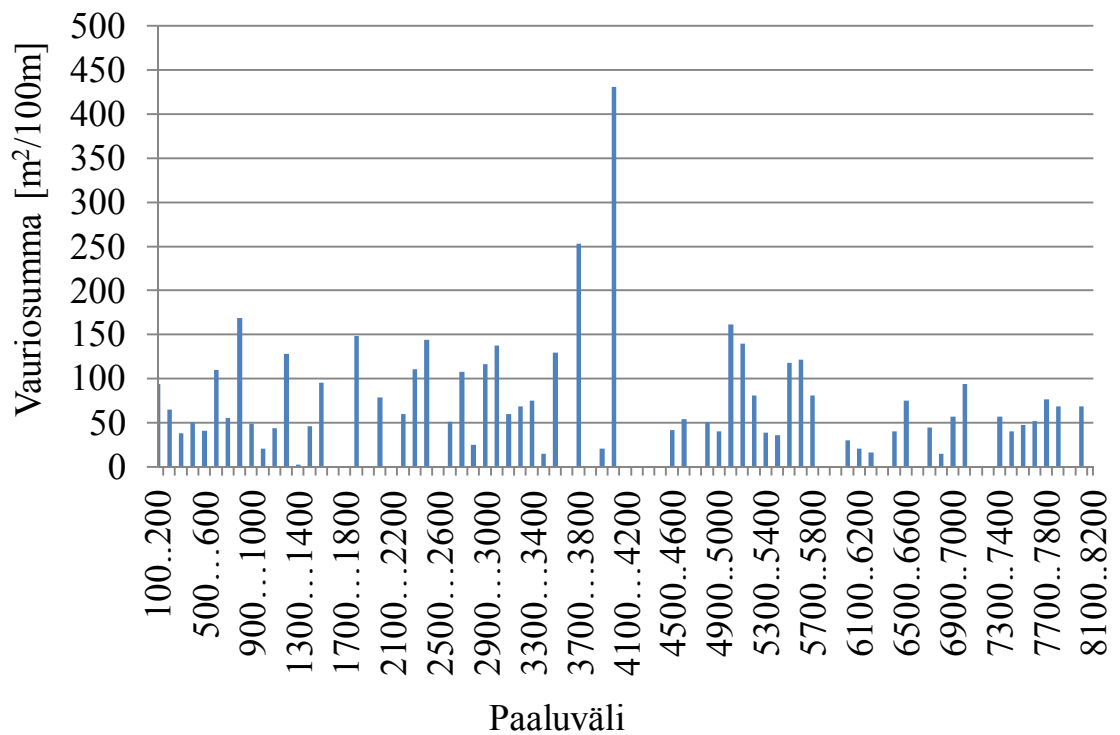
Kuva 30. Rautavaara (Kt87) stabiloidun kantavan kerroksen sisältämän osuuden urautuminen.



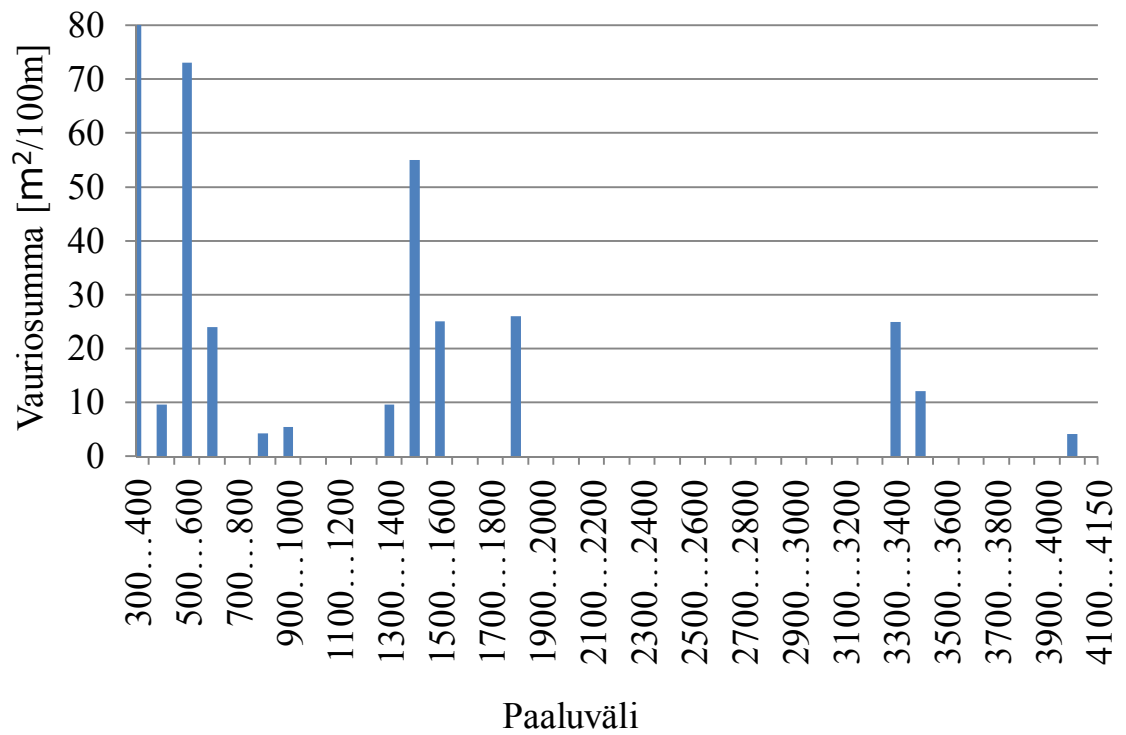
Kuva 31. Rautavaara (Kt87) teräsverkkorakenteen sisältämän osuuden urautuminen.



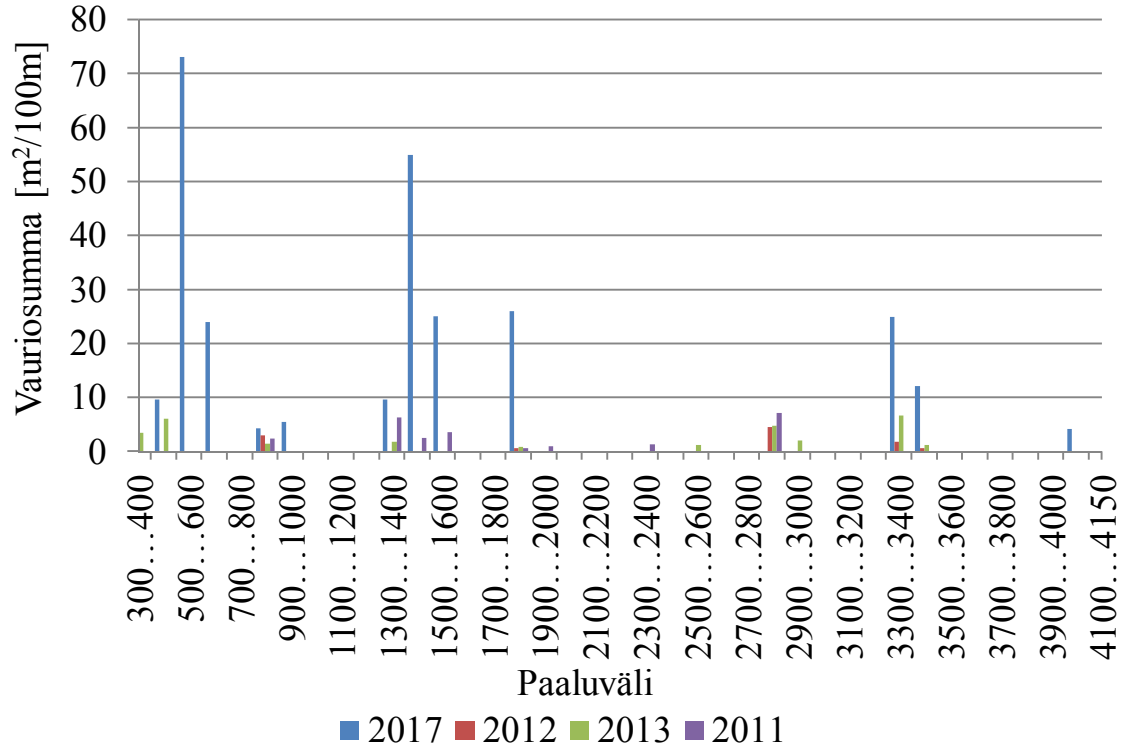
Kuva 32. Hanhikemppi (Yt 14800) tienkäyttäjän vauriosumma.



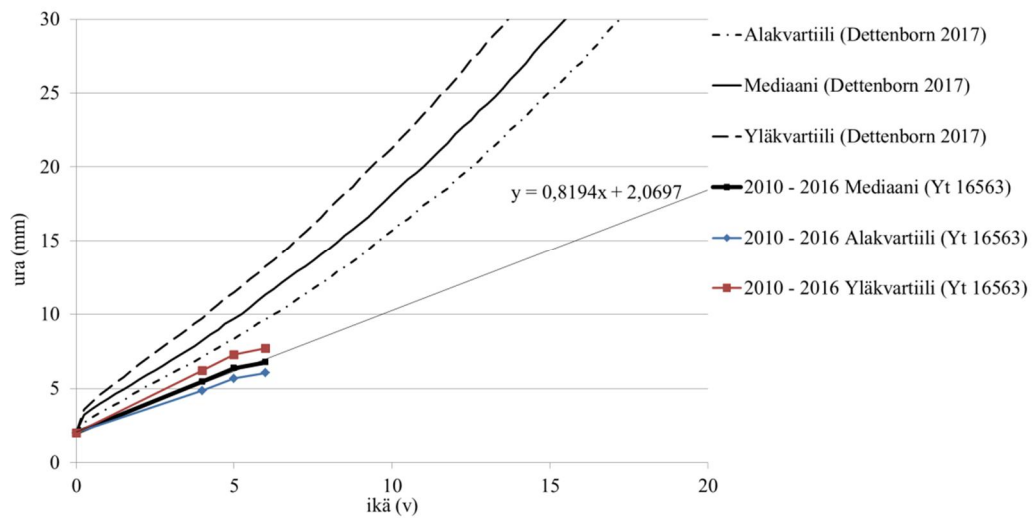
Kuva 33. Teuroinen (Yt 14547) tienkäyttäjän vauriosumma.



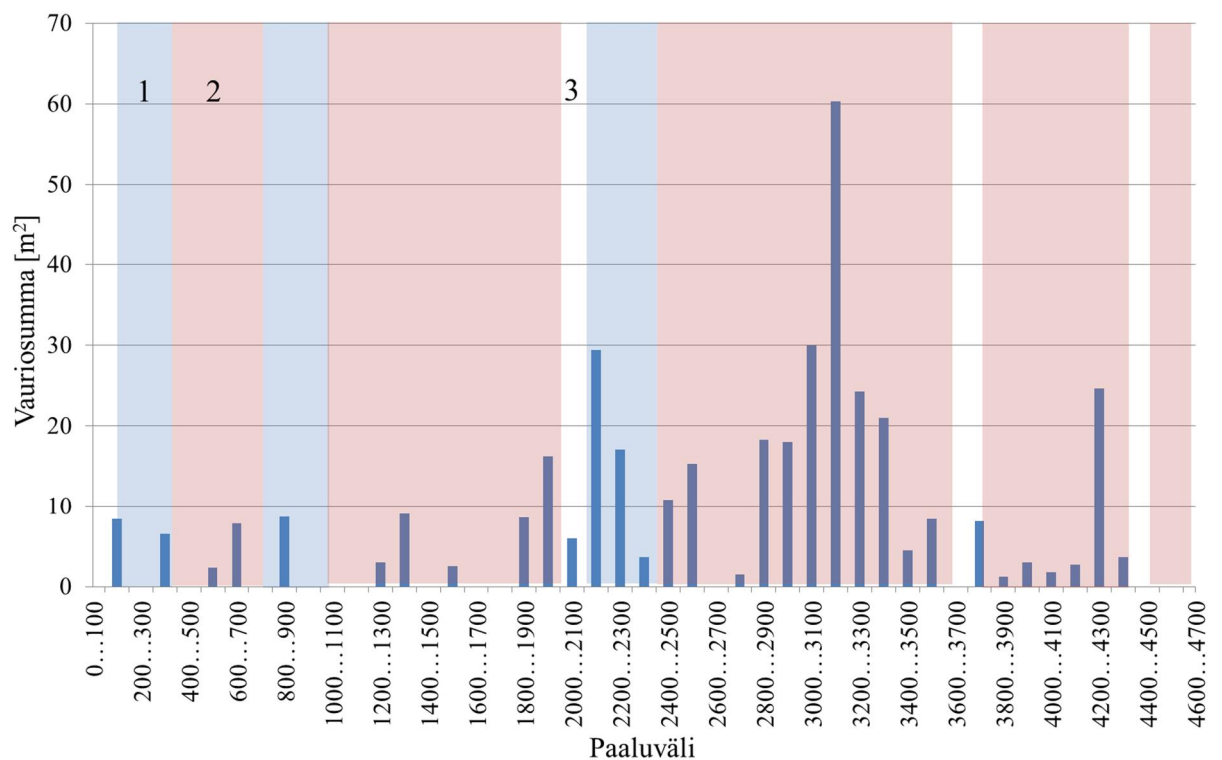
Kuva 34. Seppola-Kaipola (Yt 16563) tienkäyttäjän vauriosumma.



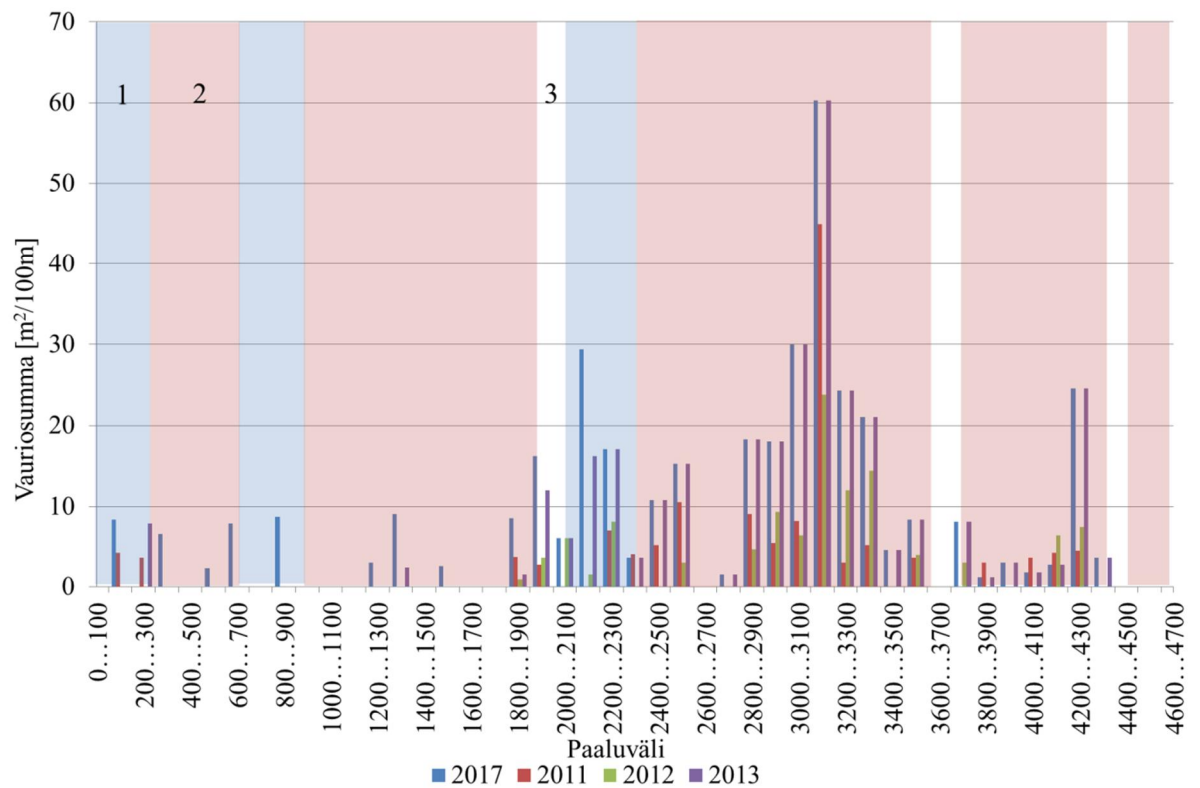
Kuva 35. Seppola-Kaipola (Yt 16563) tienkäyttäjän vauriosumman kehittyminen eri seurantamittausten välillä.



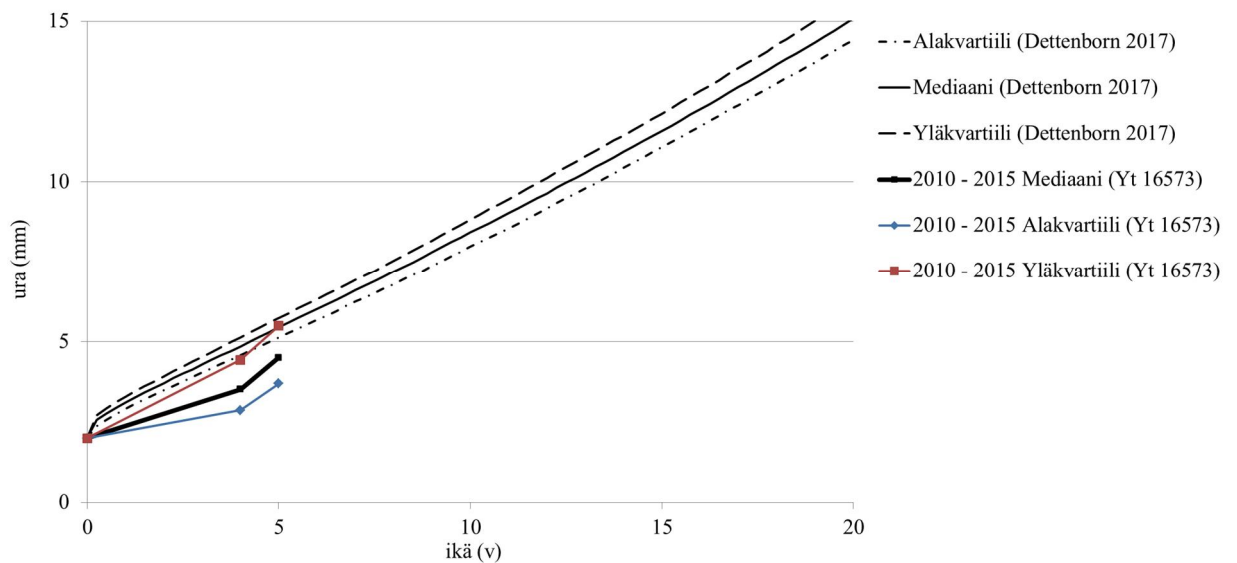
Kuva 36. Seppola-Kaipola (Yt 16563) koerakennuskohteen urautuminen ja mitattujen urasyvyyksien mediaaniarvojen kautta piirretty suora.



Kuva 37. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) tienkäyttäjän vauriosumma. Rakennetyypit merkitty kuvaan: 1) Stabiloitu kantava kerros, 2) Stabiloitu kantava kerros + jakavan kerroksen massiivituhka ja 3) pelkkä päällystys.

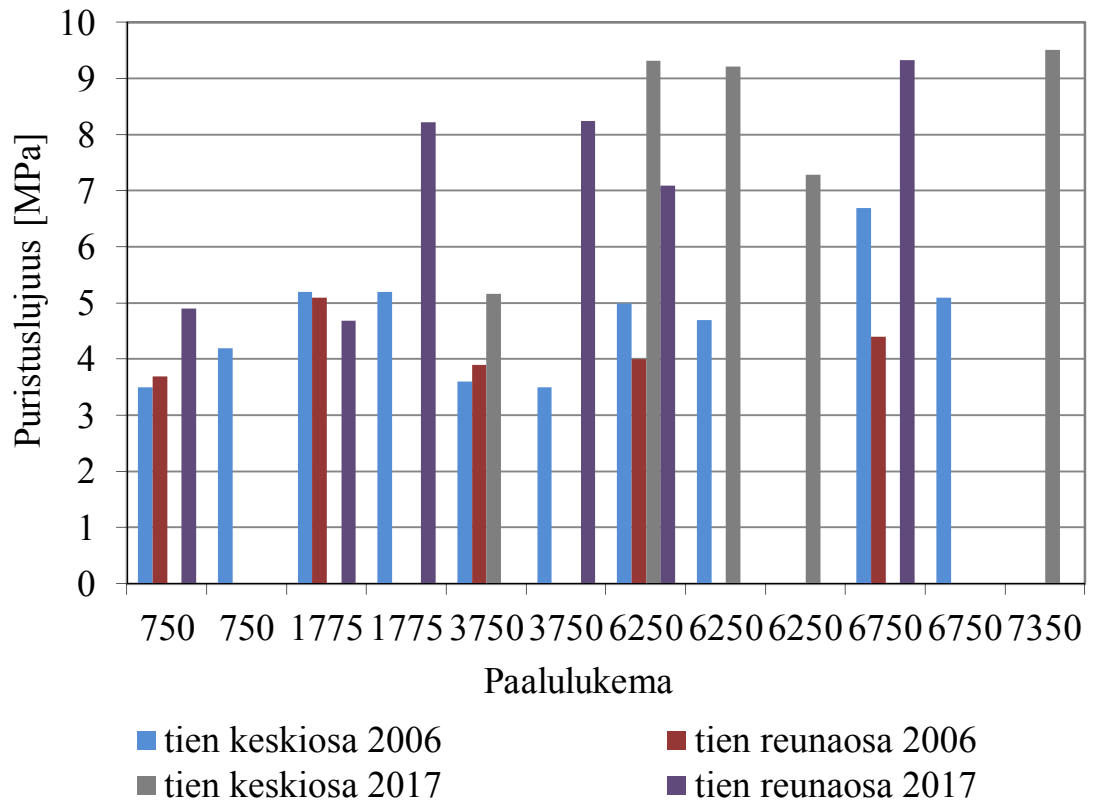


Kuva 38. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) tienkäyttäjän vauriosumman kehittyminen eri seurantamittausten välillä. Rakennetyyppien numerointi, kuten kuvassa 37.

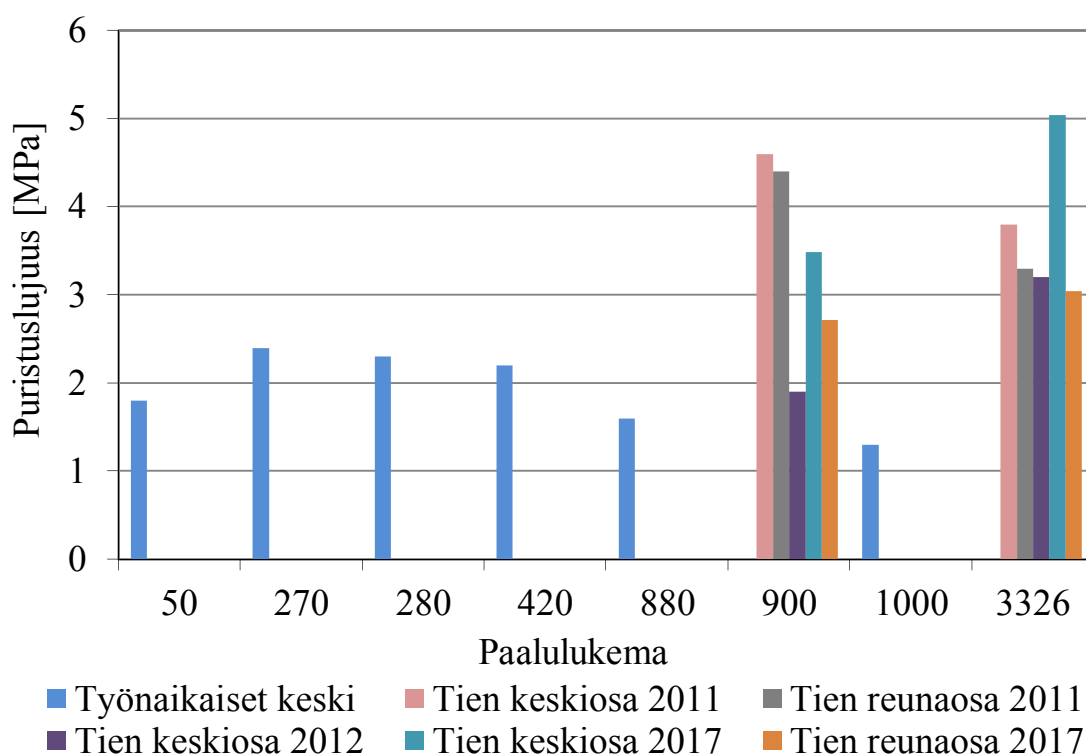


Kuva 39. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) urautuminen stabiloidun kantavan kerroksen sisältämällä osuudella.

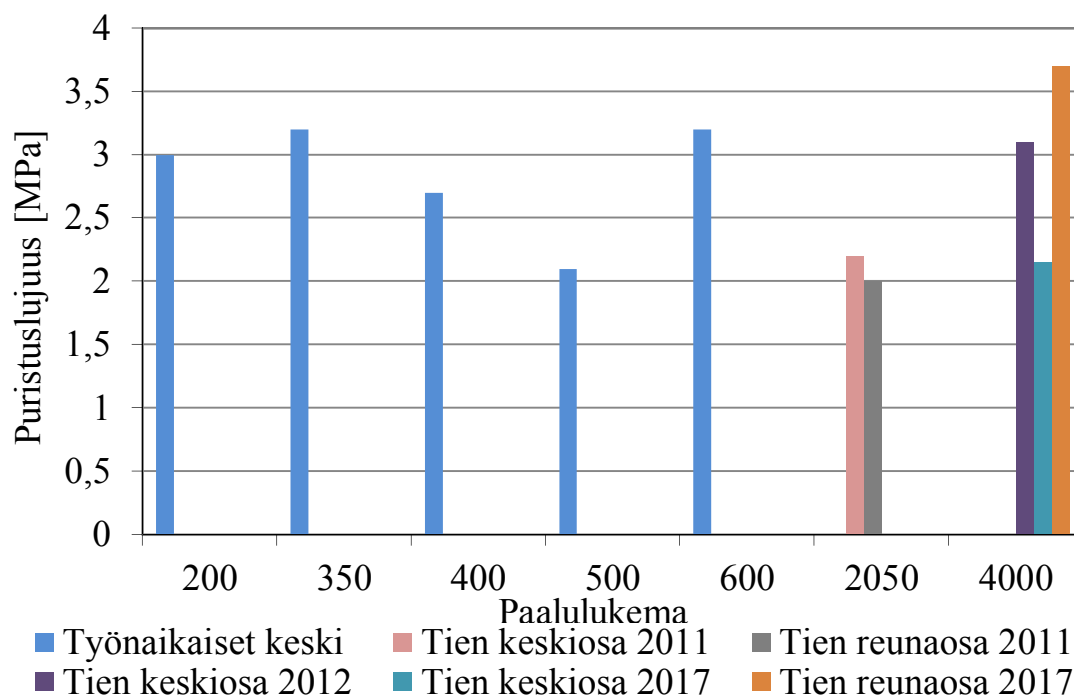
Liite 2: Tutkimuskohteiden rakennäytteiden yksiakselisen puristuslujuuden pitkäaikaisseuranta



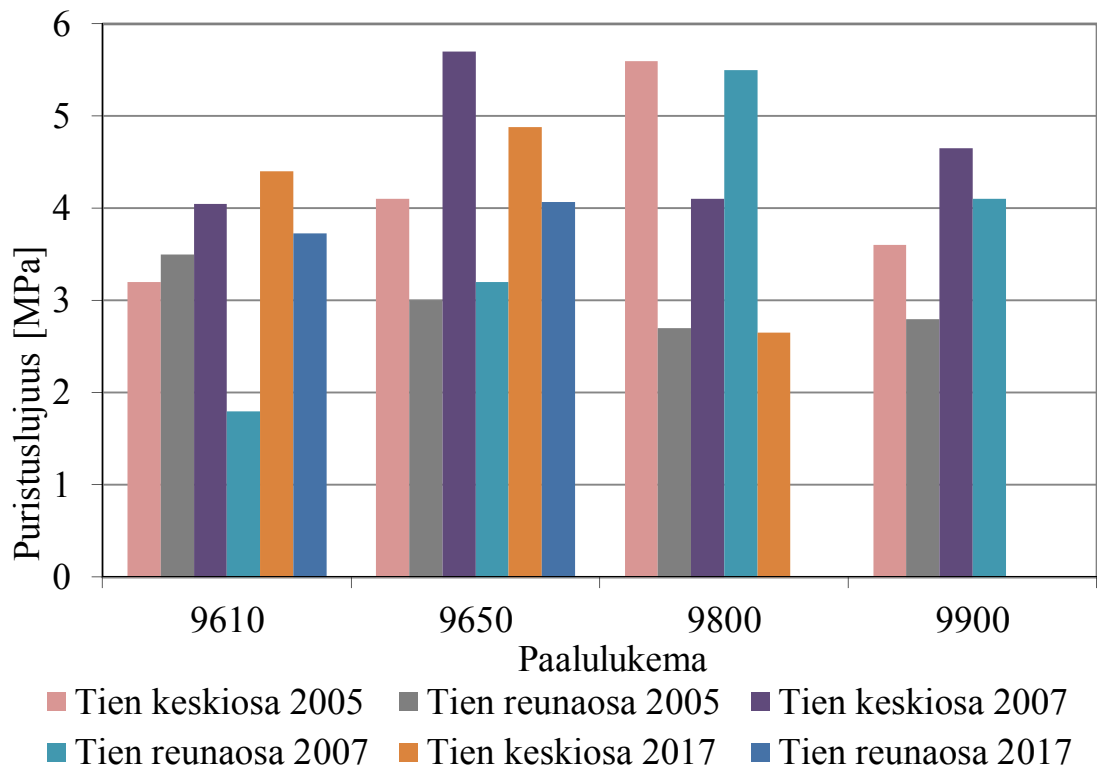
Kuva 40. Teuroinen (Yt 14547) rakennäytteiden puristuslujuudet 2006 ja 2017.



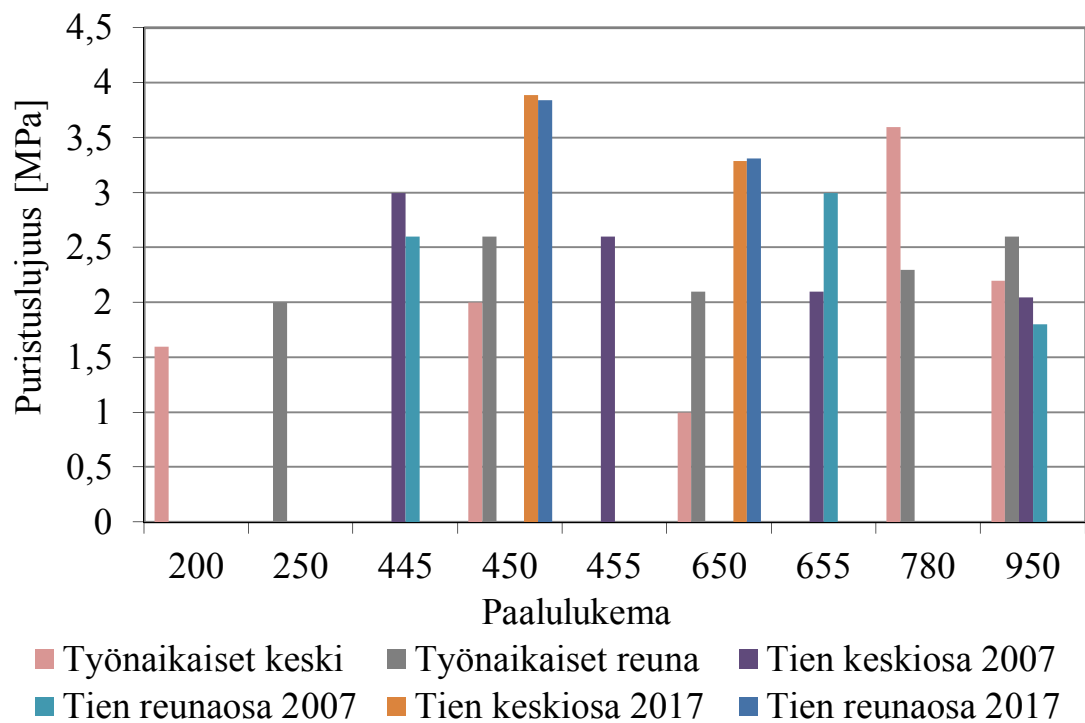
Kuva 41. Seppola-Kaipola (Yt 16563) rakennenäytteiden puristuslujuudet 2011, 2012, 2017 ja työnaikaiset koekappaleet.



Kuva 42. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) rakennenäytteiden puristuslujuudet 2011, 2012, 2017 ja työnaikaiset koekappaleet.

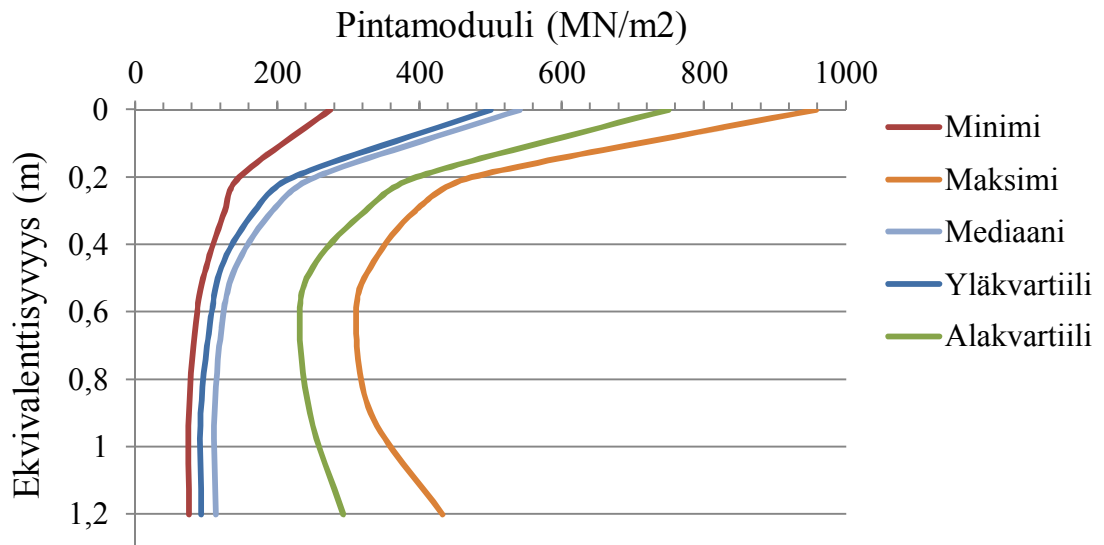


Kuva 43. Rautavaara (Kt 87) rakennenäytteiden puristuslujuudet 2005, 2007 ja 2017.

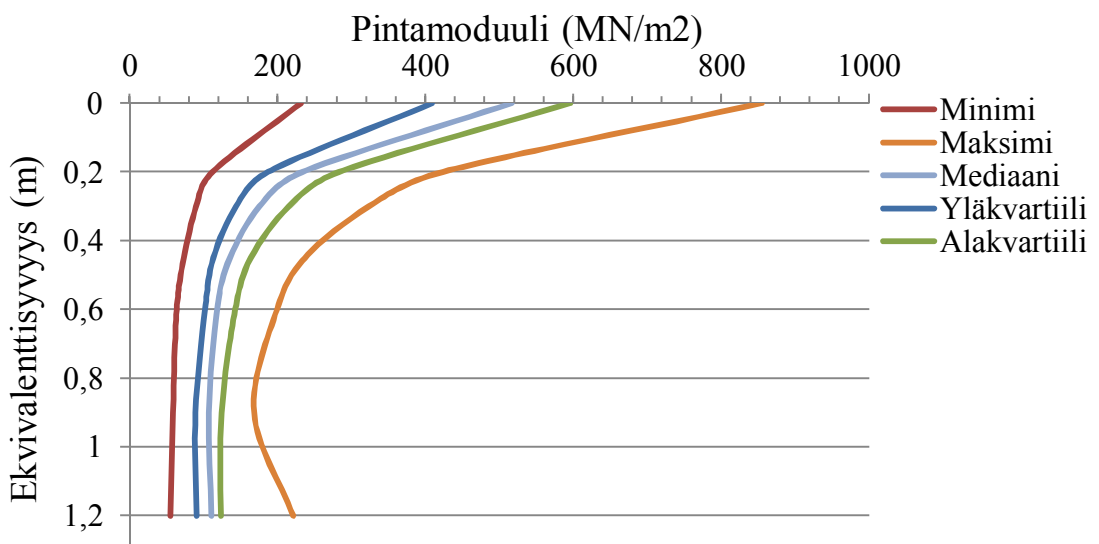


Kuva 44. Hanhikemppi (Yt 14800) rakennenäytteiden puristuslujuudet 2007, 2017 ja työnaikaiset koekappaleet.

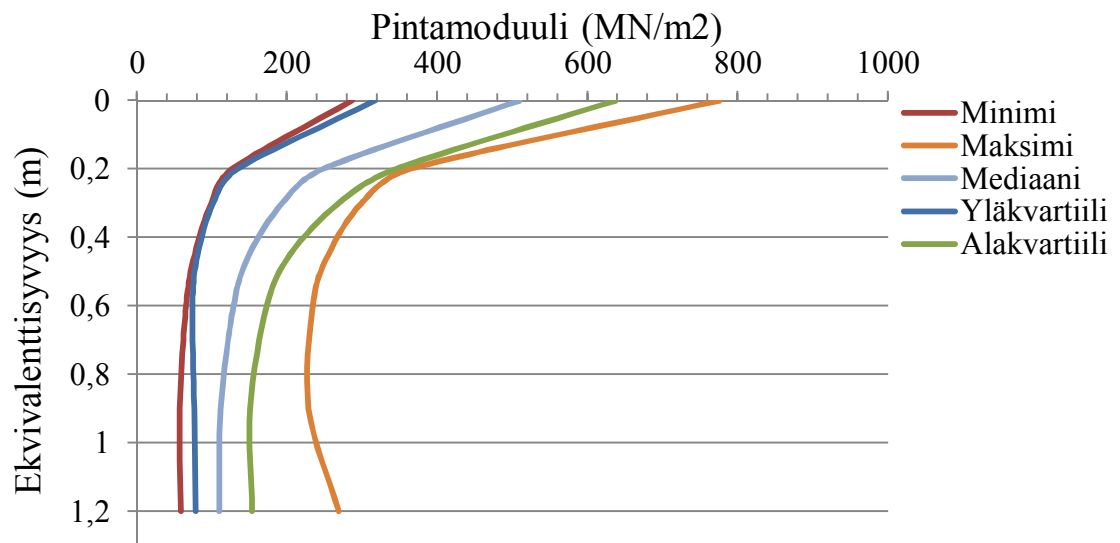
Liite 3. Tutkimuskohteiden pintamoduulikuvaajat



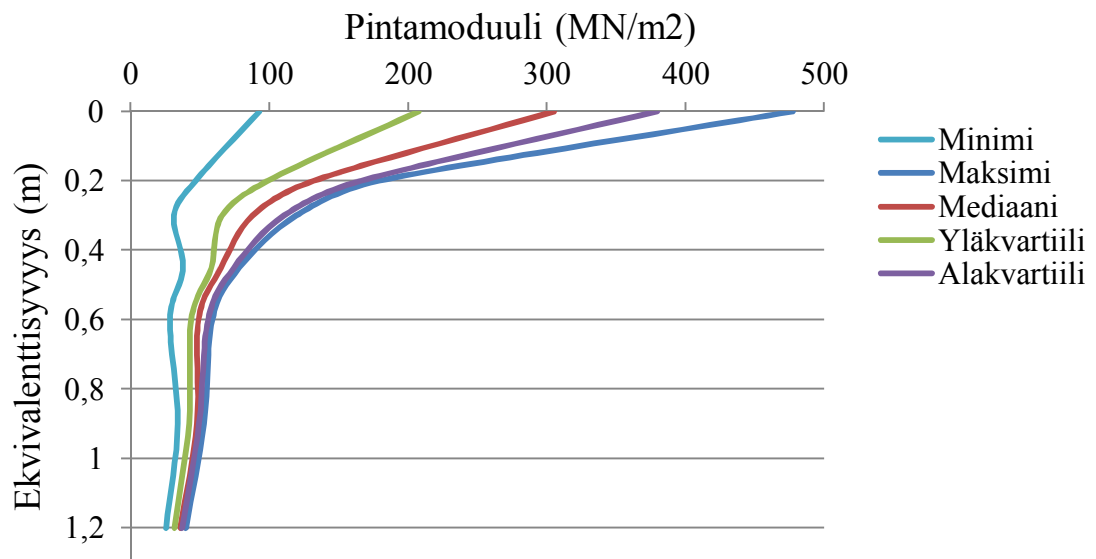
Kuva 45. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) pintamoduulit 2012 stabiloidun kantavan kerroksen osuudella.



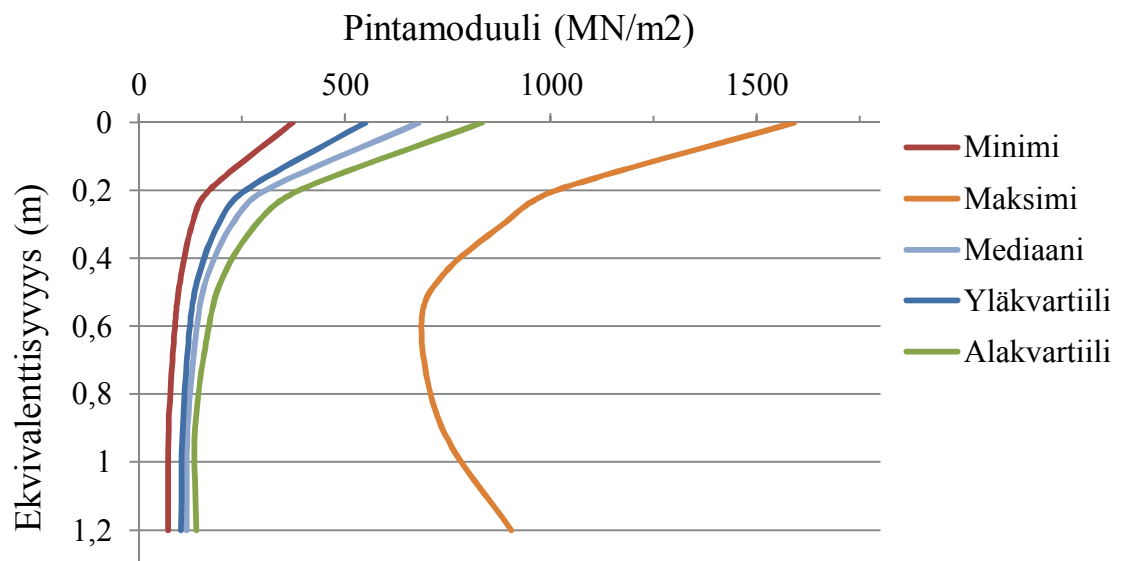
Kuva 46. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) pintamoduulit 2012 stabiloidun kantavan kerroksen + jakavan kerroksen tuhkarakenteen sisältämällä osuudella.



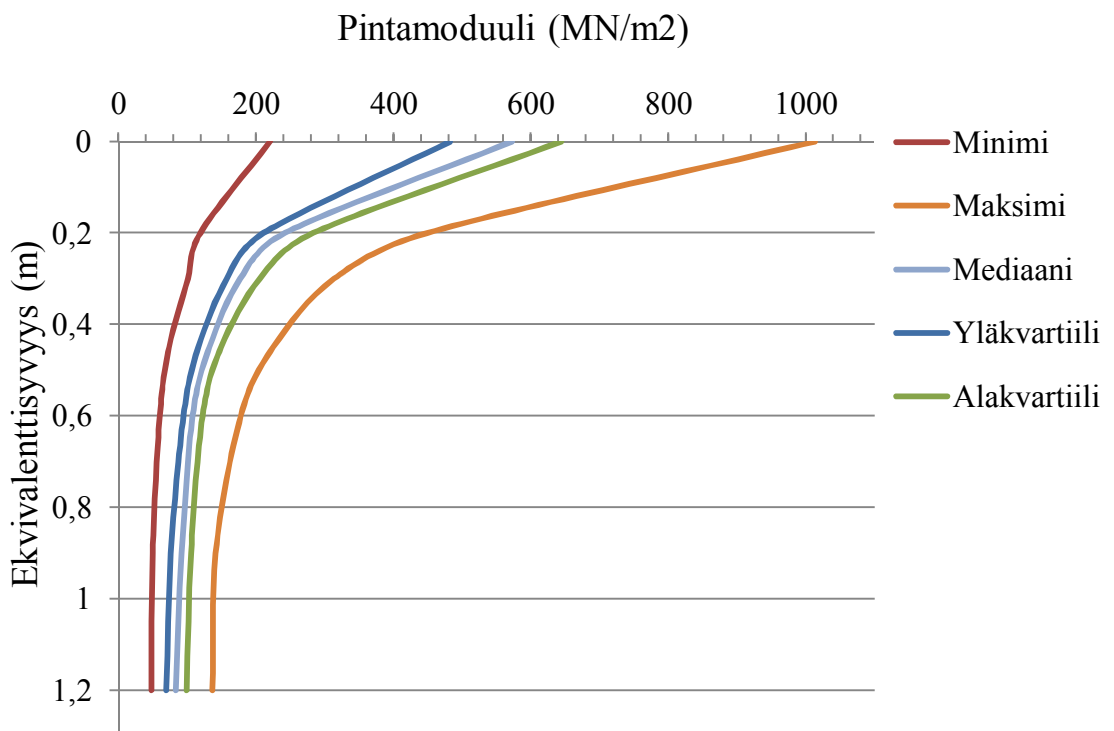
Kuva 47. Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573) pintamoduulit 2012 pelkän uudelleenpäällystyksen sisältämän rakenteen osuudella.



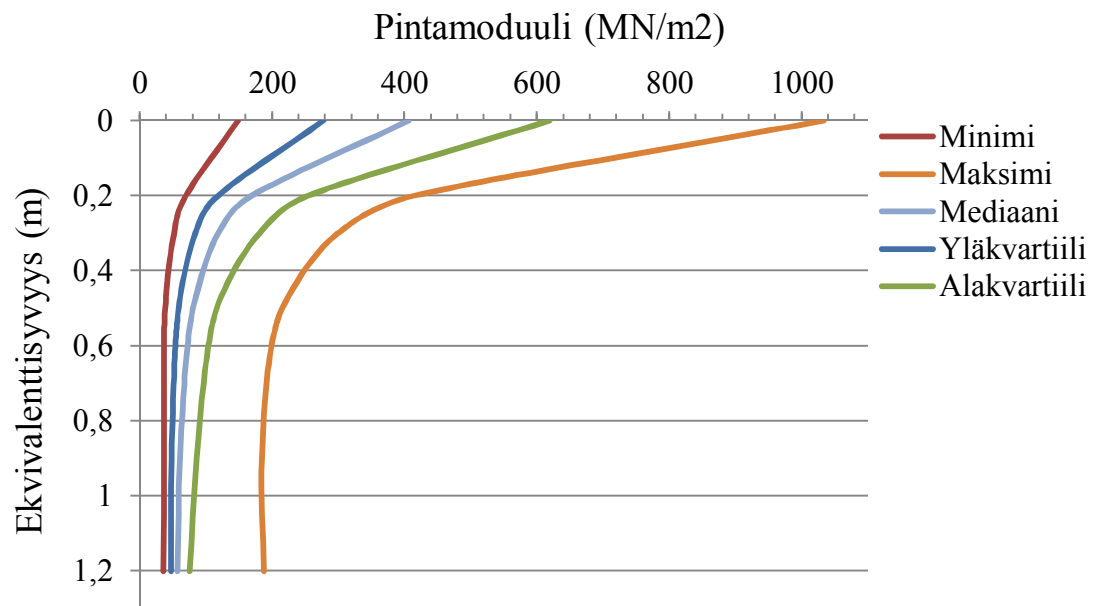
Kuva 48. Inkoo (Yt 11146) pintamoduulit 2002.



Kuva 49. Seppola-Kaipola (Yt 16563) pintamoduulit 2012.



Kuva 50. Rautavaara (Kt87) pintamoduulit 2008.



Kuva 51. Teuroinen (Yt 14547) pintamoduulit 2007.

Liite 4. Tutkimuskohteiden stabiloidun kantavan kerroksen E-moduulin takaisinlaskenta.

TIERAKENTEEN KANTAVUUSMITOITUS ODEMARKIN MENETELMÄLLÄ

Mitoitusyhtälö:

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

Mitoitus tapahtuu syöttämällä mitoitettavalle kerrokselle seuraavat arvot sinisiin ruutuihin:

E_A	mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (1. kerroksessa pohjamaan kantavuus)
h	mitoitettavan kerroksen paksuus
E	mitoitettavassa kerroksessa käytettävän materiaalin E-moduuli sitomattomilla materiaaleilla E-moduulin tulee olla pienempi kuin E_{max} (=6 x E)

Kohteet: Rautavaara (Kt87), Teuroinen (Yt 14547), Seppola-Kaipola (Yt 16563) ja Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573)

pvm: 10.9.2017 Tekijä: Ilari Harju

Rautavaara (Kt87), Tavoitekantavuus 290 MPa, Mitattu EY mediaani 572 MPa (2008)

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	20	0	80	120	20,0	
2	20,0	0,55	100	120	63,2	
3	63,2	0,5	120	379	101,9	
4	101,9	0,4	155	612	136,8	Alusrakenne
5	136,8	0,1	500	821	176,8	Alusrakenne
6	176,8	0,25	2020	1061	547,8	Stabiloitu KaM
7	547,8	0,04	1500	3287	571,8	PAB

Yhteensä = 1,84 m

Rautavaara (Kt87), Tavoitekantavuus 290 MPa, Paalulukema 9800 Mitattu EY 647 MPa (2008)

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	50	0	50	300	50,0	
2	50,0	0,55	115	300	93,9	
3	93,9	0,5	105	563	102,4	
4	102,4	0,4	175	614	148,6	
5	148,6	0,1	650	891	199,1	Alusrakenne
6	199,1	0,25	2340	1194	623,6	Stabiloitu KaM
7	623,6	0,04	1500	3741	647,2	PAB

Yhteensä = 1,84 m

**Rautavaara (Kt87), Tavoitekantavuus 290 MPa, Paalulukema 9600
Mitattu EY 496 MPa (2008)**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	50	0	50	300	50,0	
2	50,0	0,55	97	300	83,0	
3	83,0	0,5	115	498	106,4	
4	106,4	0,4	140	639	129,3	
5	129,3	0,1	560	776	172,9	
6	172,9	0,25	1440	1037	472,5	Stabiloitu KaM
7	472,5	0,04	1500	2835	496,5	PAB
Yhteensä =		1,84	m			

**Rautavaara (Kt87), Tavoitekantavuus 290 MPa, Paalulukema 9650
Mitattu EY 456 MPa (2008)**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	60	0	50	360	60,0	
2	60,0	0,55	70	360	67,8	
3	67,8	0,5	100	407	91,0	
4	91,0	0,4	120	546	110,7	
5	110,7	0,1	470	664	147,5	
6	147,5	0,25	1470	885	433,0	Stabiloitu KaM
7	433,0	0,04	1500	2598	456,8	PAB
Yhteensä =		1,84	m			

**Teuroinen (Yt 14547), Tavoitekantavuus 240 MPa, Mitattu EY mediaani 406 MPa
(2007)**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	50	0,1	63	300	52,5	
2	52,5	0,1	100	315	59,9	
3	59,9	0,1	150	359	71,9	
4	71,9	0,1	200	432	88,2	
5	88,2	0,1	400	529	119,0	
6	119,0	0,25	1480	714	381,1	Stabiloitu KaM
7	381,1	0,04	1650	2287	406,4	PAB-V
Yhteensä =		0,79	m			

Teuroinen (Yt 14547), Tavoitekantavuus 240 MPa, Mitattu EY 177 MPa (2007)
Paalulukema 800

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	50	0,1	50	300	50,0	
2	50,0	0,1	50	300	50,0	
3	50,0	0,1	50	300	50,0	
4	50,0	0,1	50	300	50,0	
5	50,0	0,1	80	300	55,1	
6	55,1	0,25	510	331	157,1	Stabiloitu KaM
7	157,1	0,04	1650	942	176,9	PAB-V
Yhteensä =		0,79	m			

Teuroinen (Yt 14547), Tavoitekantavuus 240 MPa, Mitattu EY 487 MPa (2007)
Paalulukema 1800

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	80	0,1	80	480	80,0	
2	80,0	0,1	80	480	80,0	
3	80,0	0,1	100	480	83,9	
4	83,9	0,1	200	503	99,8	
5	99,8	0,1	200	599	114,9	
6	114,9	0,25	2600	690	461,4	Stabiloitu KaM
7	461,4	0,04	1650	2768	487,4	PAB-V
Yhteensä =		0,79	m			

Teuroinen (Yt 14547), Tavoitekantavuus 240 MPa, Mitattu EY 283 MPa (2007)
Paalulukema 3800

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	60	0,1	60	360	60,0	
2	60,0	0,1	60	360	60,0	
3	60,0	0,1	60	360	60,0	
4	60,0	0,1	150	360	72,1	
5	72,1	0,1	250	432	92,2	
6	92,2	0,25	830	553	260,1	Stabiloitu KaM
7	260,1	0,04	1650	1560	283,2	PAB-V
Yhteensä =		0,79	m			

Teuroinen (Yt 14547), Tavoitekantavuus 240 MPa, Mitattu EY 735 MPa (2007)
Paalulukema 6200

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	75	0,1	75	450	75,0	
2	75,0	0,1	150	450	86,3	
3	86,3	0,1	330	518	112,6	
4	112,6	0,1	350	676	141,1	
5	141,1	0,1	800	846	199,3	
6	199,3	0,25	3100	1196	695,2	Stabiloitu KaM
7	695,2	0,04	2500	4171	734,7	AB
Yhteensä =		0,79	m			

Teuroinen (Yt 14547), Tavoitekantavuus 240 MPa, Mitattu EY 685 MPa (2007)
Paalulukema 6800

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	73	0,1	73	438	73,0	
2	73,0	0,1	110	438	79,5	
3	79,5	0,1	300	477	103,4	
4	103,4	0,1	300	621	127,9	
5	127,9	0,1	680	767	178,2	
6	178,2	0,25	3070	1069	646,2	Stabiloitu KaM
7	646,2	0,04	2500	3877	685,3	AB
Yhteensä =		0,79	m			

Seppola-Kaipola (Yt 16563), Tavoitekantavuus 490 MPa, Mitattu EY mediaani 680 MPa (2012)

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	116	0,1	120	696	116,9	
2	116,9	0,1	125	701	118,6	
3	118,6	0,1	280	711	140,9	
4	140,9	0,1	330	845	167,1	
5	167,1	0,1	750	1003	225,1	
6	225,1	0,25	1920	1351	621,1	Stabiloitu KaM
7	621,1	0,05	2500	3727	680,3	AB
Yhteensä =		0,8	m			

Seppola-Kaipola (Yt 16563), Tavoitekantavuus 490 MPa, Mitattu EY 689 MPa (2012)
Paalulukema 900

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	116	0,1	120	696	116,9	
2	116,9	0,1	125	701	118,6	
3	118,6	0,1	280	711	140,9	
4	140,9	0,1	330	845	167,1	
5	167,1	0,1	750	1003	225,1	
6	225,1	0,25	2000	1351	631,4	Stabiloitu KaM
7	631,4	0,05	2500	3788	690,7	AB
Yhteensä =		0,8	m			

**Seppola-Kaipola (Yt 16563), Tavoitekantavuus 490 MPa, Mitattu EY 715 MPa (2012)
Paalulukema 3326**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	116	0,1	120	696	116,9	
2	116,9	0,1	125	701	118,6	
3	118,6	0,1	280	711	140,9	
4	140,9	0,1	320	845	166,2	
5	166,2	0,1	700	997	221,0	
6	221,0	0,25	2260	1326	655,4	Stabiloitu KaM
7	655,4	0,05	2500	3933	715,1	AB
Yhteensä =		0,8	m			

Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573), Tavoitekantavuus 390 MPa, Mitattu EY mediaani 541 MPa (2012)

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	113	0	120	678	113,0	
2	113,0	0,1	100	678	110,0	
3	110,0	0,1	200	660	124,2	
4	124,2	0,15	200	745	146,6	
5	146,6	0,15	330	880	192,7	
6	192,7	0,25	1440	1156	504,0	Stabiloitu KaM
7	504,0	0,04	2500	3024	541,4	AB
Yhteensä =		0,79	m			

**Hiidenmäki-Vaheri (Yt 16573), Tavoitekantavuus 390 MPa, Mitattu EY 576 MPa (2012)
Paalulukema 4000**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys
1	113	0	120	678	113,0	
2	113,0	0,1	120	678	114,5	
3	114,5	0,1	240	687	132,9	
4	132,9	0,15	230	798	160,6	
5	160,6	0,15	350	964	209,0	
6	209,0	0,25	1500	1254	537,7	Stabiloitu KaM
7	537,7	0,04	2500	3226	575,5	AB
Yhteensä =		0,79	m			

Liite 5: Rakennenäytteenottotutkimuksissa kirjatut havainnot

Pvm	Tie	Aosa	Aet	Suunta	Keski/ Reuna	Näyte	Päällysteen paksuus (mm)	Näytteen paksuus (mm)	Huomioita
22.5. 2017	87	14	9601	2	Reuna	A	34	235	Päällyste irtosi poratessa. Kappale ehjä ja luja
22.5. 2017	87	14	9601	2	Reuna	B	34	250	Päällyste irtosi poratessa. Kappale ehjä ja luja
22.5. 2017	87	14	9601	2	Keski	A	30	255	Päällyste irtosi poratessa. Kappale ehjä ja luja
22.5. 2017	87	14	9650	2	Reuna	A	35	215	Päällyste irtosi poratessa. Stabiloidun kerroksen alaosa harvaa ja rikkonaista. Yläosa ehjä ja luja.
22.5. 2017	87	14	9650	2	Keski	A	35	-	Päällyste irtosi ja kappale hajosi poratessa. Stabiloidun kerroksen yläosa harva ja rikkonainen.
22.5. 2017	87	14	9650	2	Keski	B	34	245	Päällyste irtosi poratessa. Kappale katkesi kolmeen osaan isojen murskerakeiden saumakohtista. Stabiloidun kerroksen yläosa harva ja rikkonainen.
22.5. 2017	87	14	9801	2	Reuna	A	38	-	Päällyste irtosi poratessa. Stabiloitu kerros rikkonaista. Ei ehjää näytettä
22.5. 2017	87	14	9801	2	Reuna	B	38	-	Päällyste irtosi poratessa. Stabiloitu kerros rikkonaista. Ei ehjää näytettä
22.5. 2017	87	14	9801	2	Keski	A	38	300	Päällyste irtosi poratessa. Kappale ehjä ja luja.
22.5. 2017	87	14	9903	2	Reuna	A	35	-	Tutkimuspisteen kaikissa porauksissa stabiloitu kerros irtonaista, eikä ehjää näytettä saatu lukuunottamatta pisteen KB 80 mm:n pituista
22.5. 2017	87	14	9903	2	Reuna	B	35	-	
22.5. 2017	87	14	9903	2	Keski	A	34	-	

22.5. 2017	87	14	9903	2	Keski	B	34	-	kappaletta.
16.5. 2017	16563	1	900	1	Reuna	A	55	-	Stabiloitu kerros rikkonaista, ei ehjää näytettä.
16.5. 2017	16563	1	900	1	Reuna	B	55	-	Stabiloitu kerros rikkonaista, ei ehjää näytettä.
16.5. 2017	16563	1	900	1	Keski	A	55	280	Kappale ehjä ja luja. Päälyste irtosi poratessa.
16.5. 2017	16563	1	3326	2	Reuna	A	58	270	Kappale ehjä ja luja. Päälyste irtosi poratessa.
16.5. 2017	16563	1	3326	2	Reuna	B	57	220	Kappale ehjä ja luja. Päälyste irtosi poratessa. Kappale jumiutui rasiaporanterän sisään, eikä kappaletta saatu irroitettua.
16.5. 2017	16563	1	3326	2	Keski	A	58	275	Päälyste kiinni stabiloidussa kerroksessa. Kappale ehjä ja luja.
16.5. 2017	16563	1	3326	2	Keski	B	58	280	Päälyste kiinni stabiloidussa kerroksessa. Kappale ehjä ja luja.
16.5. 2017	16573	2	4000	1	Reuna	A	35	160	Päälyste irtosi poratessa. Stabiloidun kerroksen yläosa rikkonaista. Ehjä näyte noin 80 mm:n syvyydeltä.
16.5. 2017	16573	2	4000	1	Reuna	B	38	180	Päälyste irtosi poratessa. Stabiloidun kerroksen yläosa rikkonaista. Ehjä näyte noin 80 mm:n syvyydeltä.
16.5. 2017	16573	2	4000	1	Keski	A	35	150	Päälyste irtosi poratessa. Stabiloitu kerros tiiviimpi, kuin saman tutkimuspisteen reunaosissa.
16.5. 2017	16573	2	2080	1	Reuna	A	38	-	Päälyste irtosi poratessa. Stabiloitu kerros rikkonaista. Ei ehjää näytettä
16.5. 2017	16573	2	2080	1	Keski	A	40	-	Päälyste irtosi poratessa. Stabiloidun kerroksen yläosta ehjää 180 mm:n syvyyteen saakka.
18.5. 2017	14800	1	450	1	Reuna	A	35	-	Päälyste irtosi poratessa. Porantera vaurioitui porauksen yhteydessä. Ei ehjää näytettä.

18.5. 2017	14800	1	450	1	Keski	A	35	255	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloidun kerroksen yläosa rikkonaisempaa kuin alaosaa.
18.5. 2017	14800	1	450	1	Reuna	B	35	170	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloidun kerroksen näytekkappale katkesi 170 mm:n syvyydessä. 180 mm:n syvyydessä stabiloidussa kerroksessa havaittavissa asfalttirouhetta.
18.5. 2017	14800	1	650	1	Reuna	A	35	305	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloidun kerroksen näytekkappale ehjä ja luja.
18.5. 2017	14800	1	650	1	Keski	A	38	170	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Näytekkappale katkesi porareikään 170 mm:n syvyydessä. Stabiloitu kerros ehjän ja tiiviin tuntuista poratessa aina 300 mm:n syvyyteen saakka.
18.5. 2017	14800	1	950	1	Reuna	A	34	-	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloitu kerros rikkonaista.
18.5. 2017	14800	1	950	1	Keski	A	30	-	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloitu kerros rikkonaista.
18.5. 2017	14800	1	950	1	Reuna	B	32	-	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloitu kerros rikkonaista.

Pvm	Tie	Aosa	Aet	Suunta	Keski/ Reuna	Näyte	Päällysteen paksuus (mm)	Näytteen paksuus (mm)	Huomioita
17.5. 2017	14547	1	750	1	Reuna	A	35	215	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloidun kerroksen yläosa rikkonaisempaa, kuin alaosa.
17.5. 2017	14547	1	750	1	Reuna	B	40	110	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Kappale katkesi poratessa. Stabiloidun kerroksen ylä- ja alaosa rikkonaista. Ehjä näyte stabiloidun kerroksen keskiosasta.
17.5. 2017	14547	1	750	1	Keski	A	40	-	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloitu kerros rikkonaista. Ei ehjää näytettä.
17.5. 2017	14547	1	1775	1	Reuna	A	38	225	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Kappale katkesi kahteen osaan poratessa. Muutoin stabiloitu kerros ehjä ja luja.
17.5. 2017	14547	1	1775	1	Reuna	B	38	250	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Näytekappale ehjä ja luja.
17.5. 2017	14547	1	1775	1	Keski	A	38	270	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Poranäytekappale halkesi pitkittäissuunnassa. Porareijästä havaittavissa stabiloidun kerroksen seinämissä oleva tien poikkisuuntainen halkeama, joka ei ole heijastunut päällysteen läpi.
17.5. 2017	14547	1	3750	1	Reuna	A	43	-	Poranäytekappale jumiutui rasiaterän sisään ja vaurioitui irroitusyön yhteydessä.
17.5. 2017	14547	1	3750	1	Reuna	B	42	220	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Stabiloidun kerroksen yläosa rikkonaisempaa, kuin alaosa.
17.5. 2017	14547	1	3750	1	Keski	A	37	210	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Näytekappale ehjä ja lujanoloinen.

17.5. 2017	14547	1	6250	1	Reuna	A	38	250	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Näytekappale ehjä ja luja.
17.5. 2017	14547	1	6250	1	Keski	A	45	255	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Näytekappale halkesi pituussuunnassa.
17.5. 2017	14547	1	6250	1	Keski	B	45	255	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Näytekappale ehjä ja luja.
17.5. 2017	14547	1	6750	1	Reuna	A	30	240	Päällyste irtosi porauksen yhteydessä. Näytekappale ehjä ja luja.
17.5. 2017	14547	1	7350	1	Keski	A	37	250	Osuudella päällysteen alla tasausmurskekerros. Näytekappale ehjä ja luja.

Liite 6: Rakennenäytteiden yksiaksiaaliset puristuslujuudet ja E₅₀-sekanttimoduulit.

Tie	Aosa	Aet	Keski/ Reuna	Näyte	Puristus- lujuus (MPa)	E50- sekantti- moduuli (MPa)	Huomioita
87	14	9801	Keski	A	2,65	351	
		9601	Reuna	B	2,93	100	Kappaleen yläosa
		9601	Reuna	B	3,58	142	Kappaleen alaosa
		9601	Keski	A	4,62	525	Kappaleen yläosa
		9601	Keski	A	4,19	132	Kappaleen alaosa
		9601	Reuna	A	3,73	122	
		9650	Keski	B	4,88	379	
		9650	Reuna	A	4,07	279	
				KA	3,83	254	
				MED	3,90	211	
14800	1	150	Keski	A	3,89	421	
		650	Keski	A	3,29	467	
		650	Reuna	A	3,31	361	
		450	Reuna	B	3,84	475	
				KA	3,58	431	
				MED	3,58	444	
16563	1	900	Keski	A	3,49	370	
		900	Reuna	B	2,72	358	
		3326	Keski	A	5,04	419	Kappaleen yläosa
		3326	Keski	A	2,75	325	Kappaleen alaosa
		3326	Reuna	A	3,04	487	
		3326	Keski	B	2,81	307	
				KA	3,31	378	
				MED	2,93	364	
16573	2	3999	Keski	A	2,15	341	
	2	3999	Reuna	A	3,56	367	
	2	3999	Reuna	B	3,83	354	
				KA	3,18	354	
				MED	3,56	354	
14547	1	750	Reuna	A	4,9	405	
	1	1775	Reuna	A	4,69	492	
	1	1775	Reuna	B	8,22	717	
	1	3750	Keski	A	5,17	507	
	1	3750	Reuna	B	8,25	682	

1	6250	Keski	B	7,29	619	Kappaleen alaosa
1	6250	Keski	B	9,22	542	Kappaleen yläosa
1	6250	Reuna	A	6,25	769	
1	6250	Keski	A	9,32	540	
1	6750	Reuna	A	9,33	508	
1	6750	Keski	A	9,51	966	
				KA	7,47	613
				MED	8,22	542

Liite 7. Elinkaarimallien nykyarvolaskelmat

Vuosi	Pelkkä päällystys		Stabiloitu kantava kerros+päällystys			Diskonttaus-tekijä (Ck)
	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	
0						1,000
1						0,962
2						0,925
3						0,889
4						0,855
5						0,822
6						0,790
7						0,760
8						0,731
9						0,703
10	52 518 €	52 518 €				0,676
11						0,650
12						0,625
13						0,601
14						0,577
15			43 166 €	43 166 €	60 280 €	0,555
16						0,534
17						0,513
18						0,494
19						0,475
20	35 480 €	35 480 €				0,456
21						0,439
22						0,422
23						0,406
24						0,390
25						0,375
26						0,361
27						0,347
28						0,333
29						0,321
30	23 969 €	33 471 €	23 969 €	33 471 €	33 471 €	0,308
31						0,296
32						0,285
33						0,274
34						0,264
35						0,253
36						0,244
37						0,234
38						0,225
39						0,217
40	16 192 €	16 192 €				0,208

Nykyarvo
yht.

128 159 € 137 661 € 67 135 € 76 637 € 93 751 €

Vuosikustannuskerroin Cn 0,0505

Vuosikust
annus

6 475 € 6 955 € 3 392 € 3 872 € 4 737 €

Liite 8. Yhteenveto koerakennuskohteiden toimivuudesta

		1. Inkoo (11146 1/0 - 1/5400)	2. Rautavaara (87 14/9500 - 14/10500)	3. Teuroinen (14547 1/0 - 1/8165)	4. Hanhikemppi (14800 1/150 - 1/1100)	5. Seppola- Kaipola (16563 1/300 - 1/4450)	6. Hiidenmäki- Vaheri (16573 2/0 - 3/108)
Lähtötilanne	Vauriot	Päällystevauriot, kantavuuspuutteet, reunapainumat	Kantavuuspuutteet, painumat, pituushalkeamat, urautuminen, verkkohalkeilu	Painumat, urautuminen, päällystevauriot, kantavuuspuutteet	Kantavuuspuutteet, päällystevauriot	Kantavuuspuutteet, routuminen, urautuminen	Kantavuuspuutteet, routuminen, urautuminen
	Pohjamaa	Savi/Siltti	Moreeni	Savi	Moreeni, siltti/savi	Siltti	Siltti
	Stabiloinnin runkoaine	Huonolaatuinen (paljon hienoainesta)	Hyvälaatuinen	Hyvälaatuinen	Epähomogeeninen, huonolaatuinen	Hyvälaatuinen	Hyvälaatuinen
Stabiloitu kantava kerros	Stabiloinnin sideaine	Lentotuhka+Rikinpoiston lopputuote (kipsi) + Yleissementti	Fosfokipsi+Lentotuhka+ Masuunisementti	Lentotuhka + Yleissementti	Lentotuhka + Yleissementti	Lentotuhka + Yleissementti	Lentotuhka + Yleissementti
	Laboratoriossa määritetty tavoitelujuustaso	4,0 - 4,5 MPa	4,1 - 5,2 MPa	4 - 6 MPa	3 - 4 MPa	3,5 MPa	3,3 MPa
	Paksuus	250 mm	250/300 mm	250/300 mm	300 mm	250 mm	250 mm
	Murskekerros päällysteen alla	Kyllä	Osittain	Osittain	Ei	Ei	Ei
Toimivuus	Pituushalkeamat	-	-	-	--	+	+
	Poikkihalkeamat	-	-	+	+	+	+
	Pakkaskatkot	ei mit.	+	--	kutistumishalk.	-	-
	Urautuminen	ei mit.	+	ei mit.	ei mit.	+++	+
	Kantavuus	+++	+++	+++	ei mit.	+++	+++
	Tasaisuus	-	-	++	-	++	++
	Painumat	-	+	+	-	++	+
	Päällysteen tartunta	-	-	--	-	++	Bitumiemulsiokerr
	Kuivatus	-	--	-	-	+	+
	Lujuuskehitys	-	++	+++	++	+	-
E/E₅₀	ei mit.	2020/254	1230/613	ei mit/431	1920/378	1440/354	
Seurantajakson pituus	2000-2013	2004-2008, 2017	2006-2007, 2017	2007, 2017	2010-2013, 2017	2010-2013, 2017	
Korjaustoimenpiteet	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	
Huomiot:			Lyhyt seuranta-aika. E- moduuli määritetty 1 vuoden ikäiseltä materiaalilta	Lyhyt seuranta-aika		Yhdistelmä rakenne: jakavan kerroksen massiivituikka + stabiloitu kantava kerros	

+++

Erinomainen

Pituus- ja poikkihalkeamat: Vauriokartoituksen yhteydessä tehdyt havainnot

Lujuuskehitys: Rakennäynteistä määritetty yksiaks. puristuslujuus

++

Hyvä

Urautuminen: PTM-mittaukset

E-moduuli: Takaisinlaskenta Odemarkin mitoitusyhtälöllä

+

Tyydyttävä

Kantavuus: Pudotuspainolaitemittaukset

-

Huono

Tasaisuus/Painumat: Silmäääräiset havainnot / PTM (IRI)

--

Erittäin huono

Päällysteen tartunta: Rakennetutkimukset ja silmäääräiset havainnot

ei mit.

ei mitattu tutkimuksen yhteydessä 2017