



# GEOSOLUTIONS

Päällystämättömän tien kunnostaminen stabiloidulla sivukivi- ja teräskuonamurskeella

Käytännönlähtöinen tiivistelmä GeoSolutions-projektissa kehitettyjen materiaalikomposiittien käytöstä päällystämättömien teiden kunnostuksessa.

Minna Sarkkinen, Seppo Gehör ja Kauko Kujala



KAMK - University  
of Applied Sciences



KAINUUN VOIMA OY



Juan  
Dolomiittikalkki Oy



Elinkeino-, liikenne- ja  
ympäristökeskus

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto



# GEOSOLUTIONS

Päällystämättömän tien kunnostaminen stabiloidulla sivukivi- ja teräskuonamurskeella

## Projektin toteutus

GeoSolutions-projektin päärahoittaja oli EAKR ja osarahoittajia Tapojärvi Oy, Juuan Dolomiittikalkki Oy, Kainuun Voima Oy, Solid Liner Oy ja Kajaanin Romu Oy. Projekti toteutettiin vuoden 2017-2019 aikana. Toteutuksesta vastasi Kajaanin ammattikorkeakoulun kone- ja kaivostekniikan yksikkö. Projektin ohjausryhmässä olivat mukana rahoittajien lisäksi ELY, Pyhäsalmi Mine Oy ja Infrasuunnittelu Oy. Suuret kiitokset kaikille osallistuneille!

ISBN 978-952-7219-48-5  
B 96  
B. Raportteja ja selvityksiä  
ISSN 1458-915X

Kajaani  
Kajaanin  
ammattikorkeakoulu  
2019

[www.geosolutions.fi](http://www.geosolutions.fi)

## Tiivistelmä

GeoSolutions-hankkeessa tutkittiin teollisuuden sivutuotteina syntyvien materiaalien kuten terästeollisuuden kuonien, rikastushiekkojen ja biopolton lentotuhkien, hyödyntämistä infrarakenteiden rakennusaineina perinteisen sementin ja kiviaineksen vaihtoehtona. Hankkeessa toteutettiin kolme koerakennetta, joista yksi oli vanha teollisuuskäytössä olevan tierakenteen kunnostus. Koerakenteen tavoitteena oli tien kantavuuden ja roudankestävyyden parantaminen.

Kehitystyön tavoitteena oli edistää päällystämättömien teiden kunnostusmenetelmien kestävää kehittämistä, korvata sementin käyttöä sivutuotepohjaisilla sideaineilla ja kalliomurskeen käyttöä sivukivellä ja teräskuonamurskeella sekä saavuttaa sivuvirtoja hyödyntämällä kiinteä, kuormitus- ja deformaatiokestävyydeltään parantunut tierakenne. Lisäksi tavoitteena oli kehittää menetelmä, joka soveltuu myös myöhään syksyllä tehtäväksi ja joka ei aiheuta liikennekatkoja kunnostetulla tiellä.

Hankkeen tuloksena kehitettiin useita uusia sivutuotepohjaisia sideainekomposiitteja, joilla voidaan korvata tavallista portlandsementtiä. Vaihtoehtoisten sideaineratkaisujen tehokkuutta, kustannuksia ja ympäristövaikutuksia analysoitiin koetutkimuskohteeseen tehdyn monimuuttuja-analyysin perusteella. Analyysien perusteella useilla eri teräskuonaa, biopolton lentotuhkaa, masuunikuonaa ja rikastushiekkoina sisältävillä sideaineyhdistelmillä voidaan saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä ja pienentää ympäristövaikutuksia ja silti saavuttaa halutut tekniset toimivuus- ja kestävyystavoitteet.

## Sisälllys

Projektin toteutus.....	2
Tiivistelmä .....	2
Johdanto.....	0
Tutkimus- ja koerakennekohde .....	0
Kokonaiskantavuus .....	4
Routakestävyys.....	5
Puristuslujuuskokeet .....	6
Jäädytys-sulatuskokeet .....	7
Kulutuserroksen kulutuksenkestävyys .....	7
Koerakenteen toteutus .....	9
Työvaiheet.....	10
Koerakenteen toteutus .....	11
Stabilointisideainevaihtoehtojen vertailu.....	14
SIDEAINEIDEN TEKNINEN TOIMIVUUS JA SAATAVUUS .....	14
Ympäristövaikutukset .....	15
Kustannusten vertailu.....	16
KRITEREIDEN YHDISTÄMINEN .....	16
Yhteenveto .....	19

## Johdanto

Puutteellinen kantavuus ja routavaurioista aiheutuvat ongelmat ovat yleisiä alempiasteisilla teillä. Päällystämättömiä teitä on maailmanlaajuisesti 80 % ja sorapäällysteisiä teitä on Suomen maanteistä noin 35 %, jotka yleisesti ovat rakennettu ilman routimattomia rakennekerroksia ja ylläpidetty vain lisäämällä mursketta kulutuskerrokseen<sup>1</sup>. Routavaurioista johtuva teiden kunnostustarve on kasvava ongelma myös ilmastonmuutoksen aiheuttaman lisääntyneen säärasituksen seurauksena. Lisäksi orgaanista ainesta sisältävien tierakenteiden vahvistaminen on ongelma, johon ei ole toistaiseksi löydetty hyvää kustannustehokasta ratkaisua.

Sementtistabiloinnissa sekoitetaan keskenään sementti, vesi ja kiviaines, jotka muodostavat lujittuvan sideainerakenteen. Tyypillisesti sementtimäärä vaihtelee välillä 3-7 %. Tierakenteen kantavan kerroksen sementtistabiloinnissa käytetään yleisesti portland-sementtiä, jonka valmistaminen aiheuttaa merkittäviä ympäristövaikutuksia (n. 5-8 % globaaleista CO<sub>2</sub>-päästöistä). Sideaineet muodostavat stabiloinnissa usein myös suurimman kustannuserän. Rakentamisessa käytetään lisäksi suuria määriä maa-aineksia (n. 100 Mtn/v<sup>2</sup>), vaikka erityisesti asutuskeskusten läheisyydessä soravarat ovat jo loppumassa ja maa-ainesten ottamisella on merkittäviä ympäristövaikutuksia.

## Tutkimus- ja koerakennekohde

Stabilointimenetelmä valitaan kohdekohtaisesti olosuhteiden ja kunnostustarpeiden perusteella. Materiaalien valinnassa on teknisen toimivuuden lisäksi huomioitava niiden saatavuus, kustannukset sekä ympäristövaikutukset. GeoSolutions-hankkeessa tehdyn koetutkimuksen ja stabilointimateriaalikehityksen lähtökohtana käytettiin Kainuussa sijaitsevaa koekohdetta, jonne tehtiin lisäksi koerakenne yhdellä kantavaan kerrokseen ja kulutuskerrokseen kehitetyllä materiaaliratkaisulla. Tutkimus- ja koerakennekohteen sijainti on merkitty alla olevaan karttaan. Kuvassa 2 on kahdesta tiepätkästä koostuvan koerakenteen lähtötilanne. Koerakennekohde oli yksityinen teollisuuskäytössä oleva tie, jolla on raskasta liikennettä. tien välittömässä läheisyydessä ei ollut asutusta tai vesistöjä.

---

<sup>1</sup> Liikennevirasto (2014). Sorateiden kunnossapito, Liikenneviraston ohjeita 1/2014, Liikennevirasto, Helsinki, 61

<sup>2</sup> Valtiovarainministeriö: Maa-ainesveroselvitys 2012, Ruotsin, Tanskan ja iso-Britannian kokemuksia.64 s.





KUVA 1. KOEKOHTEIDEN SIJAINTI (YMPYRÖITY) KARTALLA.



KUVA 2. KOERAKENNEKOHTEEN LÄHTÖTILANNE SYKSYLLÄ.

Koerakennekohde edusti tyypillistä tietä, jossa oli puutteellinen kantavuus ja routavaurioista aiheutuvia ongelmia. Vanhasta tiepohjasta otettiin näytteitä kerrospaksuudelta 0-700 mm. Pintakerroksessa 0-200 mm oli käytetty mursketta. Kerrokset 200-700 mm olivat hienojakoista savi- ja hiekkapitoista ainesta, jossa orgaanisen aineksen osuus oli yli 20 %.

## Kantavuusominaisuuden määrittäminen

Kantavuuteen eli rakenneosan pinnan jäykkyyteen vaikuttavat useat tekijät kuten materiaalin vesipitoisuus, rakeisuus ja materiaalin homogeenisyys. Kuormituskestävyyksien määrittäminen perustuu liikennekuormituksen kestävyden määrittämiseen ja se tehdään kohdekohtaisesti materiaalien ja alusrakenteen mukaan. Yleisesti käytetään määrittämisessä kokemusperäisiin tavoitekantavuuksiin perustuvaa Odemarkin menetelmää vuodelta 1949<sup>3</sup>.

Vanhan tierakenteen kerrosten ja kerrosstabilointimateriaalien kantavuus määritettiin menetelmällä California Bearing Ratio (CBR), joka mittaa suhteellista kantavuutta käyttäen vertailuarvona standardimateriaalia. CBR-määrittämissä tehtiin vanhan tierakenteen kantavasta kerroksesta syvyydeltä 200-500 mm ja pintakerroksesta 0-200 mm. Lisäksi määritettiin kerrosstabiloinnissa käytetyn sivukivimurskeen ja teräskuonamurskeen CBR sekä sideaineella vahvistetun sivukivimurskeen ja sivukivi-teräskuonamurskeen CBR-suhde.

Materiaalin jäykkyyden moduulin (MPa) arvona voidaan käyttää CBR-indeksin pohjalta määritettyä arvoa

$$M_r \text{ (MPa)} = 10 \times \text{CBR} \quad (1)$$

jossa:

$M_r$  on materiaalin jäykkyyden moduuli (MPa)  
CBR materiaalin CBR-arvo (%)

Jolloin kerrosten E-moduulit ovat:

**TAULUKKO 1. RAKENNEKERROSTEN E-MODUULIT.**

	E-moduuli (MPa)
Sivukivimurske 0-16 mm	1510
Teräskuonamurske 0-8 mm	1211

<sup>3</sup> InfraRYL (2010). Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Osa 1: Väylät ja alueet, Rakennustieto Oy, 555 s.

	E-moduuli (MPa)
Uusi kantava kerros	3200
Vanha tiepohja 200-500 mm	134
Vanha tien pintakerros 0-200 mm	2236

CBR-mittauksella ei voitu mitata kuiduttoman kerrosstabiloidun kerroksen CBR-arvoa. Kerrosstabiloidulle materiaalille on esitetty E-moduuliarvo 3500 MPa esimerkiksi Tuhkarakentamisen käsikirjassa<sup>4</sup>. Kulutuskerroksen E-moduuliarvona käytettiin kokonaiskantavuuden laskennassa dolomiitti- ja kuonamurskeen E-moduulin keskiarvoa.

Odemarkin teorian mukaan<sup>5</sup>, yhdistetyn rakennekerroksen jäykkäysmoduuli määräytyy alkuperäisten kerroksien jäykkäysmoduulien perusteella suhteessa niiden kerrospaksuuksiin. Korvaavan materiaalin kerrospaksuus voidaan määrittää tällöin kaavalla

$$h_2 = n \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{E_1/E_2} \quad (2)$$

jossa:

- $h_2$  on korvaavan materiaalin kerrospaksuus (mm)
- $h_1$  alkuperäinen kerrospaksuus (mm)
- $E_2$  korvaavan materiaalin jäykkäysmoduuli (MPa)
- $E_1$  alkuperäisen materiaalin jäykkäysmoduuli (MPa)
- $n$  korjauskerroin ( $n=1$ )

Odemarkin kuormituskestävyyssuorituksen mukaan eri kerrosten vaikutus rakenteen kokonaisjäykkyyteen eli tavoitekantavuuteen voidaan määrittää kerrosten summana alhaalta ylöspäin.

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

<sup>4</sup> Tuhkarakentamisen käsikirja (2012). Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa, Ramboll, verkkojulkaisu, 88 s.

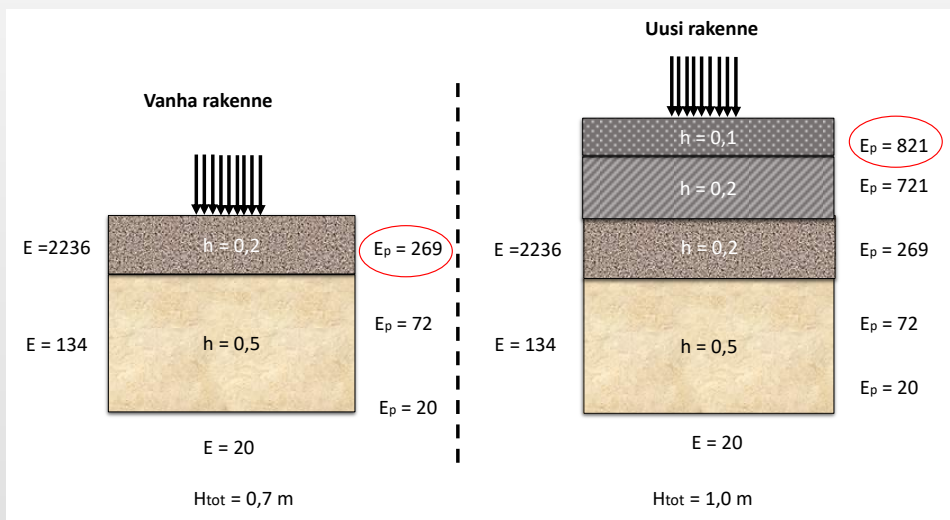
<sup>5</sup> Hartikainen, O-P. 1989. Tien päällysterakenteen suunnittelu. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tie- ja liikennetekniikka. ISBN 951-721-305-0

jossa:

- EA           mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)
- Ep           mitoitettavan kerroksen päilyä saavutettava kantavuus (MPa)
- E           mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuli (MPa)
- h           mitoitettavan kerroksen paksuus (m)
- a           kuormituslevyn säde (0,15 m)

Alla on teoreettisesti arvioitu uuden stabilointikerroksen vaikutusta kantavuuteen.

### KOKONAISKANTAVUUS



**KUVA 3. VANHAN JA UUDEN RAKENTEEN KOKONAISKANTAVUUDEN VERTAILU ODEMARKIN KANTAVUUSMITOITUSTA SOVELTAMALLA.**

Laskelmien perusteella kantavuus nousee arvosta  $E_p = 269$  arvoon  $E_p = 821$  kerrostabilointia ja uutta kulutuskerrosta käyttämällä. Uuden rakenteen kantavuuslaskelmissa käytettiin CBR-mittausten perusteella arvioituja E-moduuliarvoja. Kuvassa esitetty uuden rakenteen kantavuus on laskettu käyttämällä kuituvahvistettua kerrostabilointia. Ilman kuituvahvistusta  $E_p = 842$ . Odemarkin kaava perustuu vain materiaalin jäykkyyden kestävyysindikaattorina, joten kuituvahvistetun stabiloinnin ei tuloksen perusteella tarkoita suoraan heikompaa kestävyttä. Toteutunut kantavuus mitataan levykuormituskokeella koerakenteen ja vanhan tierakenteen kohdalta koerakenteen teon jälkeen.



## ROUTAKESTÄVYYS

Routakestävyydellä tarkoitetaan tierakenteen kestävyttä routimisen aiheuttaman rasituksen suhteen. Routakestävyyyteen vaikuttavat tierakenteen lisäksi kuivatus, tieympäristön maastomuodot, pohjamaan laji ja vuodenaika. Routavaurioita lisäävät liian ohuet kerrospaksuudet, tienepätasaisuus, riittämätön sivukaltevuus ja kosteutta sitovat kerrosmateriaalit. Ongelma on yleensä sorateilla pahin keväällä pohjamaan ja tierakenteen alaosan ollessa vielä jäässä, jolloin yläosan sulamisvedet eivät pääse poistumaan tierakenteen läpi. Myös sivuoissa korkealla oleva vesi tunkeutuu tierakenteeseen heikentäen sen kantavuutta<sup>6</sup>. Koerakennekohteessa oli routakestävyiden kannalta edellä kuvattuja tyypillisiä ongelmia. Routakestävyttä voidaan arvioida laskennallisen routanousun avulla<sup>7</sup>. Sallitun laskennallisen routanousun lähtötietoina käytettiin seuraavia arvoja:

**TAULUKKO 1 LÄHTÖTIEDOT ROUTALASKENNALLE.**

Tietyyppi	Seututie
Vaativuusluokka	V4
Alusrakenneluokka	uF
Alusrakenteen perusteella routaturpoama	6 %
Mitoutusroutan syvyys	2000 mm
Sallittu routanousu, $RN_{sall}$	70 mm

Laskennallinen routanousu ( $RN_{lask}$ ) voidaan laskea kaavalla (4), josta saatua arvoa verrataan ohjearvoon suurimmalle sallitulle routanousulle ( $RN_{sall}$ ).

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne.}) \cdot t / 100 \quad (4)$$

jossa:

$RN_{lask}$	on laskennallinen routanousu (mm)
S	mitoitusroutansyvyys (mm)
$R_i$	routimattoman kerroksen paksuus (mm)
$a_i$	materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta
t	alusrakenteen routaturpoama (%)

<sup>6</sup> Rantanen, T., Turunen, J. & Nousiainen, A. (2005). Vähäliikenteisten teiden kuivatus, ominaispiirteet ja kunnostaminen. Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito -tutkimusohjelma, Tiehallinnon selvityksiä 65/2005, Tiehallinto, Helsinki, 38 s.

<sup>7</sup> Tiehallinto. Tierakenteen suunnittelu. Edita Prima Oy. Helsinki 2004

**TAULUKKO 2 VANHAN RAKENTEEN ROUTIVUUS.**

Vanha rakenne	R <sub>i</sub> (mm)	α <sub>i</sub>	
Pohjakerros	500	1,00	
Kulutuseros, vanha	200	0,90	
<i>RN<sub>lask</sub></i>			79,2
<i>RN<sub>sall</sub></i>			70

**TAULUKKO 3 UUDEN RAKENTEEN ROUTIVUUS.**

Uusi rakenne	R <sub>i</sub> (mm)	α <sub>i</sub>	
Kulutuseros, uusi	100	0,90	
Kulutuseros, vanha	200	0,90	
Stabiloitu kerros	200	1,00	
Pohjakerros	500	1,00	
<i>RN<sub>lask</sub></i>			61,8
<i>RN<sub>sall</sub></i>			70

Laskelmien perusteella uuden tierakenteen laskennallinen routanousu alitti sallitun routanousun, mutta vanhan rakenteen ei.

## PURISTUSLUJUUSKOKEET

Puristuslujuuden avulla voidaan kuvata materiaalin lujuutta. Puristuslujuus määritetään kappaleeseen vaikuttavan voiman ja poikkileikkauspinta-alan avulla kaavalla:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (5)$$

jossa

- σ on puristusjännitys
- F voima murtumishetkellä
- A kappaleen poikkileikkauspinta-ala.

Puristuslujuuden määrittämisessä käytetyt koekappaleet (korkeus 100 mm, halkaisija 100 mm) valmistettiin ICT-laitteella. Koekappaleissa käytettiin eri vesimääriä ja jälkihoitotapoja (lämpötila, RH), joka aiheutti vaihtelua tuloksissa. Alla olevassa kuvassa ja taulukossa esitetyt tulokset ovat koemassojen keskiarvoja.

**TAULUKKO 4 KOEMASSOJEN PURISTUSLUJUUKSIA KOLMEN ERI KOESARJAN KESKIARVONA. KOESARJOISSA KÄYTETTIIN ERI VESIMÄÄRIÄ.**

	Vesimäärä, %	Tiheys, kg/m <sup>3</sup>	Puristuslujuus 28 vrk, MPa
KAKE2 (kuitu 0,1 %)	7,0	1994	9,0
KUKE	6,0	1988	4,9

KAKE=kantava kerros, KUKE=kulutuserros

Tyypillisesti muodonmuutostason kasvaessa materiaalin jäykkyys alenee.

**TAULUKKO 5 OHJEELLISET SEKOITUSSUHTEET MASSAKUUTIOILLE.**

	KAKE	KUKE
	Kantava kerros kuidun kanssa 1m <sup>3</sup> (kg)	Kulutuserros 1m <sup>3</sup> (kg)
Sivukivimurske/16	2335	1310
Teräskuonamurske/16	0	1031
MgO reaktiivinen, jauhettu	25	20
Masuunikuonajauhe (Finnsementti)	100	80
Makrokuitu	2,0	0
Silikapulveri (Elkem)	20	0
Lisäaine/Betocrete	0	1,2
Lisätty vesi*	167	145
yht. kg/m <sup>3</sup>	2649	2587

\*sivukivimurskeen vesipitoisuus n. 3,5 % ei sisälly lisätyn veden määrään.

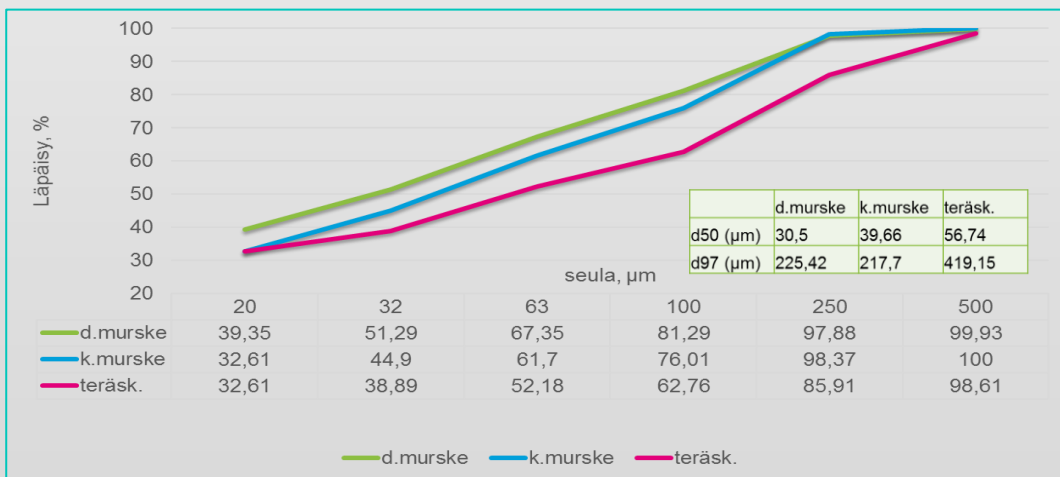
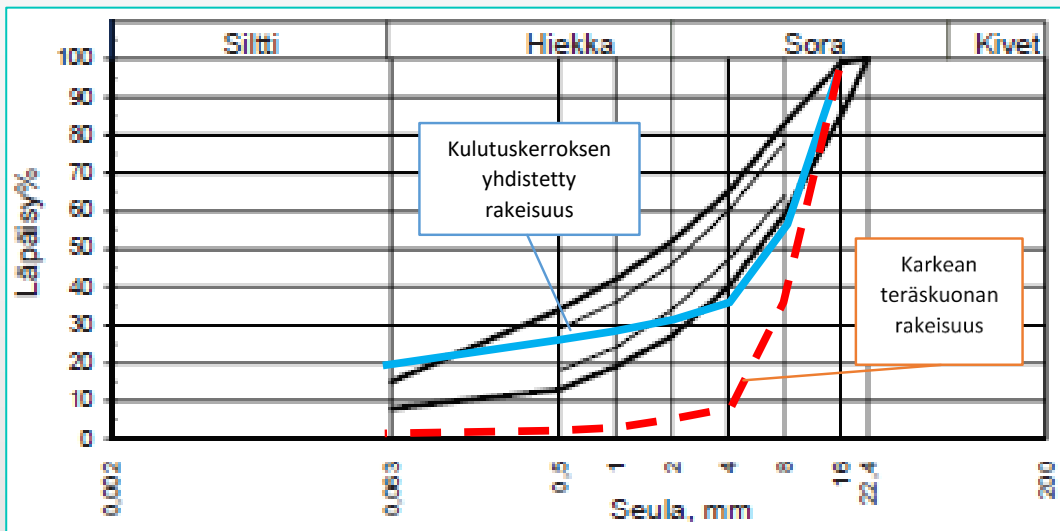
## JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKOKKEET

Kerrosstabilointimassoista tutkittiin pakkasrasituksen kestävyttä soveltamalla standardia FprCEN/TS 13286-54 *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 54: Test method for the determination of frost susceptibility – Resistance to freezing and thawing of hydraulically bound mixtures*. Kokeen perusteella massojen pakkasrasituksen kestävyys oli hyvä.

## KULUTUSERROKSEN KULUTUKSENKESTÄVYYS

Sorateiden kulutuserroksissa käytetään yleensä luonnonkiviainespohjaista (kallio, moreeni, sora) mursketta maksimiraekolla 11 tai 16 mm. Kulutuserroksen

paksuus on yleensä joko 50 mm tai 100 mm tienrakenteesta ja pohjamaasta riippuen<sup>8</sup>. Kulutuskerroksessa karkean teräskuonan käytön tutkiminen kalliomurskeen vaihtoehtona oli perusteltua sekä teknisin, taloudellisin että ekologisin perustein. Hankkeessa tehtyjen kokeiden perusteella teräskuonan kulutuksenkestävyys oli parempi kuin luonnon kiviaineksen tai dolomiittipitoisen kaivoksen sivukiven. Lisäksi sivukivimurskeen, teräskuonan, masuunikuonan ja hienon teräskuonan seoksella voitiin optimoida kulutuskerroksen rakeisuuskäyrää (kuva 4). Teräskuonan, masuunikuonan ja dolomiittimurskeen välinen sideainereaktio myös kiinteytti kulutuskerrosta estäen pölyämistä ja liukenemistä.



**KUVA 4 YLHÄÄLLÄ TERÄSKUONAN JA YHDISTETYN KULUTUSKERROSMATERIAALIN RAKEISUUSKÄYRÄT. ALHAALLA ERI KIVIAINESMATERIAALIEN KULUTUKSENKESTÄVYYDEN VERTAILUKOKEEN TULOS.**

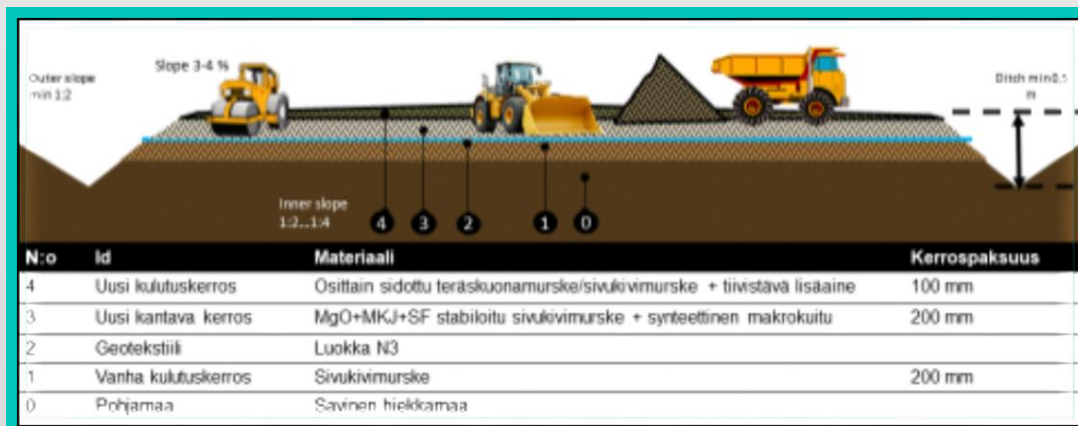
<sup>8</sup> Liikennevirasto (2014). Sorateiden kunnossapito, Liikenneviraston ohjeita 1/2014, Liikennevirasto, Helsinki, 61 s.

Ylhäällä oleva kuva osoittaa, että karkea teräskuona yksinään (punainen katkoviivakäyrä) oli liian karkea ja rakeisuudeltaan homogeeninen verrattuna kulutuskerroksen ohjeelliseen rakeisuusalueeseen (mustat käyrät). Lisäämällä sekaan sivukivimursketta ja hienoa teräskuonaa sekä biotuhkaa päästiin ohjeelliseen rakeisuusalueeseen (sininen käyrä), jolloin saadaan kiinteämpi ja tasaisempi pintarakenne.

Eri kiviainesmateriaalien kulutuskestävyyttä tutkittiin rengasmyllyllä tehdyllä jauhatusrasitustestillä. Alempi kuva osoittaa, että teräskuonan (punainen käyrä) kulutuskestävyys oli jauhatusrasitustestissä parempi kuin luonnon kiviaineksen (sininen käyrä) tai dolomiittimurskeen (vihreä käyrä). Taulukossa oleva d50 ja d97 (µm) arvojen mukaan teräskuonan kulutuskestävyys oli lähes kaksinkertainen sivukivimurskeeseen verrattuna.

## Koerakenteen toteutus

Rakenneratkaistu toteutettiin lisäämällä vanhan tien päälle 200 mm kerros kantavaa sideainesivukivimurskeseosta ja 100 mm kulutuskerros sideaine + teräskuonamurskeseosta. Kelirikkorjauskohteissa kulutuskerroksen tavoiteltu paksuus on tyypillisesti 100 mm<sup>9</sup>. Sideaine reagoi veden ja murskeen kanssa muodostaen kestävästä rakenteesta. Vertailurakenteena käytettiin käsittelemätöntä tieosuutta. Rakenneratkaistu on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 5).



KUVA 5. KOERAKENNEMALLI

Koerakennekohde toteutettiin kahdella tieosuudella, missä kantavan kerroksen materiaaliin lisättiin kuituvahvike. Kuitu sekoitettiin materiaaliin sekoitusvaiheessa.

<sup>9</sup> Liikennevirasto (2014). Sorateiden kunnossapito, Liikenneviraston ohjeita 1/2014, Liikennevirasto, Helsinki, 61 s.



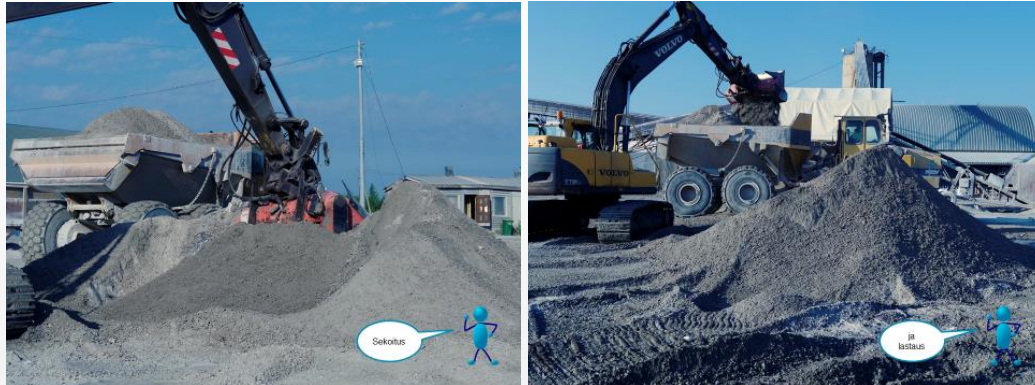
Kuituna käytettiin synteettistä makrokuitua. Kulutuskerros tehtiin yhdellä kertaa koeosuuksille.

## OHJEELLISET TYÖVAIHEET

1. Sideaine, kuitu ja sivukivimurske annostellaan ohjeellisten paino-osien mukaan ja sekoitetaan asemasekoituksella tai paikallasekoituksella, jolloin materiaalit levitetään suoraan korjattavalle tieosuudelle ja sekoitetaan paikalla esimerkiksi sekoitusjyrsimellä tai aumasekoittimella. Sekoitusvaiheessa optimoidaan vesimäärä huomioiden murskeen vesipitoisuus. Riittävä sekoitusaika ja vesimäärä varmistetaan näytteellä.
2. Suodatinkangas levitetään poikittain vanhan päällysteen päälle ja limitetään saumoista vähintään 500 mm. Suodatinkankaan päälle kaadetaan ensin ohut kerros kantavan kerroksen murskesideaineseosta ja varmistetaan, että suodatinkangas pysyy paikallaan ja on suorassa.
3. Kantavan kerroksen murskesideaineseos levitetään suodatinkankaan päälle noin 200 mm paksuudella tasalaatuisesti kauhakuormaajalla ja tasataan tiehöylällä.
4. Tasattu kerros tiivistetään painavalla (min 12 t) täryjyrällä tai (min 25 t) kumipyöräjyrällä 1-2 jyräskerralla kaltevuuteen 3-4%.
5. Kulutuskerroksen sideainemurskeseos valmistetaan ja sekoitetaan kuten kantavan kerroksen materiaali.
6. Kantavan kerroksen päälle levitetään kauhakuormaajalla 100 mm paksu kulutuskerros (sideainemurskeseos) kaltevuuteen 3-4%, tasataan tiehöylällä ja tiivistetään jyrällä. Kulutuskerros tehdään täytenä kerroksena kantavan kerroksen päälle mahdollisimman pian kantavan kerroksen lisäyksen jälkeen.
7. Kantavan kerroksen päät tasataan.

Olosuhteet: työn aikana ja vähintään viikko työn jälkeen ilman, maan ja materiaalien lämpötilan tulee olla vähintään 5°C. Rakenteen tekemistä voimakkaan sateen aikana tulee välttää.

## Koerakenteen toteutus



KUVA 6. SIDEAINE, KUITU JA MURSKKE SEKOITETTIIN VALMIIKSI JA SIIRRETTIIN KOHTEESEEN.



KUVA 7. KANTAVAN KERROKSEN MATERIAALIN PURKU TIELLE.



KUVA 8. KANTAVAN KERROKSEN MATERIAALIN LEVITYS KORJATAVALLE TIEOSUDELLE.





KUVA 9. KANTAVAN KERROKSEN TIIVISTYS JYRÄLLÄ.



KUVA 10. KULUTUSKERROSMATERIAALIN SEKOITUS JA KASTELU.



KUVA 11. KULUTUSKERROKSEN LEVITYS KANTAVAN KERROKSEN PÄÄLLE.



KUVA 11. KULUTUSKERROKSEN TIIVISTYS JYRÄLLÄ.



KUVA 13. VALMIS TIE.

Alla linkki koerakenteesta tehtyyn videoon.

[https://edukainuu-my.sharepoint.com/:v/g/person/minna\\_sarkkinen\\_kamk\\_fi/ERGZUB8T2ABPIVdHdolwQpEB-Yk2SVppQZnuOxJCge\\_S2A?e=vntzNy](https://edukainuu-my.sharepoint.com/:v/g/person/minna_sarkkinen_kamk_fi/ERGZUB8T2ABPIVdHdolwQpEB-Yk2SVppQZnuOxJCge_S2A?e=vntzNy)



## Stabilointisideainevaihtoehtojen vertailu

Vertailussa oli mukana 4 sideainevaihtoehtoa: OPC, teräskuonafilleri/masuunikuona, MgO/masuunikuona ja teräskuonafilleri/biolentotuhka. Monimuuttuja-analyysi tehtiin AHP-menetelmällä, jossa käytettiin 3 pääkriteeriä: taloudellisuus, tekninen toimivuus ja ekologisuus. Ekologisuus arvioitiin LCA-menetelmällä.

### SIDEAINEIDEN TEKNINEN TOIMIVUUS JA SAATAVUUS

Alla oleva taulukko esittää vertailuarvona käytettyjä kantavuusarvoja (CBR), sideaineen tehokkuutta ilmaistuna lujuusindeksillä SAI (Strength Activity Index) sekä sideainevaihtoehdon saatavuutta. Tulosten perusteella teräskuonafillerin käyttö silikan kanssa (SSF9%+SF1%) oli lujuusindeksiltään paras.

**TAULUKKO 7. SIDEAINEVAIHTOEHTOJEN LUJUUSINDEKSIT JA SAATAVUUS.**

Sideaine (%)	Lujuusindeksi, SAI (%)	CBR-indeksi (%)	Saatavuus
(SSF+GGBFS) 5 %+SF 0.5 %	166	467	rajoitettu (SSF)
SSF 9 %+SF 1 %	239	289	rajoitettu (SSF)
(BFA+SSF) 14 %	99	275	rajoitettu (BFA+SSF)
OPC 7 %	100	275	hyvä

SSF = teräskuonafilleri  
 GGBFS= masuunikuonajauhe  
 SF= ei-kaupallinen silikapöly  
 BFA=Kavon biopolton lentotuhka  
 OPC= Plussementti





KUVA 14. VASEMMALLA CBR-LAITE JA OIKEALLA PURISTUSLUJUUDEN TESTAUSLAITE.

Sideaineella, jossa teräskuonafilleri+masuunikuona+silika oli korkein CBR-arvo. Saatavuuteen vaikuttaa edullisesti sivutuotteen tuotteistaminen, joka esim. masuunikuonalla on hyvä. Esimerkiksi biopolton lentotuhkan osalta saatavuutta vaikeuttaa kausiluontoisuus, joka on heikompi kesäaikaan, jolloin lentotuhkan käyttötarve on suurin.

## YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Alla olevassa taulukossa on vertailusideaineiden ympäristövaikutuksia määritettynä elinkaariarvioanalyysillä (LCA). Arvoissa huomioitiin sideainemäärä ja kuljetus koerakennekohteeseen.

TAULUKKO 8. VERTAILUSIDEAINEIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA.

Sideaine (%)	GWP, CO <sub>2</sub> eq (g)	Energian kulutus (MJ)	Resurssit (μPt)	Vaikutus terveyteen (μPt)
(SSF+GGBFS) 5 %+SF 0.5 %	270	2.1	16	28
SSF 9 %+SF 1 %	270	2.3	16	28
(BFA+SSF) 14 %	430	2.1	18	28
OPC 7 %	720	3.5	25	35

SSF = teräskuonafilleri  
 GGBFS= masuunikuonajauhe  
 SF= ei-kaupallinen silikajauhe  
 BFA=Kavon biopolton lentotuhka  
 OPC= Plussementti

Portlandsementin (OPC) ympäristövaikutus oli kaikissa neljässä kategoriassa (ilmaston lämpeneminen, energian kulutus, resurssien käyttö ja vaikutus ihmisten terveyteen) suurin. Kolmessa vertailusideaineessa suurin ympäristövaikutus oli lentotuhka+teräskuonafilleriseoksesta (BFA+SSF), jonka suhteellinen tarvittava määrä oli huomattavasti muita korkeampi (14%), mikä lisäsi kuljetuksesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä.

## KUSTANNUSTEN VERTAILU

Alapuolella oleva taulukko esittää arvioituja materiaali- ja kuljetuskustannuksia koekohteeseen. Arvion perusteella sementin materiaalikustannus oli selvästi korkein ja vaihtoehdon masuunikuona+teräskuonafilleri+silika pienin.

**TAULUKKO 9.**

Sideaine (%)	Materiaalit (€/ton)	Kuljetus (€/ton)
(SSF+GGBFS) 5 % + SF 0.5 %	0.87	0.82
SSF 9 % + SF 1 %	2.35	1.5
(BFA+SSF) 14 %	1.05	2.1
OPC 7 %	6.30	2.1

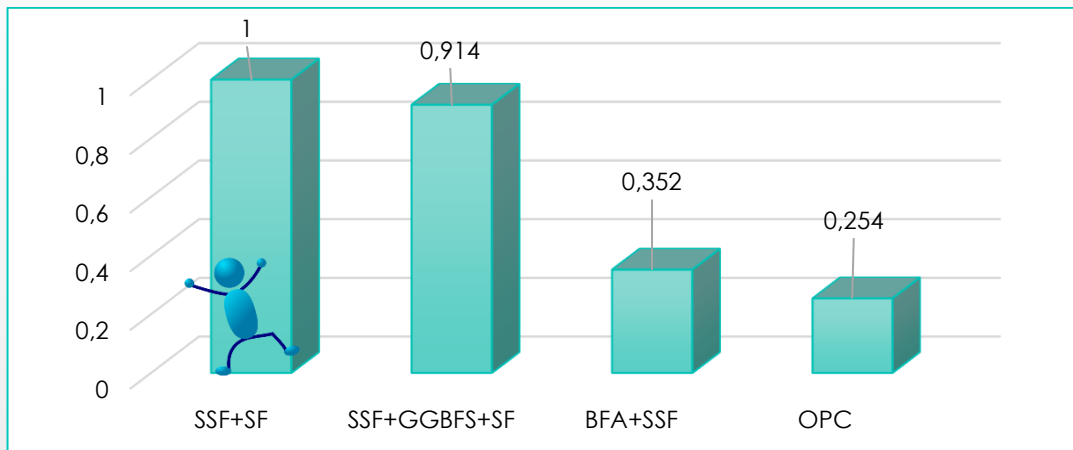
## KRITEEREIDEN YHDISTÄMINEN

Taulukko esittää vertailuanalyysissä (analyttinen hierarkiaprosessi, AHP) käytettyä mallia, jossa oli kolme pääkriteeriä (kustannukset, ympäristövaikutukset ja tekninen toimivuus) sekä niissä yhteensä 9 alakriteeriä. Prioriteetti (%) esittää pääkriteerikohtaisia painotuksia arviointikriteereille. Pääkriteerien painotus oli jaettu tasan.

**TAULUKKO 10. ALAKRITEERIEN PRIORISOINTI.**

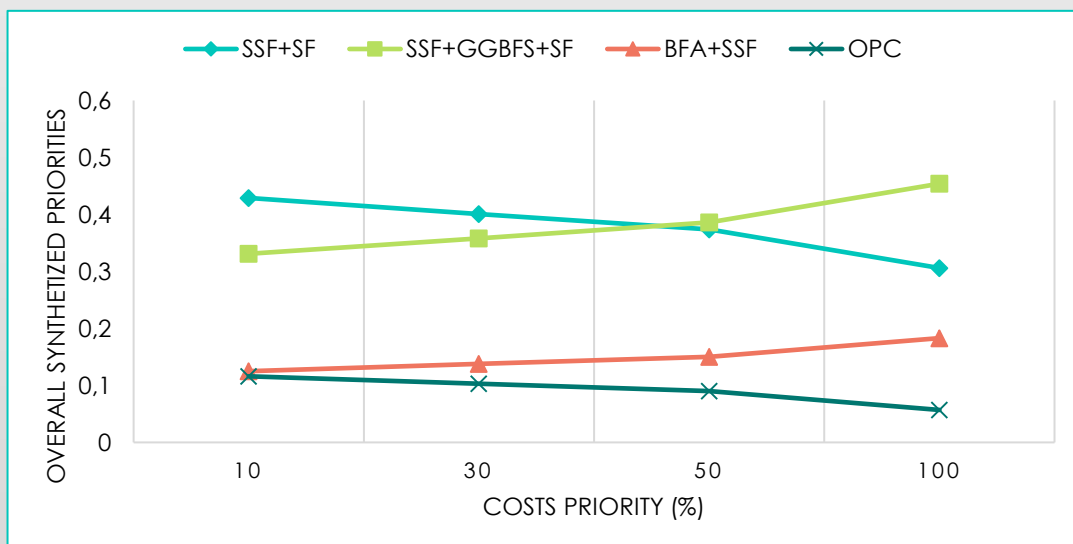
Pääkriteeri	Alakriteeri	Prioriteetti (%)
Kustannukset	Kuljetuskustannukset	50
	Materiaalikustannukset	50
Ympäristövaikutukset	GWP	25
	Energian kulutus	25
	Resurssien käyttö	25
	Vaikutus terveyteen	25
Tekninen toimivuus	Lujuusindeksi, SAI	31
	CBR	49
	Materiaalin saatavuus	20

Alla oleva pylväskaavio esittää AHP-analyysin lopputuloksena saatua suositusta neljän eri vaihtoehdon osalta. Vaihtoehto, jossa oli teräskuonafilleri+silika (SSF+SF) oli kokonaisarvion perusteella paras ja OPC-sementin käyttö heikoin vaihtoehto. Ero kahden ensimmäisen ja kahden jälkimmäisen vaihtoehdon välillä oli suhteellisen pieni.



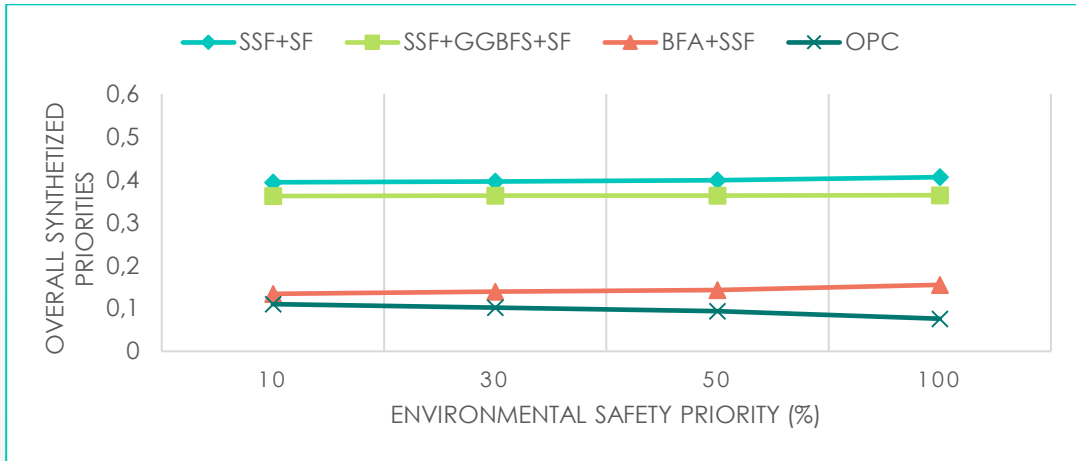
KUVA 15. ANALYYSIN PERUSTEELLA SUOSITELTU PAREMMUUSJÄRJESTYS.

Kaaviot kuvissa 16-18 kuvaavat pääkriteerikohtaisten painotusten (prioriteettien) muutosten vaikutusta vaihtoehtojen suositusjärjestykseen. Vaaka-akseli esittää painotuksen prosentuaalista osuutta.



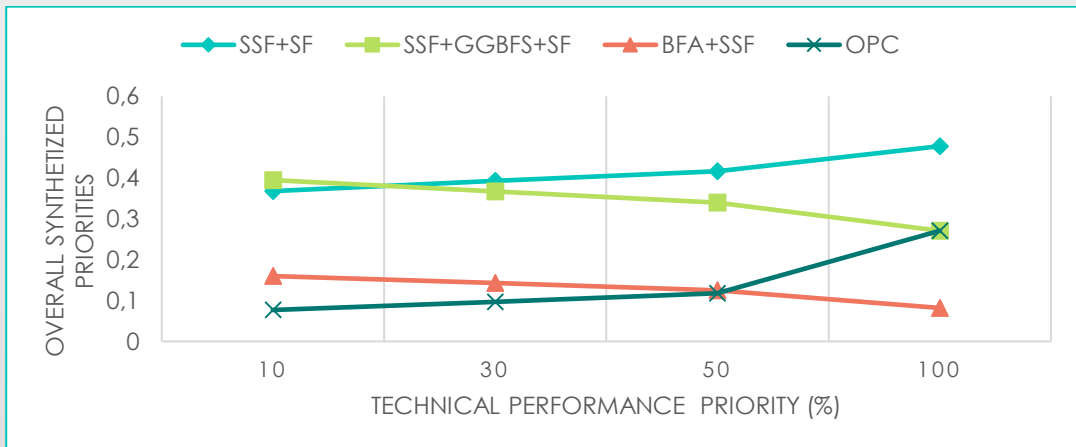
KUVA 16. KUSTANNUSTEN PAINOTUKSEN VAIKUTUS VAIHTOEHTOJEN JÄRJESTYKSEEN.

Kustannusten osalta sementin käyttö oli heikoin ja käyrä laskeva suhteessa painotuksen kasvuun. Vaihtoehtojen SSF+SF ja SSF+MKJ+SF keskinäinen järjestys muuttui jälkimmäisen eduksi, jos kustannuksia painotettiin yli 50 %.



**KUVA 17. YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN PAINOTUKSEN VAIKUTUS VAIHTOEHTOJEN JÄRJESTYKSEEN.**

Yllä oleva kaavio esittää ympäristövaikutusten painotuksen muutoksen vaikutusta, joka ei vaikuta vaihtoehtojen suositusjärjestykseen. Vaihtoehto SSF+SF oli painotuksesta riippumatta paras ja OPC-sementti heikoin.



**KUVA 18. TEKNISEN TOIMIVUUDEN PAINOTUKSEN VAIKUTUS VAIHTOEHTOJEN JÄRJESTYKSEEN.**

Yllä oleva kaavio esittää teknisen toimivuuden painotuksen muutoksen vaikutusta. Vaihtoehdoilla teräskuonafilleri+silika ja vertailusementillä oli nouseva käyrä painotuksen kasvaessa. Sementtinvaihtoehto ylitti suositusjärjestyksessä vaihtoehto biotuhka+teräskuonafilleri 50% painotuksen jälkeen.

## Yhteenveto

Kiinnostus aikaisemmin vähän hyödynnettyjen sivuvirtojen kierrätyksestä rakennusmateriaaleissa on kasvanut viime vuosina tarkoituksena parantaa rakentamisen kustannustehokkuutta sekä vähentää haitallisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia. Tässä raportissa esitettiin tuloksia muutamien uusien sivuvirtakomposiittien käyttömahdollisuuksista päällystämättömien teiden kunnostuksessa. Johtopäätöksenä voi todeta, että erilaisia jättepohjaisia vaihtoehtoja on yhä enemmän tarjolla ja paras materiaalivaihtoehto vaihtelee kohdekohtaisesti. Raportissa kuvattiin analyysimenetelmä, jonka avulla voidaan käytännössä tarkkaan määrittää ja integroida eri vaihtoehtojen ympäristövaikutukset, kustannukset ja tekninen toimivuus kohdekohtaisesti.

Koerakenne osoitti, että sivutuotepohjaisilla komposiittimateriaaleilla voidaan työ suorittaa onnistuneesti myös loppusyksyllä. Syyskuussa toteutetussa koerakennekohteessa tien kantavuus parani jo ensimmäisen kuukauden kantavuusseurannan perusteella keskimäärin 2,5-kertaisesti vertailuarvosta. Kunnostettu tie voitiin ottaa raskaan liikenteen käyttöön heti kunnostustyön jälkeen.

Tämän tutkimuksen perusteella:

- Portlandsementti voidaan korvata kustannustehokkaasti useilla eri sivutuotekomposiiteilla,
- Kahden sivutuotteen synergiaetua hyödyntämällä saavutettiin parempia tuloksia kuin käyttämällä vain yhtä,
- Yhdistämällä AHP- ja LCA-menetelmät voitiin tarkkaan vertailla ja optimoida kohdekohtaisesti paras teknis-taloudellis-ekologisin materiaalivaihtoehto.



**KUVA 19. KANTAVUUDEN KEHITYKSEN SEURANTAA KUAB-LAITTEELLA.**