



GeoROAD

Geopolymeeripohjaisten materiaalien käyttö tiereikien paikkauksissa

Tiivistelmä GeoROAD-projektissa tehdyistä liiketoimintaa tukevista tutkimuksista.
Minna Sarkkinen, Kimmo Kempainen, Seppo Gehör ja Kauko Kujala

GeoROAD

Geopolymeeripohjaisten materiaalien käyttö tiereikien paikkauksissa

Tiivistelmä

Teiden reikiintyminen muodostaa yleisimmän korjaustarpeen ja suurimman teiden ylläpitoa vaativan toimenpiteen. GeoRoad-hankkeen tavoitteena oli tutkia geopolymeerimateriaalien soveltuvuutta pinnoitettujen tievaurioiden korjauksessa erityisesti kylmänä vuodenaikana, jolloin akuutti korjaustarve on suurin. Talvikauden loppupuolella paikkausmateriaalit ovat alttiita toistuville pakkasen ja veden aiheuttamille rasituksille. Materiaaleilta vaaditaan nopeaa käyttöönottoa, yhteistoimintaa korjattavan alustan kanssa sekä kestävyyttä käyttövarmuuden, ympäristöystävällisyyden ja taloudellisuuden lisäksi.

Geopolymeeripohjaisten materiaalien käyttö infrarakenteiden, kuten teiden ja lentokenttien, korjauksissa on ollut tunnettua jo vuosikymmeniä Kiinassa ja Pohjois-Amerikassa, jossa ensimmäiset patentoidut sovellutukset ja kaupalliset tuotteet olivat nopeasti kovettuvia betonirakenteiden korjausmateriaaleja. GeoRoad-hankkeessa on hyödynnetty laajaa kansainvälistä tutkimustietoa sekundääristen raaka-aineiden käyttömahdollisuuksista sekä geopolymeeri- ja asfalttimateriaalien ominaisuuksista uusina materiaalisovellutuksina.

GeoRoad-hankkeessa komposiittiteknologiaa sovellettiin yhdistämällä uudella tavalla asfaltti- ja geopolymeerimateriaaleja päällystettyjen teiden korjauksissa. Yksi tärkeä tekijä oli partikkelikokojen ja -laatujen optimointi mikro- ja makrotasolla huomioiden materiaalien huokoisuus ja pintarakennetekijät. Muita tekijöitä olivat esimerkiksi materiaalien vanhenemisen aiheuttamat muutokset niiden toimivuudessa käytännön rasitusolosuhteissa.

Hankkeen liiketoimintaa tukeva tutkimusosuus sisälsi mikro- ja makrotason tutkimuksia. Laboratoriotutkimusten avulla tutkittiin geopolymeerimateriaalien toimintaan tiereikien korjauksessa vaikuttavia ominaisuuksia sekä optimoitiin materiaalien koostumusta paikkaukseen soveltuvaksi. Pilottikoepaikkausten avulla tutkittiin materiaaliveikkojen toimivuutta todellisissa sää- ja liikennesäätöolosuhteissa.

Projektin toteutus

GeoROAD-projektin päärahoittaja oli Tekes. Projekti toteutettiin vuoden 2016-2017 aikana. Toteutuksesta vastasi Kajaanin ammattikorkeakoulun kone- ja kaivostekniikan yksikkö. Projektin ohjausryhmässä olivat mukana myös NCC Roads, ELY, Liikennevirasto ja Kajaanin kaupunki. Kiitokset kaikille projektiin osallistuneille.

ISBN 978-952-7219-24-9
2018
Kajaani
Kajaanin
ammattikorkeakoulu

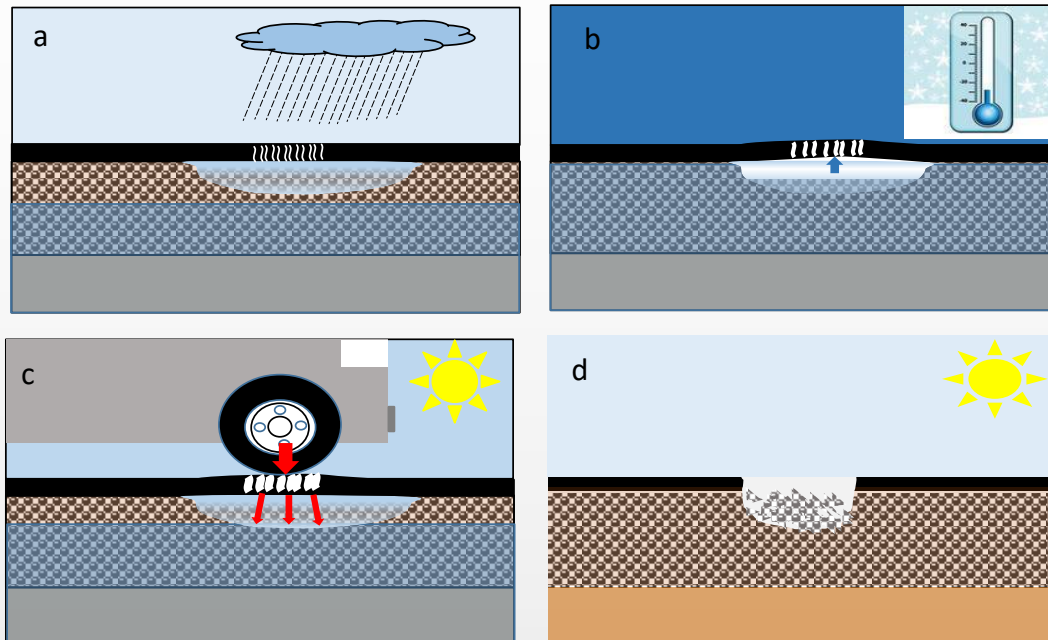
Sisällys

Projektin toteutus.....	2
Tiivistelmä	2
Päällysteiden vaurioitumisen syntymekanismi.....	0
Ilmastorasituksen vaikutus liikennettä haittaavien päällystevaurioiden muodostumisessa – numeerinen laskentatarkastelu	2
Perinteiset korjausmateriaalit.....	4
ASFALTI PINNOITTEET	4
ASFALTI PÄÄLLYSTEIDEN TYYPILLISET VAURIOT	5
KORJAUSMATERIAALIEN TOIMIVUUSVAATIMUKSET	5
BITUMI POHJAISET PAIKKAUSMATERIAALIT.....	6
TIEREIKIEN PAIKKAUSTEKNIIKAT	7
Gopolymeerimateriaalit teiden korjauksissa	8
GEPOLYMEERIMATERIAALIEN TOIMIVUUS KÄYTÄNNÖSSÄ.....	9
Taivutuslujuus	10
Kutistuminen	11
Kulutuskestävyys.....	11
Liukkausvastus	12
Sitoutumisaika ja lujuudenkehitys	13
Puristuslujuuden kehitys	13
Tartuntalujuus	14
Säärasitus ja kloridien kestävyys.....	15
Geopolymeerimateriaalien säärasituksen kestävyys.....	16
Huokosrakenne	17
Pilottikokeet geopolymeerimateriaaleilla.....	19
Kohde 1.....	19
Kohde 2.....	25
Kohde 3.....	27
Yhteenveto	29

Päällysteiden vaurioitumisen syntymekanismi

Päällysteiden vauriotyyppejä on tunnistettu lukuisia ja esim. pohjoisamerikkalaisen Asfaltti-instituutin laatimassa vaurioluokituksessa kuvataan 17 eri päällystevauriotyyppiä. Päällystevaurioiden syyt ovat myös monimuotoisia ja kytköksissä toisiinsa. Yhteisiä syitä useimmille vaurioille ovat mm. liikennesäätö, ilmastotekijät (lämpötila, erityisesti jäätyminen ja sulaminen, ja sadanta), puutteelliset kuivatusolosuhteet, työvirheet sekä päällysteen, päällysrakenteen ja alusrakenteen materiaalien heikko laatu ja ohuet kerrokset. Suomessa päällystevauriot ryhmitellään muodon, syntyvän ja haitan kohdistumisen perusteella pääasiassa liikennettä haittaaviin vaurioihin, pääasiassa tien rakennetta haittaaviin vaurioihin ja ympäristöhaittoja aiheuttaviin vaurioihin.

Liikennettä haittaavista vaurioista päällysteen reikiintymisvauriot ovat yleistyneet voimakkaasti leutojen talvien aiheuttamien toistuvien jäätymis-sulamissykliin johdosta. Vaurion muodostumisen edellytyksenä on liikennesäätö ohella päällysteen alapuolella oleva runsaasti vettä sisältävä rajattu alue. Pistepäisen reiän muodostumisen alkuna pidetään päällysteessä olevaa vedenläpäisevyyden läpäisyeroja ja halkeamia, joista vesi pääsee päällysteen alle (Kuva 1). Veden jäätyessä ja laajentuessa päällysteen pintaan muodostuu kohouma joka sulassa aiheuttaa ylikylläisen tilan päällysteen alle ja päällysteeseen kohdistuva dynaaminen kuorma aiheuttaa asfalttiin deformaation ja lisää halkeilua. Tien pinnan toistuvien jäätymis-sulamissykliin aikana dynaaminen liikennekuorma lopulta aiheuttaa päällysteen pistemäisen murtumisen. Reikiintymisen muodostumismekanismia ei kuitenkaan tunneta riittävän tarkasti vaan ilmiö kuvataan pelkästään kvalitatiivisesti. Syitä miksi päällyste ei kestä liikenne ja ilmastorasitusta, joiden vaikutuksesta päällyste reikiintyy, on useita. Vaurioon johtaneita todennäköisiä asfalttipäällysteestä johtuvia syitä ovat mm. päällysrakenteen teossa tapahtuneet työvirheet kuten kiviaineksen lajittuminen, saumat ja uusioasfaltin laatu voivat olla todennäköisiä syitä. Reikiintyminen on tyypillistä ohutpäällysteisille tierakenteille. Ilmiötä ei ole kuitenkaan systemaattisesti tutkittu. Päällysrakenteen puutteellinen kuivatus lisää reikiintymisriskiä. Päällysteen reikiintymisessä vauriomekanismien muodostumisen edellytyksenä on, että päällyste läpäisee vettä ja toistuvat jäätymis-sulamissyklit kiihdyttävät reikiintymistä. Ilmiö ei liity pelkästään kylmän ilmastoon olosuhteisiin, vaan samantyyppisiä vaurioita esiintyy myös alueilla, joilla ei esiinny routaa.



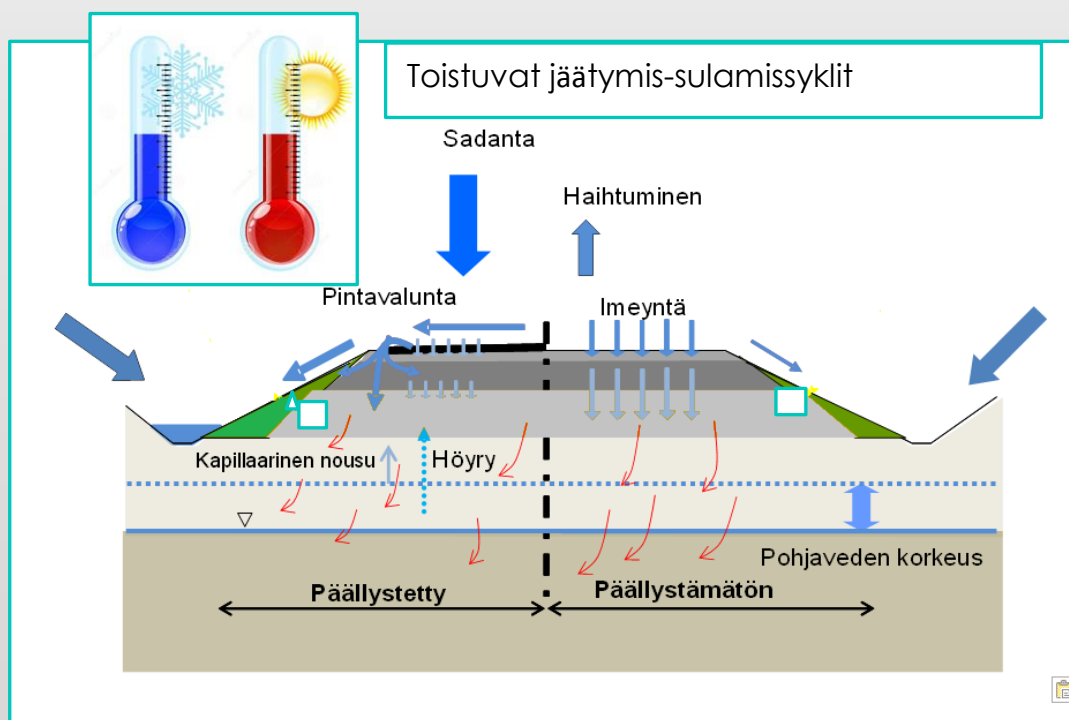
KUVA 1. PÄÄLLYSTEEN REIKIINTYMISEN MUODOSTUMISVAIHEET

Vaurioiden syntymekanismin tunnistaminen on perusedellytys vaurion korjausmenetelmien ja materiaalin valinnalle. Paikkausmateriaalien valinta tulee tehdä päällysrakenteen vaurion muodostumistapa tuntien. Pohjamaan routanousueroista johtuvat pituussuuntaiset halkeamat sekä pohjamaan kantavuusvajeesta johtuvat verkkohalkeamat tulee korjata materiaaleilla, jotka sietävät hyvin voimakkaita deformaatioeroja ja ovat kimmoisia. Pohjamaan routuminen on toistuva ilmiö, jota päällysteen vaurionkorjaaminen ei poista. Betonimaisia lujia mutta hauraan materiaalin tavoin käyttäytyviä paikkausmateriaaleja ei tulisi käyttää pohjamaan routimisesta aiheutuvien päällystevaurioiden korjaamisessa. Päällysteen korjaus ei poista vaurioiden syitä. Roudasta aiheutuvien päällystevaurioiden korjaus edellyttää vaurioiden syiden poistoa kuten esim. rakenteen paksuuden lisäämistä, materiaalien parantamista tai kuivatuksen tehostamista.

Lyhyen aikavälin tarkastelulla on ilmeistä, että toistuvat jäätymis-sulamissyklit ja niiden vaikutukset sateen olomuotoihin talviaikana, ovat lisänneet päällysrakenteen vaurioitumisriskiä, joista etenkin reikiintymisen osuus on ollut havaittavissa tiestössä.

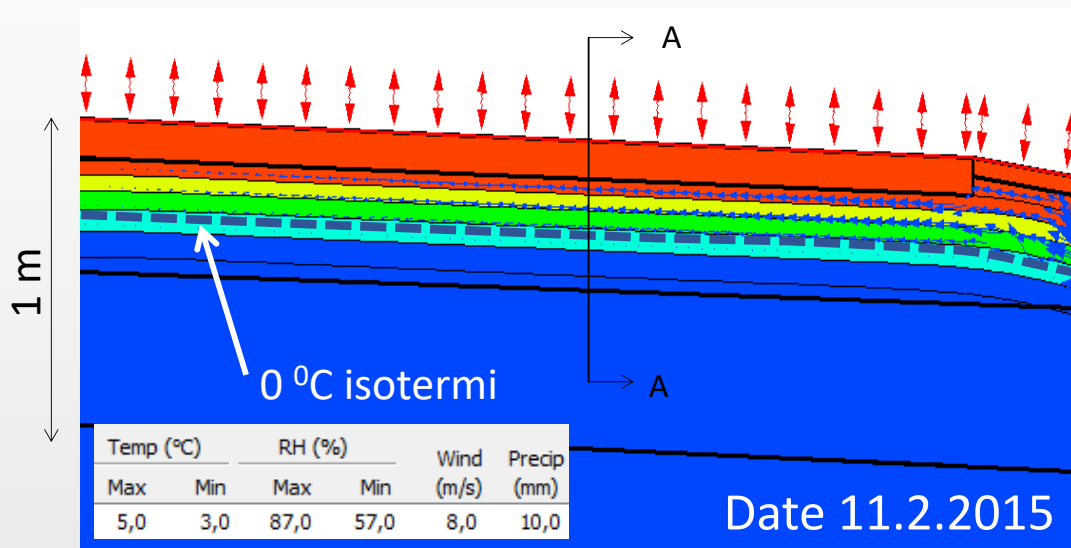
Ilmastorasituksen vaikutus liikennettä haittaavien päällystevaurioiden muodostumisessa – numeerinen laskentatarkastelu

Tierakenteen routamitoituksessa käytetään perinteisesti ilmastorasituksen tilastollisesti toistuvia pakkasmääriä ja vuoden keskilämpötilaa ja vastaavasti roudan sulamiseen lämpöastesummaa. Laskentamenettelyllä ei ole mahdollista ottaa huomioon ilmastorasituksen toistuvia vaihteluja kuten hydrologisia suureita kuten sadantaa ja haihduntaa. Rakenteen vesi- ja lämpötilaa voidaan tarkastella numeeristen laskentamallien avulla, joilla voidaan simuloida kosteuden ja lämpötilan samanaikaisia vaihteluja päällysrakenteessa (Kuva 2). Hankkeessa laskettiin kahden talvijakson vaikutusta päällysrakenteen lämpö- ja kosteustilajakaumaan elementtimenetelmään perustuvan numeerisen laskentaohjelmiston avulla. Laskenta ottaa huomioon epästationäärisen pintalämpötilan, sadannan, haihdunnan ja tuulen nopeuden sekä rakenteen osittain kyllästyneen tilan. Laskennassa simuloidaan myös asfaltin reikiintymisen vaikutusta päällysrakenteen vesitaseeseen. Laskentatulosten avulla arvioidaan jäätymissulamistestien vastaavuutta päällysrakenteen rasitustilana.



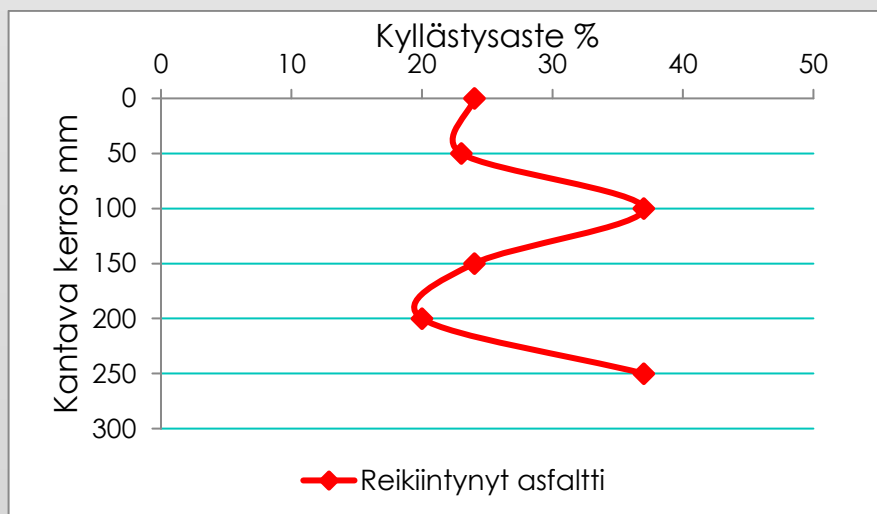
KUVA 2. TIERAKENTEEN VESITASEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.

Kuvassa 3 on esimerkkinä Kajaanin ilmastodatalla (vuorokauden maksimi- ja minilämpötila, vuorokausisadanta, ilman suhteellista kosteutta ja tuulen nopeus) 1.12.2014 – 31.5.2016 laskettu tien lämpötila lyhyen sulamisjakson 10.2.- 12.2.2015 aikana. Päällysrakenteen yläosa on sulanut 22 cm syvyyteen ja rakenne pysyy sulana 3 vrk:n ajan.



KUVA 3. TIERAKENTEEN LÄMPÖTILA TALVELLA 2015 SULAMISJAKSON 10.2.-12.2.2015 AIKANA.

Asfalttipäällysteen reikiintymistä simuloitiin kasvattamalla asfaltin vedenläpäisevyyttä jolloin kantavan kerroksen kyllästysaste kasvoi merkittävästi (Kuva 4).



KUVA 4. KANTAVAN KERROKSEN KYLLÄSTYSASTEEN VAIHTELU SULAMISJAKSON AIKANA, KUN PÄÄLLYSTE ON REIKIINTYNYT.

Mallin avulla voidaan simuloida eri sääskenaarioita ja niiden vaikutusta rakennekerrosten materiaaliominaisuuksiin, kuten tilavuusvesipitoisuuteen, jääpitoisuuteen, kyllästysasteeseen. Mallin avulla voidaan myös tarkastella kuivatuksen toimivuutta eri säätilanteissa ja suunnitella rakenteet siten, että syklisen jäätymisen ja sulamisen haitalliset vaikutukset minimoituvat.

Perinteiset korjausmateriaalit

ASFALTTIPINNOITTEET

Asfalttipinnoitteet ovat yleisimmin käytettyjä teiden pinnoitemateriaaleja niiden reologian, vedeneritys- ja tartuntaominaisuuksien ansiosta. Termillä bitumi viitataan vaihtelevasti asfaltin raaka-aineeseen ja prosessoituun valmiiseen asfalttimateriaaliin. Bitumilla tarkoitetaan Euroopassa yleisesti samaa asiaa kuin asfaltilla Pohjois-Amerikassa¹. Asfalttipäällysteet koostuvat pääasiassa öljypohjaisesta bitumista ja kiviaineksesta. Öljysoran valmistuksessa käytetään myös sideaineena bitumiöljyä, mutta toisin kuin asfalttia öljysoraa ei kuumenneta tielle levitettäessä vaan se levitetään kylmänä ja tiivistetään jyräämällä.

Asfaltti materiaalina on monimutkainen heterogeeninen seos, jonka mekaaniset ominaisuudet riippuvat käytetyn asfalttiraaka-aineen tyypistä, käsittelytavasta ja määrästä². Asfalttimolekyylit jaetaan kahteen pääosaan asfalteeniin ja malteeniin, joka jaetaan edelleen saturaatteihin, aromaatteihin ja hartseihin. Asfalttiin lisätään lisäksi yleisesti modifiointiaineita kuten polymeerejä, fillereitä ja murskattua kumia, jotka vaikuttavat asfaltin mekaaniin ominaisuuksiin ja termodynaamiseen käyttäytymiseen. Asfalttimateriaaleja on laajasti tutkittu, mutta luotettava tieto asfaltin käyttäytymisestä eri lämpötiloissa erityisesti kylmissä olosuhteissa, mekaanisen rasituksen ja vanhenemisen aiheuttamista muutoksista materiaalin sisäiseen rakenteeseen on vähäistä. Asfaltin kiteytymiskinetiikkaa ei vielä täysin ymmärretä, mutta yleisesti tiedetään asfaltin mekaanisten ja termodynaamisten ominaisuuksien olevan sensitiivisiä lämpötilan vaihtelulle ja vaihtelevan asfalttimateriaalin koostumuksen mukaan. Kylmässä asfaltti on kiinteä ja lasimainen ja lämpötilan noustessa sen koostumus muuttuu nestemäiseksi. Kylmässä asfaltin plastisuus vähenee, tartunta kiviainekseen heikkenee ja hauraus lisääntyy riippuen materiaalin kiteisten fraktioiden määrästä.

¹ Polacco, G.;Filippi, S.;Merusi, F.;& Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72-112.
² Krishnan, J. M.;& Rajagopal, K. R. (2005). On the mechanical behavior of asphalt. *Mechanics of Materials*, 1085-1100.

ASFALTTIPÄÄLLYSTEIDEN TYYPILLISET VAURIOT

Tiepäällysteissä ei saa esiintyä turvallisuutta, ajomukavuutta, tierakenteen toimivuutta tai kestävyyttä haittavia vaurioita. Tiereikien muodostuminen on vakava ongelma erityisesti päällysteissä kylmissä ja märissä sääolosuhteissa, jolloin esiintyy toistuvaa jäätymissulamirasitusta. Säärasituksen lisäksi liikenne ja alustan puutteellinen tuki aiheuttavat reikiintymistä. Tiereikien muodostuminen alkaa tyypillisesti päällysteen halkeilun seurauksena, jolloin halkeamaan tunkeutuva vesi ja talvella muodostuva jää heikentävät alusrakennetta johtaen päällysteen peittämiseen. Päällysteissä esiintyvät vauriot luokitellaan Tiehallinnon mukaan Suomessa karkeasti seuraavasti:

- Reiät ja kuopat, jotka ovat syntyneet tiemateriaalin lajittumisen ja vedenkertymisen seurauksena. Painumia voi syntyä myös tierakenteen routimisen seurauksena.
- Purkaumat; päällysteessä tapahtuva kiviaineksen irtoaminen päällysteen vanhenemisen, lajittumisen, huonon tartunnan ja puutteellisen sideaineen seurauksena.
- Halkeamat (pitkittäis- ja poikittaissuuntaiset halkeamat, verkkohalkeamat ja murtumat), jotka syntyvät tyypillisesti päällysteen reuna-alueille kuormituksen tai heikon kantavuuden seurauksena.
- Lajittumat

Päällysteissä esiintyvät vauriot voidaan luokitella myös niiden muodon, syntyvän ja haitan kohteen perusteella liikennettä, rakennetta ja ympäristöä haittaaviin vaurioihin. Teiden kuntoa arvioidaan vaurioindeksin avulla, joka lasketaan summana tiessä esiintyvistä vaurioista. Vaurioiden korjauksen kiireellisyys luokitellaan Tiehallinnon ohjeessa (Päällysteiden paikkaus) turvallisuutta vaarantaviin, ajomukavuutta haittaaviin ja nopeasti laajeneviin tai ympäristöhaittoja aiheuttaviin vaurioihin sekä hitaasti laajeneviin ja muihin vaurioihin. Tiereiät ovat ylivoimaisesti yleisin korjausta vaativa vauriotyyppi ja yleisin teiden ylläpitotoimenpide³.

KORJAUSMATERIAALIEN TOIMIVUUSVAATIMUKSET

Toimivuus määritetään tuotteen käytön aikaiseksi suoriutumiseksi ja toimivuusvaatimus vaaditaksi ominaisuudeksi ilman määritelmää teknisestä ratkaisusta. Tässä yhteydessä toimivuudella tarkoitetaan korjausmateriaaleille asetettuja toiminnallisia vaatimuksia sekä toisaalta korjausten toimivuudelle asetettuja vaatimuksia. Tutkimusosuudessa keskitytään materiaalien toiminnallisiin ominaisuuksiin, jotka ovat edellytys korjausten onnistumiselle. Esimerkiksi Ruotsissa on pyritty siihen, ettei samanaikaisesti aseteta

³ Transportation Research Board. (2014). *Pavement Patching Practices, A synthesis of highway practice*, NCHRP Synthesis 463. Washington D.C.: TRB.

toimivuusvaatimuksia ja materiaalivaatimuksia sideaineella⁴, jolloin toimivuusvaatimusten asettaminen sallii erilaisten materiaalien käytön. Vaatimuksia ei tulisi asettaa myöskään yhtäaikaaisesti eri tasoilla kuten asfalttimassalle, päällysteelle ja tien pinnalle.

Toimivuusvaatimus sovellettuna tiereikien korjauksiin keskittyy päällysteen ominaisuuksiin kuten kulumis-, deformatumis-, veden- ja väsymiskestävyys sekä jäykkyys, vedenläpäisevyys ja joustavuus, joita voidaan arvioida esimerkiksi ottamalla poranäyte tieltä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että reseptimäärittelyn sijasta käytetään toimivuusvaatimuksia. Esimerkiksi Hollannissa materiaalitason toimivuusvaatimukset asetetaan kiviainekselle, sideaineelle, tiivistettävyydelle, tyhjätilalle jne. Myös Pohjois-Amerikassa, Englannissa, Norjassa ja Tanskassa ollaan oltu pidemmällä toimivuuksipohjaiseen ajatteluun siirtymisessä tiehankkeiden kunnossapidossa kuin Suomessa⁵. Toimintopohjaisten spesifikaatioiden asettamista bitumipinnoitteille on pidetty ongelmallisena ja niiden mahdollisuutta rajallisena bitumisideaineiden monimutkaisen lämpötilan ja ajan mukaan muuttuvan käyttäytymisen seurauksena⁶.

BITUMIPOHJAISET PAIKKAUSMATERIAALIT

Asfalttipäällysteiden paikkauksissa on käytetty pääasiassa bitumia tai bitumiin perustuvia korjaustuotteita. Bitumipohjaisten korjaustuotteiden kestävyttä heikentävät osin edellä kuvatut asfaltin vaihtelevat materiaaliominaisuudet, joiden vaikutus korostuu kylmissä ilmasto-olosuhteissa. Talvi- ja kevät aikaan tehtyjen paikkausten kestoikä on tavallisesti ollut lyhyt ja heikoin käytettäessä kylmänä sekoitettuja bitumipohjaisia materiaaleja. Bitumisideaineet tyypillisesti jäykistyvät lämpötilan laskiessa. Jäykempi massa parantaa kantavuutta, mutta lisää alttiutta halkeilulle matalissa lämpötiloissa. Muita tyypillisiä ongelmia ovat puutteellisen tiivistyksen aiheuttama paikkamateriaalin lohkeaminen sekä kiviaineksen erottuminen sideaineesta. Puutteellinen tartunta ja paikkakohdan esikäsitely aiheuttavat erityisesti jäätymissulamirasituksen seurauksena paikkakohdan irtoilua. Heikko liukkaustavustus on seurausta sideaineen erottumisesta tai kiviainesten hioutumisesta sileäksi.

Kylmäasfalttia käytetään yleisesti talviaikana tehtävissä väliaikaisissa korjauksissa. Kylmäasfaltti valmistetaan kiviaineksesta ja bitumista, jota ei ole kuumennettu. Kylmäasfaltti sekoitetaan valmiiksi ja varastoidaan kasassa käyttöä varten. Kylmäasfaltin laatu on kuuma-asfalttia heikompi. Kylmä- ja kuumabitumimateriaalien jälkeen sementtipohjaiset materiaalit ovat yleisimmin pääasiassa betoniteiden tiereikien paikkauksissa käytettyjä materiaaleja. Sementtipohjaisia materiaaleja käytetään erityisesti nopeaa paikkausta

⁴ Wågberg, L.-G. (2001). *Funktionskrav på beläggningar, ett nytt sätt att upphandla gatubeläggningar*. Svenska Kommunförbundet.

⁵ Kurki, T.; Spoo, H.; Malmivuo, M.; Petäjä, S.; & Leinonen, J. (2004). *Kunnossapitourakoiden toimivuusvaatimukset*. VTT.

⁶ Southern, M. (2015). A perspective of bituminous binder specifications. *Advances in Asphalt Materials*, 1-27.

vaativissa kohteissa. Sementtipohjaisten materiaalien ongelmana pidetään yleensä erilaisesta materiaalipohjasta johtuvaa paikkarajakohdan halkeiluriskiä asfalttipinnoitteissa, jolloin vesi pääsee halkeamaan ja asfalttia jäykempi paikkamateriaali voi alkaa liikkua liikenteen rasituksen seurauksena kasvattaen vaurioitumista. Geopolymeerimateriaalit luokitellaan sementtipohjaisiin materiaaleihin.

TIEREIKIEN PAIKKAUSTEKNIIKAT

Tiereikien paikkaustekniikat jaetaan kestävyys suhteen kolmeen luokkaan⁷. Tilapäisissä korjauksissa käytetään yleensä kylmäasfalttia. Yleisesti kylmäpaikkauksessa käytetään nopeaa, helppoa ja halpaa käsityömenetelmää, jossa kylmäasfaltti heitetään lapiolla paikkakohtaan ilman paikan esikäsittelyä. Kestävämmissä korjauksissa kiinnitetään enemmän huomiota paikkakohdan esikäsittelyyn ja paikkaamiseen käytetään tavallisemmin kuuma-asfalttia. Talvi- ja kevät aikaan tehdyt paikkakorjaukset erotellaan toisistaan. Talvella tehdyt korjaukset ovat alttiita jatkuville jäätymissulamissykleille ja yleensä kestävyydeltään lyhyitä vaihdellen päivistä muutamiin kuukausiin. Kevätaikaan tehdyt korjaukset ovat vähemmän alttiita jäätymissulatusrasituksille ja niiden tulisi kestää yhtä kauan kuin ympäröivä paikattava pinnoite. Joidenkin tutkimusten mukaan⁸ paremmat menetelmät sisältäen paikkakohdan esikäsittelyn ja paremman materiaalin ovat kestävämpiä ja tulevat vuositasolla moninkertaisesti edullisemmaksi. Lisäksi on arvioitu materiaalikustannuksen muodostavan vähemmän kuin 10 % korjauksen kokonaiskustannuksista.

GeoRoad-projektissa tutkittiin geopolymeerimateriaalien käytettävyyttä kylmissä olosuhteissa, jolloin kuuma-asfalttia ei voi käyttää, tavoitteena kylmäasfalttia kestävämpi paikkaus, jolloin välttyttäisiin toistuvilta uusintakorjauksilta ja niiden aiheuttamilta lisäkustannuksilta. GeoRoad-projektin tutkimusosuuden tavoitteena oli selvittää geopolymeerimateriaalien soveltuvuutta päällystettyjen teiden ja katujen korjauksiin kylmissä olosuhteissa. Projektissa tutkittiin geopolymeerimateriaalien toimivuutta ja kestävyyttä tiekorjauksissa kylmissä olosuhteissa sekä eri geopolymeerimateriaalityyppien ja -reseptien toimivuutta huomioiden myös eri maissa.

⁷ Ipavec, A. (2012). *Deliverable No. 3 – Summary of existing standards, techniques, pothole repair materials and experience with them*. Slovenia: ZAG Slovenian National Building and civil Engineering Institute.

⁸ Maher, A.;Gucunski, N.;Yanko, W.;& Petsi, F. (2001). *Evaluation of Pothole Patching Materials, Final report*. Rutgers, The State University Piscataway: Dept. of civil & environmental Engineering, Center for Advanced Infrastructure & Transportation (CAIT).

Gopolymeerimateriaalit teiden korjauksissa

Geopolymeerien sovellusalue on laaja ja määritelmät vaihtelevia. Geopolymeereillä tarkoitetaan synteettisiä epäorgaanisia materiaaleja, joiden tyypillisiä käyttösovellutuksia ovat korkeita lämpötiloja kestävät keraamiset materiaalit, jätteiden kapselointi ja rakennusmateriaalit. Termin geopolymeeri otti käyttöön ranskalainen professori Joseph Davidovits 1976 ja hän määritteli geopolymeerin materiaaliksi, joka muodostuu epäorgaanisen polykondensaation eli niin sanotun geopolymeerisoitumisreaktion tuloksena⁹. Geopolymeerit ovat kovalenttisisidoksin liittyneitä mineraalimolekyylien muodostamia ketjuja tai verkostoja. Geopolymeereille on ominaista amorfinen rakenne matalissa lämpötiloissa ja kidemäinen rakenne korkeissa yli 500°C lämpötiloissa. Geopolymeerit muodostuvat synteessissä, johon tarvitaan yleisimmin alkalinen (Na,K,Ca) aktivointi hydroksidien ja silikaattien avulla tai hapon (fosforihapon) avulla tapahtuva aktivointi. Davidovits jakaa geopolymeerit tällä hetkellä 10 eri materiaaliryhmään, joista kahta tutkittiin GeoRoad-hankkeessa.

Geopolymeerimateriaalien ominaisuudet poikkeavat huomattavasti perinteisistä sementtipohjaisista materiaaleista käytettyjen raaka-aineiden osalta ja uusista eri sovellutuksista on vielä vähän tutkimustietoa, mutta niiden käytön tierakentamisessa odotetaan yleistyvän. Geopolymeerimateriaalien etuna pidetään niiden hyvää kestävyyttä erityisesti vaativissa ilmasto-olosuhteissa, hyviä mekaanisia ominaisuuksia ja ympäristöystävällisyyttä¹⁰. Ympäristöystävällisyys liittyy kestävyuden lisäksi teollisten sivutuotteiden tehokkaaseen hyödyntämismahdollisuuteen.

Geopolymeeripohjaisia materiaalien käytöstä tiereikien paikkauksissa on kokemusta lähinnä Kiinassa ja USA:ssa, mutta niiden käyttö on rajoittunut pääasiassa betonipäällysteisten teiden korjauksiin. Asfaltti materiaalina poikkeaa huomattavasti betonista, mikä asettaa lisähaasteen erityisesti pyrittäessä käyttämään geomateriaalipohjaisia materiaaleja asfalttipinnoitteiden korjauksessa. Geopolymeerisideaineilla voi olla ominaisuuksia kuten hyvä ja nopea sitoutumiskyky myös kylmässä ja hyvä tartuntakyky eri materiaaleihin sekä hyvä kestävyys pakkasrasitusta vastaan, mitä on hyödynnetty uusien materiaalien kehittämisessä

Tiereikien paikkausmateriaaleilta kylmissä olosuhteissa vaaditaan nopeaa lujuudenkehitystä, hyvää tartuntaa ja toimivuutta vanhan päällysteen kanssa,

⁹ Davidovits J. (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications*, 3th edition, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, p.632

¹⁰ Tayabji, S.; Smith, K. D.; & Van Dam, T. (2010). *Advanced High-Performance Materials for Highway Applications: A Report on the State of Technology*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.

kulutuksenkestävyyttä sekä säärasitusten kestävyttä mukaan lukien suolarasituksen kestävyys. Bitumipohjaisten paikkausmateriaalien tärkeimmiksi ominaisuuksiksi on määritelty stabiilisuus liikenteen aiheuttamaa rasitusta vastaan, jota parantaa murskatun kiviaineksen käyttö, hyvä suhteitus ja materiaalin hyvä tiivistyvyys; hyvä tartunta, johon vaikuttaa lämpötila, mikä on parempi kuumabitumilla kuin kylmabitumilla sekä vesirasituksen kesto, joka bitumipohjaisissa materiaaleissa liittyy bitumin ja kiviaineksen väliseen tartuntaan. Tartuntaa heikentää tyypillisesti heikko tiivistyvyys. Kestävyydellä tarkoitetaan materiaalin kykyä vastustaa irtoamista, joka on yleisesti heikko kylmänä sekoitetuilla ja asennetuilla bitumimateriaaleilla. Liukkausvastuksen tulisi olla vastaava kuin paikattavalla päällysteellä. Tärkeitä ominaisuuksia ovat myös työstettävyys, johon yhtenä tekijänä vaikuttaa lämpötila ja sen vaikutus materiaalin kovettumisnopeuteen, sekä materiaalin varastoitavuus¹¹.

GEOPOLYMEERIMATERIAALIEN TOIMIVUUS KÄYTÄNNÖSSÄ

Tutkimuksessa sovellettiin koesuunnittelumenetelmää, jossa tarkoituksellisesti vaihdeltiin samanaikaisesti lähtöparametreja ja tarkasteltiin tuloksena saatuja vastinearvoja. Menetelmän avulla voitiin samanaikaisesti muuttaa useampia tekijöitä ja saada hyödyllisiä tuloksia sekä tietoa tekijöiden välisen vuorovaikutusten vaikutuksesta vastintulokseen. Koesuunnittelussa erotetaan yleisesti systeemi-, parametri- ja toleranssisuunnittelu. Systeemisuunnittelu tämän tutkimuksen yhteydessä tarkoitti materiaalikonseptin optimointia sisältäen valittujen parametrien optimoinnin suhteessa määritettyihin toiminnallisiin tekijöihin. Systeemisuunnitteluvaihe sisälsi uusien konseptien sekä tieteellisen ja teknologisen tiedon hyödyntämisen. Parametrisuunnitteluvaiheessa analysoitiin parametrien vaikutusta kokeellisesti ja tutkittiin eri materiaalikombinaatioiden toimivuutta. Parametrisuunnittelun lähtökohtaisena tavoitteena oli löytää optimaalinen materiaalikombinaatio.

Parametrisuunnittelussa erotetaan kontrollitekijöitä sekä kohinatekijöitä. Yhdistämällä optimaaliset kohinatekijöiden tasot on mahdollista saavuttaa tavoitellut vastinarvot. Yhdistämisen avulla voidaan tehokkaasti vähentää testien määrää, koska yksittäisten kohinatekijöiden vaikutusten arviointi ei ole ensisijainen tavoite. Kontrollitekijöitä ovat hallittavissa olevat tekijät kuten raaka-aineet, kun taas kohinatekijät ovat vaikeasti hallittavissa. Kohinatekijät aiheuttavat vaihtelua systeemissä, mutta niitä ei voi hallita tuotannon tai tuotteen käytön aikana. Kokeiden tavoitteena on tunnistaa kontrollitekijäasetukset, jotka minimoivat vaikeasti hallittavien muuttujien eli kohinatekijöiden aiheuttaman vaihtelun. Tässä tutkimuksessa kohinatekijöitä

¹¹ Maher, A.;Gucunski, N.;Yanko, W.;& Petsi, F. (2001). *Evaluation of Pothole Patching Materials, Final report*. Rutgers, The State University Piscataway: Dept. of civil & environmental Engineering, Center for Advanced Infrastructure & Transportation (CAIT).

olivat esimerkiksi paikkamassojen vaihtelevat käyttölämpötilat ja muut sääolosuhteet paikkauksen aikana ja sen jälkeen, liikenteen aiheuttaman rasituksen vaihtelu, työtekniset tekijät sekä paikattavan materiaalin ja rakenteen vaihtelu.

Robustisuudella tarkoitetaan niiden kontrollitekijöiden tunnistamista, joiden avulla voidaan vähentää vaihtelua materiaalissa minimoimalla kohinatekijöiden vaikutukset. Koesuunnittelussa manipuloidaan kohinatekijöitä vaihtelun saamiseksi, jolloin saatujen koetulosten perusteella voidaan tunnistaa ne optimaaliset kontrollitekijätasot, joilla saavutetaan robusti materiaali tai vastustus kohinatekijöiden vaikutuksille. Korkeammat signaali-kohinasuhteet (S/N) indikoivat kontrollitekijäasetuksia, joilla minimoidaan kohinatekijöiden vaikutukset.

Taivutuslujuus

Taivutuslujuus kuvaa materiaalin vetolujuutta. Materiaali, jolla on korkea vetolujuus kestää paremmin vetorasitusta, joka on yleisin sementtipohjaisten materiaalien halkeilun aiheuttaja. Kimmomoduli kuvaa materiaalin muodonmuutoskykyä kuormituksessa. Materiaali, jolla on korkea kimmomoduli, on jäykempi eikä mukaudu helposti alustan liikkeisiin tai sauma- ja halkeamakohtien rajakohdissa.

Sementtipohjaisten materiaalien yksi heikkous verrattuna bitumipohjaisiin materiaaleihin on niiden heikompi taivutuslujuus ja plastisuus. Sementtipohjaisten materiaalien taivutuslujuuden parantamiseen on tyypillisesti käytetty erilaisia kuituja. Kuitujen käytön tunnettuja haittapuolia on huonontuneet reologiset ominaisuudet erityisesti kuitujen määrän ollessa suuri. Geopolymeerimateriaaleissa kuituja on käytetty yleensä tarkoituksena parantaa plastisuutta, taivutuslujuutta ja vähentää halkeilua. Geopolymeeritutkimuksessa kuitujen käyttö on liittynyt usein korkeissa lämpötiloissa käytettäviin materiaaleihin. Geopolymeerimateriaaleissa voidaan käyttää kaikkia kuitutyyppisiä, jotka kestävät alkalisia ympäristöjä¹². Lasikuitujen on todettu joissakin tutkimuksissa toimivan heikosti geopolymeerimateriaaleissa, koska niiden ja geopolymeerimatriisin välinen tartunta liian yhtenäinen¹³. Hiilikuitu on kalliimpi kuin lasikuitu ja sen avulla on voitu lisätä tehokkaasti GP-materiaalien taivutuslujuutta. Muita yleisesti käytettyjä kuitutyyppisiä ovat olleet muun muassa PVA-, polypropyleeni- ja teräskuidut. Myös lisäämällä seosaineita,

¹² Sakulich, A. R. (2011). Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability. *Sustainable Cities and Society*, 195-210.

¹³ Hammell, J. A.; Balaguru, P.; & Lyon, R. E. (2000). Strength retention of fire resistant aluminosilicate-carbon composites under wet-dry conditions. *Engineering*, 107-111.

joilla on neulamainen rakenne kuten wollastoniitti, on voitu parantaa geopolymeerimateriaalien taivutuslujuutta¹⁴.

Kutistuminen

Sideainemateriaalin kutistuminen on tyypillinen halkeilun aiheuttaja erityisesti sementtipohjaisissa materiaaleissa. Halkeilu edesauttaa veden tunkeutumista materiaaliin ja lisää tiepaikkausten irtoamisriskiä. Betonitutkimusten perusteella kutistuminen erotellaan plastiseen, kemialliseen, termiseen ja kuivumiskutistumiseen¹⁵. Plastinen kutistuminen tapahtuu tuoreessa massassa veden haihtumisen seurauksena, jota edesauttavat korkea sideainemäärä, tuuli, auringonpaiste, kuiva ja lämmin ilma. Kemiallinen kutistuminen syntyy sementissä olevien kemiallisten reaktioiden seurauksena ja terminen kutistuma liittyy lämmön vapautumiseen sementin sitoutumisprosessin aikana. Kuivumisen aiheuttama kutistuminen on yleensä suurin. Kuivumiskutistuman suuruuteen vaikuttavat useat tekijät kuten sideainemäärä ja laatu, veden määrä, kiviaineksen jakauma, määrä ja laatu sekä ympäristön suhteellinen kosteus.

Geopolymeerimateriaalien kutistumisesta on vielä vähän tutkimustietoa. Alkaliaktivoitujen kuonien tyypillinen heikkous on niiden normaalisementtiä suurempi kutistuma, jonka on arvioitu olevan seurausta suuremmasta mesohuokosten määrästä¹⁶. Suuri kutistuma on merkittävä alkaliaktivoitujen kuonien käyttöä rajoittava tutkimushaaste. Alkaliaktivoitujen betonien kutistumisen pienentämiseksi on ehdotettu kyllästetyn kiviaineksen käyttöä, notkistimen ja huokostimen lisäämisestä sekä pientä määrää reaktiivista magnesiaa¹⁷ tai portlandsementtiä¹⁸. Korkea kuonamäärä lisää autogeenisen kutistumisen aiheuttamaa halkeilua, kuten myös silikaattipohjaisen aktivaattorin käyttö.

Kulutuskestävyys

Kulutuskestävyys indikoi Suomen ja muiden vastaavien olosuhteiden maissa materiaalin kykyä kestää nastarenkaiden aiheuttamaa rasitusta. Nastarengaskulutuskestävyyttä tutkittiin standardin SFS-EN 12697-16 menetelmä A:n mukaisesti ns. PRALL-testillä, joka on ensisijaisesti suunniteltu bitumipohjaisille

¹⁴ Wagh, A. S. (2004). *Chemically Bonded Phosphate Ceramics, Twenty-first century materials with diverse applications*. Elsevier.

¹⁵ Gilbert, R. I. (2002). Creep and shrinkage models for high strength concrete – proposal for inclusion in AS3600. *Australian Journal of Structural Engineering*, 95-106.

¹⁶ Collins, F.; & Sanjayan, J. G. (2000). Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 1401-1406.

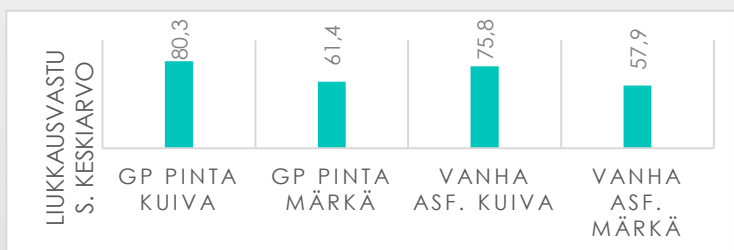
¹⁷ Jin, F.; Gu, K.; & Al-Tabbaa, A. (2014). Strength and drying shrinkage of reactive MgO modified alkali-activated slag paste. *Construction and Building Materials*, 395-404.

¹⁸ Rashad, A. M. (2013). A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag - a guide for civil engineer. *Construction and Building Materials*, 29-55.

asfalttibetoneille. Asfalttibetonien kulutuksenkestävyyteen vaikuttavat bitumin lisäksi kiviaineksen laatu ja suhteutus. Kumirouhetta on yleisesti käytetty asfaltin seosaineena ympäri maailmaa jo 1960-luvulta lähtien ja käytön odotetaan vielä kasvavan¹⁹ ²⁰. Kumirouheen on todettu vähentävän halkeilutaipumusta sekä urien muodostumista. Geopolymeerimateriaalien kulutuksenkestävyyden parantamisesta kuitujen avulla ei löytynyt aikaisempaa tutkimustietoa. Sen sijaan, betonikiviä ja betonin käyttöä siltarakenteissa käsittelevissä tutkimuksissa on todettu, että kuitujen avulla voidaan parantaa nastarengaskulutuksen kestävyttä.

Liukkausvastus

Liukkausvastus on tärkeä liikenneturvallisuutta indikoiva tekijä. Paikkakohdan liukkausvastuksen tulee vastata paikattavan pinnoitteen liukkausvastusta. Liukkauden tutkimisessa käytettiin heilurilaitetta (Portable skid-resistance tester). Liukkausvastus mitattiin sekä kuivalta että kostealta pinnalta. Vertailukohteena käytettiin 10 vuotta vanhaa asfalttia (Kuva 5).



KUVA 5. VASEMMALLA KAHDEN GP-MATERIAALIN LIUKKAUSVASTUSTEN KESKIARVO. OIKEALLA KUVA LIUKKAUSVASTUKSEN TUTKIMISESSA KÄYTETYSTÄ LAITTEESTA.

Kahden GP-materiaalin mitattujen liukkausvastusten tulosten keskiarvon perusteella GP-materiaalin liukkausvastus oli yhtä hyvä kuin vertailuarvona käytetyn vanhan asfaltin sekä kuivana että märkänä.

¹⁹ Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review. *Construction and Building Materials*, 863-881.

²⁰ Shuler, S. (2011). *Use of waste tires (crumb rubber) on Colorado highways*, Report no. CDOT-2011-4. Colorado Department of Transportation DTD Applied Research and Innovation Branch.

Sitoutumisaika ja lujuudenkehitys

Massan sitoutumisaika määritetään sitoutumisajan alun ja päättymisen mukaan. Sitoutumisajan alkamisen avulla määritetään ajankohta, jolloin massa kestää rasiusta kuten liikennettä. Sitoutumisajan alku on tärkeä paikkamateriaalin käsiteltävyyden määrittämisessä: massalla on oltava riittävä työaika, jotta se saadaan laitettua paikkakohtaan. Sitoutumisaika on tyypillisesti riippuvainen ympäristön ja materiaalien lämpötilasta ja siihen voidaan vaikuttaa lisäaineilla ja lämmityksellä.

Geopolymeerimateriaalien sitoutumisaikaan voidaan vaikuttaa materiaalin koostumusta optimoimalla. Silikaattiaktivaattoria käytettäessä sitoutumisaika on lyhempi verrattuna hydroksidi- ja karbonaattiaktivaattoriin. Korkeampi aktivaattorimäärä ja molaarisuus lyhentävät sitoutumisaikaa. Jauhettujen masuunikuonien partikkelikoko vaihtelee yleensä välillä 350-530 m²/kg ja sillä ei ole havaittu olevan selvää vaikutusta sitoutumisaikaan, mutta hienompi partikkelikoko (>530 m²/kg) ja korkeampi (CaO+MgO)/SiO₂ -suhde vaikuttavat sitoutumisaikaa lyhentävästi²¹. Lisäksi on todettu, että alkaliaktivoitujen sementtien sitoutumisaikaa voi säädellä käyttämällä seosaineena portlandsementtiä²², jolloin puhutaan hybridisideaineista. Aikaisempia tutkimuksia on kuitenkin tehty vain normaalilämpötiloissa tai sitä korkeammissa, mutta ei kylmissä olosuhteissa.

Puristuslujuuden kehitys

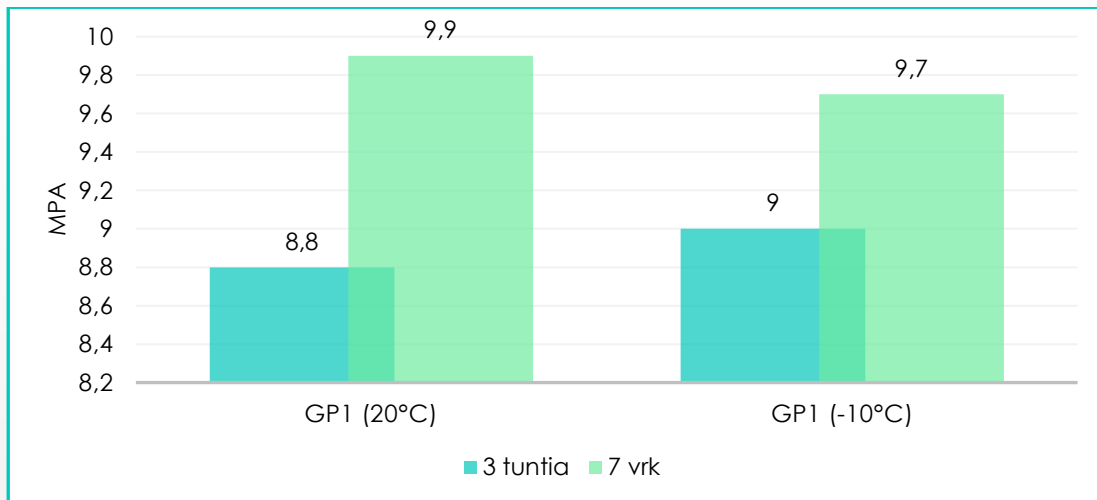
Puristuslujuuden kehitys on tärkeä indikaattori, joka kuvaa materiaalin kestävyttä liikenteen aiheuttaman rasituksen suhteen sekä materiaalin kestävyttä sauma- ja halkeamakohdissa. Tiereikien paikkausmasoilta vaaditaan nopeaa lujuudenkehitystä, mikä on haasteellista lämpötilan ollessa -5°C tai sen alle. Lujuudenkehityksen nopeudelle asetetut vaatimukset vaihtelevat. Paikkakorjausmassojen alkulujuus tulee arvioida viimeistään 24 tunnin kuluttua paikkauksesta. Esitetyt vaaditut arvot ovat esimerkiksi enintään 1 tunnin sitoutumisaika ja vähintään 3,5 MPa puristuslujuus 3 tunnin kuluessa²³.

Kuvassa 6 on esimerkki yhden tutkitun geopolymeerimateriaalin puristuslujuuden kehityksestä kahdessa eri lämpötilassa.

²¹ Pacheco-Torgal, F.;Labrincha, J.;Leonelli, A.;Palomo, A.;& Chindaprasit, P. (2015). *Handbook of Alkali- Activated Cement Mortars and Concretes*. Cambridge: Woodhead Publishing.

²² Pangdaeng, S.;Phoo-ngernkham, T.;Sata, V.;& Chindaprasit, P. (2014).) Influence of curing condition on the properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*, 269-274.

²³ Ipavec, A. (2012). *Deliverable No. 3 – Summary of existing standards, techniques, pothole repair materials and experience with them*. Slovenia: ZAG Slovenian National Building and civil Engineering Institute.



KUVA 6. PURISTUSLUJUUDEN KEHITYS ERI LÄMPÖILOISSA.

Kokeiden perusteella geopolymeeripaikkamassan alkulujuudenkehitys mitattuna 3 tunnin jälkeen oli lämpötilassa -10 °C parempi kuin normaalilämpötilassa 20°C, mikä tekee materiaalista hyvin soveltuvan käytettäväksi kylmissä olosuhteissa.

Tartuntalujuus

Alustan ja paikkamateriaalin välinen tartunta on tärkeä tekijä korjauksen kestävyuden kannalta. Hyvin tarttunut paikkamateriaali kestää paremmin halkeilua ja lohkeilua. Termodynaaminen yhteensopivuus korostuu erityisesti käytettäessä eri materiaaleja paikattavassa alustassa ja paikkamateriaalissa kuten korjattaessa bitumipintaa sementtipohjaisella materiaalilla tai päinvastoin. Tartuntalujuuden tutkimuksissa sovellettiin betonirakenteiden korjauksessa käytettyä tartuntavetokoetta (Kuva 7).



KUVA 7. GEOPOLYMEERIPAikkAMASSAN TARTUNTA VANHAAN ASFALTTIIN.

Säärasitus ja kloridien kestävyys

Pakkasen aiheuttamat vauriot esiintyvät yleisesti jäätymis-sulamissykliin aiheuttamana sisäisenä halkeiluna ja sitä seuraavana lujuuden menetyksenä. Jääditys-sulatusrasituskoel indikoi paikkamassojen kestävyyttä nopeissa lämpötilan muutoksissa ja jäätymis-sulamirasituksessa. Kokeen avulla voidaan ennakoida materiaalin herkkyttä hajota ilmaston vaikutuksesta. Vauriota arvioidaan tyypillisesti kimmomodulin ja lujuuden muutoksena.

Suolarasituksen vaikutus esiintyy materiaalin pintakerroksen rapautumisena, jota voidaan arvioida massahävikin perusteella. Molempiin tekijöihin vaikuttavat materiaalin vesipitoisuus ja huokosrakenne. Vaurioituminen tapahtuu tyypillisesti vedellä kyllästetyssä materiaalissa, jossa huokosverkosto ei riittävästi pysty ottamaan vastaan jään muodostumisen ja paisumisen aiheuttamia jännityksiä. Suola-pakkasrasituskoel ennakoi materiaalin kykyä kestää teillä käytettyjen jäätymistä estävien kemikaalien vaikutusta. Materiaalien rapautuminen testissä indikoi heikkoa kykyä kestää kemikaalien vaikutusta.

Geopolymeerimateriaalien sääräsituksen kestävyys

GP-materiaalien pakkasenkestävyyteen liittyvien tutkimusten tulokset vaihtelevat²⁴. Syynä vaihteleviin tuloksiin on arvioitu olevan eri geopolymeerimateriaalien koostumuksen ja jälkihoito-olosuhteiden mukaan vaihteleva mikrorakenne. Geopolymeerimateriaalien pakkasrasituksen kestävyttä voidaan parantaa optimoimalla huokosverkostoa tai puristuslujuutta²⁵. Optimaalisen huokosrakenteen muodostuminen on tärkeämpää materiaalin puristuslujuuden ollessa matalampi kuin korkealujuusbetoneilla²⁶. Korkealujuusbetonien hyvä pakkasenkestävyys liittyy yleensä niiden pieneen vesisementtisuhteeseen ja hyvään tiiviyteen. Tiiviyys paranee myös betonin kypsyessä eli pakkasvaurioituminen on todennäköisempää lujuudenkehityksen alkuvaiheessa. Betonin pakkasenkestävyyttutkimusten perusteella on todettu, että betonissa ei tapahdu sisäistä vaurioitumista betonin sisäisen suhteellisen kosteuden ollessa alle 85 %, vaikka lisähuokostinta ei olisi käytetty²⁷. Seosaineiden kuten lentotuhkan käyttö saattaa altistaa pakkasvaurioitumiselle, jos se hidastaa alkulujuuden kehitystä. Käytettäessä korkeaa vesisementtisuhdetta ($\geq 0,8$) lisähuokostimen käyttö ei riitä yksin hyvän pakkasenkestävyyden saavuttamiseen. Optimaalisella huokosrakenteella voidaan estää pakkasrasituksen aiheuttama vaurioituminen. Riittävän suojahuokosmäärän lisäksi huokosjaon tulee olla riittävän pieni. Huokosrakenteen optimoinnissa yleisin ja tehokkaimmaksi havaittu menetelmä on lisähuokostimen käyttö. Lisähuokostimen tehokkuudesta geopolymeerimateriaaleissa ei olla vielä täysin yksimielisiä. Tutkimustulokset vaihtelevat käytetyn huokostintyyppin mukaan. Joissakin tutkimuksissa on todettu, että huokostimen määrän tarve voi olla suurempi, mutta korkeampi määrä ei välttämättä takaa parempaa pakkasenkestävyyttä²⁸.

Geopolymeerimateriaalien pakkasenkestävyydestä on kokemuseräistä tutkimustietoa lähinnä alkaliaktivoitujen kuonabetonien osalta, joita on käytetty 1980-luvulla Venäjällä ja Ukrainassa. Alkaliaktivoitujen materiaalien on todettu yleisesti kestävän hyvin tai melko hyvin pakkasrasitusta²⁹. Pakkaskestävyys on ollut parempi käytettäessä tehokasta aktivaattoria kuten natriumsilikaattia ja reaktiivisia kiinteitä sideaineita, lisähuokostinta riittävän huokosrakenteen saavuttamiseksi, korkeaa puristuslujuutta (esim. >86 MPa), välttämällä

²⁴ Provis, J.; & van Daventer, J. S. (2009). *Geopolymers: structure, processing, properties*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

²⁵ Pacheco-Torgal, F.; Labrincha, J.; Leonelli, A.; Palomo, A.; & Chindaprasit, P. (2015). *Handbook of Alkali- Activated Cement Mortars and Concretes*. Cambridge: Woodhead Publishing.

²⁶ Gagne, R.; & Linger, L. (2007). *La Durabilite du beton, Deuxieme edition*. Presses de l'Ecole des Ponts et Chaussees.

²⁷ Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete, 4th and final ed.* Harlow: Longman Group.

²⁸ Byfors, K.; Klingsted, T.; Lehtone, V.; Pyy, H.; & Romben, L. (1989). Durability of concrete made with alkali-activated slag. *Third International Conference on the Use of Natural Pozzolans, Fly Ash, Blast Furnace Slag and Silica Fume in Concrete* (ss. 1429-1466). Trondheim: ACI.

²⁹ Pacheco-Torgal, F.; Labrincha, J.; Leonelli, A.; Palomo, A.; & Chindaprasit, P. (2015). *Handbook of Alkali- Activated Cement Mortars and Concretes*. Cambridge: Woodhead Publishing.

altistumista pakkasrasitukselle lujuudenkehityksen alkuvaiheessa ja käyttämällä kiviainesta sideaineen lisäksi. Alkaliaktivoitujen materiaalien pintarapautumisesta on vähän tutkimustietoa, mutta sen on arvioitu vastaavan tavallisen portlandsementin tasoa käytettäessä tarpeeksi tehokkaita aktivaattoreita.



KUVA 8. GEOPOLYMEERIKOEKAPPALEIDEN RAPAUTUMA SUOLA-PAKKASRASITUKSESSA.

Yllä oleva kuva esittää eri geopolymeeriseoksilla valmistettujen koekappaleiden rapautumaa suola-pakkasrasituksessa. Alle 100 g/m² rapautuma vastaa betoninormien mukaan 100 vuoden käyttöikää rasitusluokassa XF3 ja alle 650 g/m² vastaa vielä 50 vuoden käyttöikävaatimusta rasitusluokassa XF2. Tosiin sanoen kaikki testatut koekappaleet kestivät suolapakkasrasitusta hyvin. Tulosta voi pitää erinomaisena myös verrattuna asfalttipinnoitteiden suolapakkasrasitustestiin, jossa käytetään vain 10 syklin testausta. Tulokset vaihtelivat käytetyn sideaineen koostumuksen mukaan.

Huokosrakenne

Geopolymeerimateriaalit ovat huokoisia ja siten alttiita pakkasen aiheuttamalle vaurioitumiselle. Huokosten koko, tilavuus, muoto ja jakauma vaikuttavat veden käyttäytymiseen materiaalissa. Huokokset sisältävät geelihuokosia (0,5-2,5 nm), jotka ovat liian pieniä vesimolekyyleille ja suurempia kapillaarihuokosia, jotka

vaikuttavat veden ja muiden nesteiden läpäisevyyteen³⁰. On todettu, että yleisesti geopolymeerimateriaalien läpäisevyys on huomattavasti pienempi kuin tavallisen sementin. Geopolymeerimateriaalien huokosrakenteesta on vielä vähän tutkimustietoa, mutta tiedetään, että huokosrakenteeseen vaikuttavat useat eri tekijät kuten aktivaattorityyppi, nesteen määrä suhteessa kiinteään sideaineeseen, jälkihoito-olosuhteet (lämpötila, kosteus, aika) ja veden määrä. Silikaattipohjaiset aktivaattorit vähentävät geopolymeerien läpäisevyyttä enemmän kuin hydroksidipohjaiset. Alkaliaktivoituille kuonille on tyypillistä kutistumisesta aiheutuva mikrohalkeamien muodostuminen. Veden käyttö jälkihoidossa pienentää huokoskokoa ja vähentää mikrohalkeilua.

³⁰ Pacheco-Torgal, F.;Labrincha, J.;Leonelli, A.;Palomo, A.;& Chindaprasit, P. (2015). *Handbook of Alkali- Activated Cement Mortars and Concretes*. Cambridge: Woodhead Publishing.

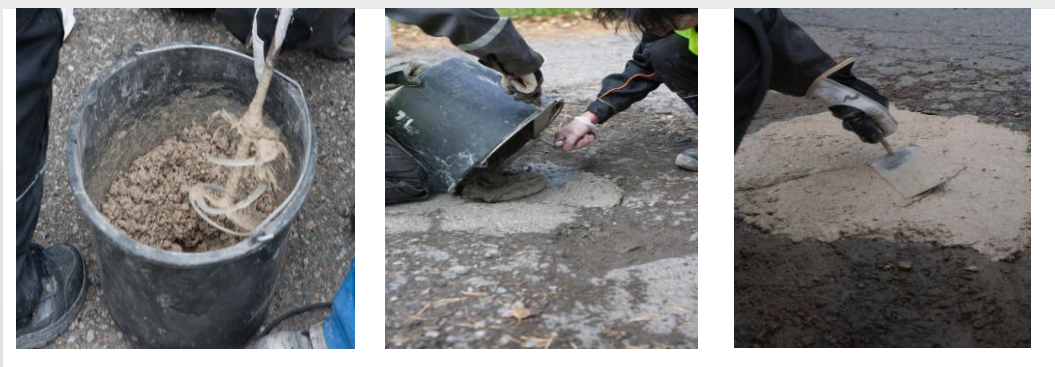
Pilottikokeet geopolymeerimateriaaleilla

Geopolymeerimateriaalien käyttäytymistä todellisissa olosuhteissa tutkittiin kolmessa eri kohteessa Kajaanin alueella syys-lokakuussa 2016 sekä maaliskuussa-huhtikuussa 2017. Kokeissa tutkittiin kymmeniä erilaisia geopolymeerimassoja.

Kohteet

1. Kirkkoaho, Kajaani
2. NCC:n varastoalue, Karankalahdentie, Kajaani
3. Keskusta, Nuaksentie, Kajaani

Kaikissa koekohteissa oli asfalttipäällyste. Paikkakohdat harjattiin puhtaaksi irtoaineksesta teräs- ja muoviharjoilla. Reunoja ei käsitelty. Massa sekoitettiin porekonevispilällä, kaadettiin paikkakohtaan ja tasoitettiin teräslastalla (Kuva 9). Kohteen 1 tarkoituksena oli seurata paikkamateriaalien kestävyyttä. Kohteissa 2 ja 3 tarkoituksena oli lisäksi tutkia paikkamateriaalien käyttäytymistä pinnoitteen jyräkäsittelyssä.



KUVA 9. PAIKKAMATERIAALIN SEKOITUS, LEVITYS JA TASAUS.

Kohde 1.

Kohde 1 sijaitsi taajama-alueella, jossa nopeusrajoitus oli 60 km/h. Lämpötila paikkaushetkellä oli noin 15°C ja sää puolipilvinen. Paikattavat kohdat olivat keskellä ajokaistaa olevia reikiä, joiden syvyys oli n. 50 mm ja halkaisija vaihteli välillä 10-50 cm (Kuva 10). Liikenne ohjattiin paikkaustyön ajan toiselle kaistalle.



KUVA 10. KIRKKAHONTIEN VAURIOKOHTIA.

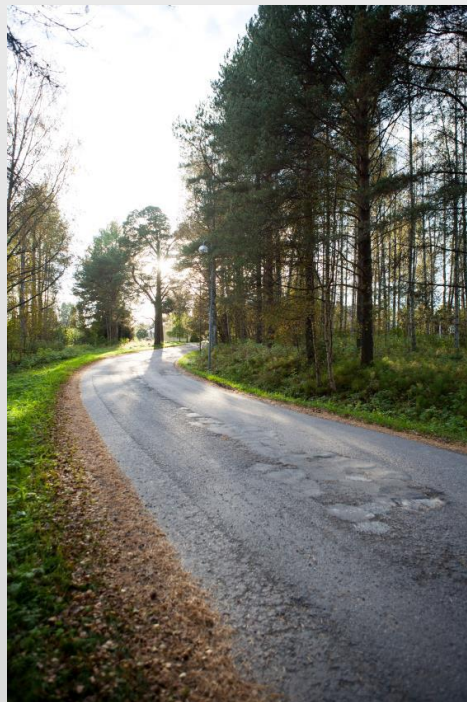
Kohteessa käytettiin 8 eri geopolymeerikoemassaa. Paikkauksen jälkeen materiaalit kovettuivat 10-30 min kuluessa. Ajokaista avattiin liikenteelle heti paikkauksen jälkeen. Kahteen paikkakohtaan muodostui renkaan aiheuttama

painauma ennen kuin paikkakohta oli kovettunut (Kuva 11), joka ei kuitenkaan heikentänyt paikkakohdan kestävyyttä.

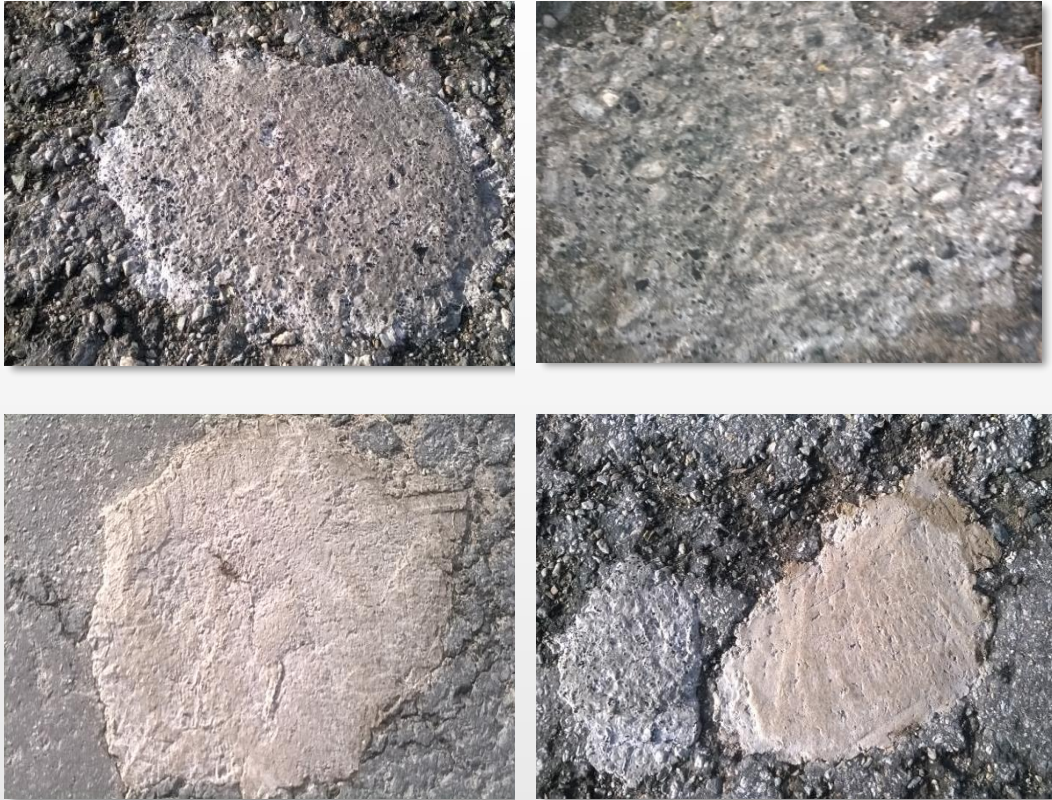


KUVA 11. KIRKKOAHONTIEN PAIKKAUKSIA.

Kenttäkokeiden seurannan tavoitteena oli arvioida paikkamateriaalien kestävyyttä. Seurannassa arvioitiin paikoissa mahdollisesti tapahtuvaa halkeilua, sideaineen erottumista kiviaineksesta, lohkeilua, reunojen irtoamista ja tartunnan heikentymistä. Ensimmäinen seurantakäynti tehtiin viikon kuluttua paikkauksesta, jolloin paikat olivat hyvin kiinni alustassaan (**Kuva 12**). Seuraava seurantakäynti tehtiin n. kuukauden kuluttua, jolloin yhdessä paikkakohdassa oli havaittavissa pieni halkeama (**Kuva 13**). Vuoden kuluttua paikkauksesta paikkakohdat olivat hyvin kiinni alustassa. Paikkojen pinnoissa oli paikoitellen vähäistä halkeilua ja kiviaine ja suuri kumirouhe oli tullut näkyviin. Aurasauton jälki näkyi samalla lailla koepaikoissa kuin muissa paikoissa, jotka oli tehty kaupallisella bitumipohjaisella pikapaikkausaineella (**Kuva 14**).



KUVA 12. KIRKKOAHONTIEN PAIKKAUKSIA VIIKON KULUTTUA PAIKKAUKSESTA.



KUVA 13. KIRKKOAHONTIEN PAIKKAUKSIA KUUKAUDEN KULUTTUA PAIKKAUKSESTA.



KUVA 14. KIRKKOAHONTIEN PAIKKAUKSIA VUODEN KULUTTUA PAIKKAUKSESTA.

Kohde 2

Kohde 2 oli varastoalue, jossa sijaitsee mm. asfalttiasema ja alueella on raskasta ajoneuvoliikennettä (Kuva 15). Alueella käytetään runsaasti suolausta. Varastoalueella käsitellään ja varastoidaan kiviainesta sekä valmistetaan asfalttia. Paikkauksia tehtiin kahdella eri geopolymeerimateriaalilla. Yksi paikkakohta oli n. 50 mm syvä ja 50 cm halkaisijaltaan oleva reikä. Muut vaurioalueet olivat pintavaurioita, joissa oli pinnoitteen runsasta halkeilua. Paikkakohdissa oli öljyjäämiä, jotka eivät lähteneet harjaamalla kokonaan pois. Paikkauksen aikana viereinen asfalttiasema oli toiminnassa ja alueella oli jatkuvaa raskasta liikennettä, jonka kulkua paikkakohtiin ei rajoitettu paikkauksen aikana tai sen jälkeen. Paikatut kohdat kovettuivat 10-20 min kuluessa. Yhteen paikkakohtaan muodostui renkaiden aiheuttamia painumajälkiä ennen massan kovettumista (Kuva 16). Viikon kuluttua paikkauksesta kaikki paikatut kohdat olivat hyvässä kunnossa (Kuva 17). Paikkakohdat olivat hyvin kiinni alustassa ja ehjiä vähäistä pintahalkeilua lukuun ottamatta vielä vuoden kuluttua paikkauksesta (Kuva 18).



KUVA 15. KOHDE 2 VARASTOALUE JA ASFALTTIASEMA.



KUVA 16. KOHDE 2 VAURIOKOHTIEN PAIKKAUKSIA HETI PAIKKAUKSEN JÄLKEEN.



KUVA 17. KOHDE 2 KONTROLLIKUVIA 1 VUOKKO PAIKKAUKSEN JÄLKEEN.



KUVA 18. PAIKKAKOHTIA VUODEN KULUTTUA PAIKKAUKSESTA.

Kohde 3

Kohde 3 oli kaupungin keskusta-alueella oleva kaksikaistainen tieosuus. Kohteessa nopeusrajoitus on 50 km/h ja tiellä on vilkas liikenne. Liikennemäärästä ja hoitoluokasta johtuen tiellä ei ole talviaikaan paikkakohtia suojaavaa jääpolannetta. Kohteessa oli paikkausta edeltävänä ja sen jälkeisenä yönä pakkasta. Paikkauksen aikana lämpötila oli n. 5°C. Sää oli korjauksen aikana aurinkoinen, mutta paikkakohdat olivat varjossa. Paikattavat kohdat olivat ajokaistan keskellä. Paikka-alueet olivat pintarikkoja, joiden alla oli vanha pinnoitekerros. Paikkakohtien syvyys oli alle 50 mm ja halkaisija keskimäärin 30 cm. Paikkauksia tehtiin kahdella eri geopolymeerimateriaalilla. Koemateriaaleissa oli aikaisemmista koekohteista poiketen käytetty pienempää raekokoa (0/5 mm) ja kiviaineksena OKTO-mursketta. Viileä ilma ja ohut paikkakerros hidastivat materiaalin kovettumista. Osa paikkamateriaaleista kovettui n. 30 min kuluessa ohuemmasta kerroksesta ja viileästä säästä huolimatta. Ajokaista oli suljettu liikenteeltä paikkaustyön aikana ja siihen asti kunnes kaikki paikkakohdat olivat kovettuneet (n. 1 tunti). Paikkakohdissa ei ollut havaittavaa vaurioitumista seuraavana päivänä, vaikka tiellä oli vilkas liikenne (Kuva 19). Paikkaukset säilyivät hyvässä kunnossa kesään asti, jolloin tiet pinnoitettiin uudelleen.



KUVA 19. KOHDE 3 KONTROLLI 1 VUOROKUSI PAIKKAUKSEN JÄLKEEN.

Yhteenveto

Projektissa tutkittiin kahden erityyppisen geopolymeerimateriaalin toimintaa päällystettyjen teiden paikkauksissa. Koemateriaalien raaka-aineina pyrittiin käyttämään paikallisia kierrätysmateriaaleja. Tarkoituksena oli huomioida ympäristöystävällisyys, raaka-aineiden hyvä saatavuus ja taloudellisuus.

Tehtyjen kokeiden perusteella geopolymeerimateriaalit toimivat hyvin eri säärasitusolosuhteissa. Projekti osoitti, että komposiittiteknologian ja monimuuttujamenetelmien avulla on mahdollista optimoida geopolymeerimassojen ominaisuuksia, siten että ne toimivat paikkaustarkoituksessa. Tehtyjen kokeiden ja tutkimusten tavoitteena on ollut toimia pohjana varsinaiselle kaupallistamiseen tähtäävälle tuotekehitykselle.