



MALLIPOHJAISEN TIIVISTÄMISEN PILOTTI

LIIKENNEVIRASTON AUTOMAATTISEN TIEDON TUOTANNON KOKEILU

Liik
enne
vira
sto

Mika Jaakkola
Oulu, 22.01.2018

TIIVISTELMÄ

Kokemukset GNSS -paikannukseen perustuvan tiiveyden seurannasta tuotantokäytössä ovat Suomessa vielä kohtuullisen vähäisiä. Aiemmissa piloteissa on havaittu hyötyjä, rakenteesta mitatut kantavuudet olleet vaatimusten mukaisia ja tiivistämiseen käytetty aika ja yliajokerrat ovat vähentyneet. Rakenteen tiiveyden ja kantavuuden todentaminen ja dokumentointi pelkästään itsemittaavan jyrän toiminnoilla ei ole nähty vielä riittävänä laadunvarmistukseen ja pistemäisiä kantavuusmittaukset edellytetään. Itsemittaavan jyrän tuottaman Compaction meter value -arvon (myöh. CMV-arvo) tuloksiin vaikuttavat monet tekijät kuten kaluston tyyppi ja paino, tiivistettävä materiaali ja alempien kerrosten jäykkyys. Lukuisten muuttujien vuoksi CMV -arvon kalibrointi suhteessa standardi kantavuusvaatimukseen on muuttuvissa tuotanto-olosuhteissa nähty työläänä toteuttaa, mikä on osaltaan hidastanut uuden teknologian käyttöönottoa. Samalla on havaittu tarve kokeilla ja kehittää yksinkertaisempia toimintatapoja. Tässä pilotissa lähdettiin kokeilemaan menetelmää, jossa hyödynnetään jyrän ohjausjärjestelmästä saatavaa CMV -arvon muutoksen seuranta sekä tiivistetyn alueen heikoimmista kohdista mitattuja levykuormituskoetuloksia.

Pilotissa testattiin mallipohjaisen tiivistämisen toimintatapaa, kuvattiin prosessin osavaiheet lähtötiedoista dokumentointiin ja tuotettiin järjestelmän käyttöohjeita jyrän kuljettajalle ja työnjohdolle. Piloteissa testattiin tiivistämistyön optimointia tuotanto-olosuhteissa sekä jyrän ohjausjärjestelmän tuottaman tiiveyden dokumentointi-aineiston sekä levykuormituskoemittausten tuloksien visualisointia selainpohjaisissa järjestelmissä.

Pilotissa havaittiin, että perinteiseen menetelmään verrattuna mallipohjainen tiivistystyön seuranta mahdollistaa toimivan tiivistämistyön optimoinnin ja aiempaa kattavamman dokumentoinnin. Jyrän kuljettajalle järjestelmä antaa koko ajan tietoa työstettävän rakenteen jäykkyydestä ja yliajokerroista ja tämä tieto tulee automaattisesti myös työnjohdolle. Mallipohjaisen tiivistämistyön dokumentoituva aineisto muodostuu jyrän ohjausjärjestelmän tuottamasta CMV -muutosta kuvaavan värikartasta sekä GNSS-paikannetuista levykuormituskokeiden tuloksista. Yhdessä nämä muodostavat laadunvarmistusaineiston rakenteen tiiveydestä ja kantavuudesta.

Tiivistämistyön tuottavuutta ja laatua on mahdollista parantaa mallipohjaista tiivistämismenetelmää hyödyntämällä. Tiivistystyömäärän optimointi on mahdollista kun yliajokertoja tehdään vain tarvittava määrä ja toisaalta laadunvarmistuksessa kattava tiiveyskartta korvaa osan pistekoemittauksista. Lisäarvoa saadaan työkoneseen RTK-GNSS-paikannuksen tuottamasta geometrisen toteuman mittausaineistosta.

Teknologia mahdollistaa tiivistämistyön optimoinnin ja kattavamman laadunvarmistuksen seurannan ja dokumentoinnin. Mallipohjaisen tiivistämisen laajempaa käyttöönottoa väyläurakoissa voisi edistää huomioimalla asia positiivisesti laaturipisteytyksessä.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	S
1.1 Tiivistämistyön laadunvalvonta GNSS -jyrällä	5
1.2 Pilottikohde ja laatuvaatimukset	6
1.3 Testauksen toteutus	7
1.4 Tavoitteet	9
2 MP TIIVISTÄMISEN TESTAUS JA PROSESSI	
2.1 Testaussuunnitelma	10
2.2 Mallipohjaisen tiivistämisen prosessi	12
3 MP TIIVISTÄMISTYÖN LAADUNVARMISTUSMENETELMÄT	
3.1 CMV -muutoksen seuranta	16
3.2 Jyrän yliajokertojen seuranta	17
3.3 Geometrisen toteuman seuranta	20
3.4 Levykuormituskokeiden kytkentä	22
4 JOHTOPÄÄTÖKSET	
4.1 Mallipohjaisen tiivistämistyön hyödyt	24
4.2 Ehdotus jatkotoimiksi	24

LÄHTEET

LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

CMV (Compaction meter value)	Jyrämittarin tuottama maarakenteen jäykkyyttä kuvaava arvo, joka kasvaa tiivistystyön edetessä. Perustuu täryjyrän valssin kiihtyvyyssanturiin.
CMV-muutos	Jyrän päällekkäisten ja peräkkäisten ajokertojen CMV-arvojen muutos [%]. Muutosarvon pienentyessä maarakenteen tiiveys kasvaa.
GNSS-jyvä	Koneohjausjärjestelmällä varusteltu työkone, jossa hyödynnetään satelliittipaikannusta, toteutusmalleja ja anturijärjestelmää tiivistämistyön ohjaukseen ja laatutiedon dokumentointiin.
RTK-GNSS	Real Time Kinematik Global Navigation Satellite System. Tarkan GNSS-paikannuksen menetelmä, jossa paikallinen GNSS-tukiasema lähettää tarkennustietoa liikkuvalle mittaussyksikölle.
E2/E1	Tiiviyssuhde arvo on levykuormituskokeessa mitattujen kantavuusarvojen suhde, joka kuvaa rakenteen tiivistymistä kuormituskertojen välillä.
Tiiviysaste	Suhdeluku [%], joka kuvaa rakenne-kerroksessa saavutettua tiheyttä suhteessa proctor-kokeessa saavutettuun max kuiva-irtotiheyteen.

1 JOHDANTO

1.1 Tiivistämistyön laadunvalvonta GNSS-jyrällä

GNSS -paikannusta hyödyntävän jyrän ohjausjärjestelmän käytön tavoitteena on, että tieto tiivistämistyön onnistumisesta saadaan sekä kuljettajan että työnjohdon tietoon työn aikana. Jatkuvalle tiiveyden mittausmenetelmällä halutaan kohdentaa tiivistystyö halutulle alueelle ja tuottaa kattavampi toteuma-aineisto pistemäisten laadunvalvontamittausten sijaan. Aiemmissa piloteissa GNSS -paikannukseen perustuvan tiiveyden seurannasta on saatu hyötyjä. Jyrän koneohjausjärjestelmän karttanäytön osoittaessa vihreää ovat rakenteesta myöhemmin mitatut kantavuudet olleet vaatimusten mukaisia ja tiivistämiseen käytetty aika ja yliajokerrat ovat vähentyneet.

Itsemittavien jyrrien tiivistämistyön laadun mittaus perustuu jyrän valssin kiihtyvyyden mittaukseen ja sen perusteella laskettavaan maarakenteen jäykkyyttä kuvaavan arvon tulostamiseen. Eri jyrävalmistajien järjestelmissä tiivistämistyön seuranta perustuu kiihtyvyysanturien, ajovastuksen ja GNSS paikannuksen tuottaman tiedon jalostamiseen ja tulosten havainnolliseen esittämiseen koneohjausjärjestelmän karttanäytöllä. Kun paikannusjärjestelmä toimii RTK-GNSS tarkkuudella, voidaan järjestelmää hyödyntää myös tiivistetyn maarakenteen korkeustarkkuuden mittauksessa.

Eri valmistajien (Dynapac, Bomac, Hamm, Cat) mittalaitteiden käyttämät laskentamenetelmät eroavat toisistaan. Ne tuottavat toisistaan poikkeavia maarakenteen jäykkyyttä kuvaavia suureita (CMV, Omega Evib, k_b) sekä lukuarvoja. Mittausjärjestelmille ja niiden tuottamille suureille on ominaista, että ne kasvavat tiivistystyön edetessä ja maan jäykkyyden kasvaessa, mistä voidaan päätellä tiivistymisen astetta. Jyrän tiiveysmittarin käyttäminen ainoana tiiveyden mittausmenetelmänä on ongelmallista, koska tuloksiin vaikuttavat monet tekijät kuten kaluston tyyppi ja paino, tiivistettävä materiaali ja alempien kerrosten jäykkyys. Tämän vuoksi maarakenteen tiiveyden ja kantavuuden todentamiseen tarvitaan myös pistemäinen mittausmenetelmä.

Jyrrien tiiveysmittareiden tuloksia on kalibroitu määrävälein tehtävillä pistemäisillä mittauksilla. Sitomattomille materiaaleille toimivana kalibrintimittausmenetelmänä pidetään levykuormituskoetta ja sen tuloksena saatavaa E₂ -kantavuusarvoa. Jyrän mittalaitteen tuottamaa absoluuttisen CMV-tiiveysarvon kalibrintia on tehty aiemmissa piloteissa (esim. Riippa Eskola RU2, 2014), mutta ongelmaksi koettiin kokeillun Trimble CSC 900 jyrän tuottamien CMV-arvojen ja levykuormitusmittaustulosten vertailtavuus tuotanto-olosuhteissa. Lukuisten muuttujien vuoksi kalibrinti työmaalla on nähty monimutkaisena ja on havaittu tarve kokeilla ja kehittää yksinkertaisempia toimintatapoja. CMV-arvon muutoksen seuranta päällekkäisten ajokertojen välillä nähdään yksinkertaisempaan tapaan toimia. Tämä menetelmä on käytössä esimerkiksi Norjassa ja sen toimivuutta tiiveydenseurannassa kokeiltiin tässä pilotissa.



Kuva 1. Trimble CSC 900 jyrän tiiveydenseurantajärjestelmästä on kokemusta Riippa-Eskola RU2 projektilla toteutetussa pilotissa.

1.2 Pilottikohde ja laatuvaatimukset

Pilotin suorituspaikaksi valittiin Destian urakoiman Vt14 Laitaatsalmen silta -projektin maarakennustyöt. Tiivistämistyötä tehtiin GNSS-paikannetulla jyrällä vuonna 2017 kesäkuun ja lokakuun välisen ajan. Kohteina olivat siltaan liittyvät väylän pengerrakenteet sekä kantava kerros.

Moreenipenkereiden rakentamisen osalta työohjeen sisältö oli seuraava:

Tekniset vaatimukset ovat InfraRYL 11810 'Maapenkereet' mukaiset. Maapenkereen tiiviyttä tarkkaillaan sekä kokeellisesti että työmenetelmätarkkailuna, johon sisältyy kerrospaksuuksien, jyräyskertojen ja pengermateriaalin laadunvalvonta. Jos penkereen tiiviyttä tarkkaillaan muilla menetelmillä, tulee osoittaa niillä saatavien tulosten riippuvuussuhde levykuormituskokeen tuloksiin.

Moreenipenkereessä käytettävän moreenin edellytetään olevan siHkMr, jonka kelpoisuusluokka on H4 ja vesipitoisuus 7...8 %. Rakeisuuden ja vesipitoisuuden edellytetään olevan vähintään samaa laatutasoa tai parempaa kuin paikallisen Naistenlahdenkadun moreenialueen kiviaineksen.

Moreenipenger rakennetaan kerroksittain tiivistäen. Kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus ja tiivistysmäärät valitaan InfraRYL taulukon 18110:T3 mukaan. Tiivistyksellä pyritään siihen, että jälkitiivistyminen jäisi alle 0,5 % pengerkorkeudesta eli korkeimmillaan 6 m penkereen osalta jälkitiivistyminen jäisi alle 30 mm. Ohjeellisena proctor-tiiveysastetavoitteena pidetään 90...92% ja moreenipenkereen pinnan tavoitekantavuutena levykuormituskokeella mitattuna 35 MPa.

Moreenipenkereen tiivistämiseen vaadittava yliajokertojen määrä on yksitoista, kun kerrospaksuus on 0,8 m ja käytetään yhden valssin 13 t täryjyrää.

Lisäksi InfraRYL:in tierakenteen valmiin penkereen levykuormitusmoduulien E2(MPa) vaatimukset ovat vähintään 90 MPa tai 100 MPa riippuen tsv:n etäisyydestä.

Kantavan kerroksen rakentaminen

Tekniset vaatimukset ovat InfraRYL 21300 'Kantavat kerrokset' mukaiset.

Kantavan kerroksen tiivistysmäärät valitaan InfraRYL taulukon 18110:T3 mukaan. Kun kantavan kerroksen tiivistämiseen käytetään yhden valssin 13 t täryjyriä, tiivistyksessä vaadittava yliajokertojen määrä on 7...8 kun kerrospaksuus on 0,25 m.

Siltaan liittyvien väylien kantavien kerrosten kantavuustavoite on 160 MPa.

InfraRYL taulukon 21310:T4 mukaan levykuormituslaitteella sitomattoman kantavan kerroksen pinnalta mitatun tiiviyssuhteen vaatimus on kun kantavuusvaatimus on 160...174 MPa, tulee tiiviyssuhteen E2/E1 olla pienempi tai yhtä suuri kuin 2,2.

1.3 Testauksen toteutus

Tämä pilotti on saanut rahoitusta ja toteutettu Liikenneviraston automaattisen tiedon tuotannon kokeilu – ohjelmassa. Pilotin ohjausryhmässä toimivat Katri Eskola ja Laura Pennanen Liikennevirastosta, Simo Kesti Rambollista ja Mika Jaakkola Destiasta.

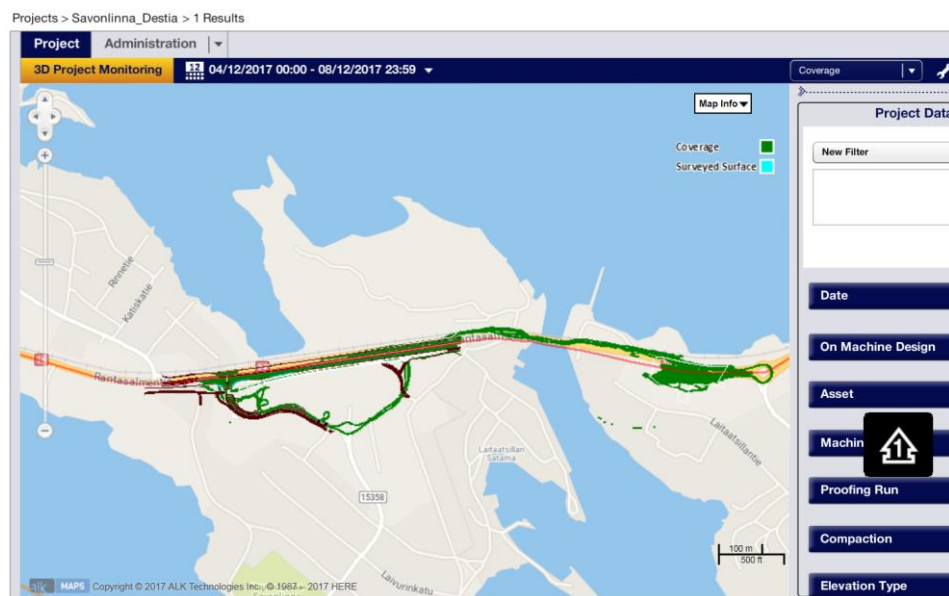
Mallipohjaisen tiivistämisen testaus toteutettiin Destian urakoimalla Valtatien 14 parantaminen välillä Aholahdentie - Savontie työmaalla vuoden 2017 kesä-lokakuun välisenä aikana. Testauksen suunnitteluun ja toteutukseen osallistuivat Destia Oy:n Mika Jaakkola, Juho Kolehmainen ja Jukka Ruotsalainen ja sekä SITECH Finlandin asiantuntijana Janne Paitsola.

Tiivistämiseen käytettiin kolmetoista tonnia painavaa Hamm -merkkistä valssijyriä. Jyrä oli Destian vuokraama työkone, joka oli teknisesti hyvässä kunnossa, ja sen kuljettamisesta vastasi Destian kokeneet kuljettajat. Jyriin asennettiin tiivistämistyön laadunvalvontajärjestelmä Trimble CCS 900. Ohjausjärjestelmä vuokrattiin SITECH Finlandilta, joka vastasi myös järjestelmän asennuksesta ja käyttöönottoperehdytyksestä.



Kuva 2. Pilotissa käytettiin Hamm valssiyrää ja siihen asennettua Trimble CCS 900 tiivistystyön ohjausjärjestelmää.

Tiivistystyön seuranta toimistolla tehtiin Trimblen selainpohjaisella Visionlink –työkalulla. Järjestelmällä seurattiin työaikaista tiivistystyön toteumaa ja laatua ja tiivistämistyön tulokset dokumentoituivat järjestelmän tietokantaan.



Kuva 3. Visionlink työkonien seurantajärjestelmä toimii tiedonsiirtolinkkinä jyrän ohjausjärjestelmään ja sen kautta tarkastellaan työkonelta tulevaa tiiveys- ja geometriatietoa.

1.4 Tavoitteet

Tiivistystyön tavoitteena on täyttää rakennettavan kohteen laatuvaatimukset tiiveyden ja kantavuuden osalta. Rakentajan tavoitteena on toteuttaa homogeeninen lopputuote käyttäen tehokasta tuotantomenetelmää ja sujuvaa työnaikaista laadun dokumentointia.

Tämän kokeilun tavoitteena on tuottaa tietoa ja lisätä osaamista tiivistämistyön laadunvarmistuksesta GNSS-paikannetulla jyrällä. Pilotissa oli tavoitteena selvittää GNSS-jyrän käyttökelpoisuutta tierakenteen tiiveyden seurannassa sekä kehittää toimintatapaa järjestelmän käyttöönoton helpottamiseksi ja laadunvarmistusaineiston tuottamiseksi. Lisäksi tavoitteena oli kuvata pilotissa kokeillun mallipohjaisen tiivistämismenetelmän prosessi sekä tuoda esiin testatun menetelmän hyötyjä ja haasteita.

2 MP TIIVISTÄMISEN TESTAUS JA PROSESSI

2.1 Testaussuunnitelma

Pilotissa oli suunnitelmana testata seuraavia tiivistämistyön laadunvarmistamismenetelmiä:

CMV-muutoksen seuranta GNSS -jyrällä ja pistemäiset mittaukset:

Suunnitelmana oli testata CMV-muutoksen seurantaa sekä moreenipenkereen että kantavan kerroksen tiivistämistyön seurannassa. CMV-mittauksen katsotaan soveltuvan parhaiten kivennäismaalajeille ja kalliomurskemateriaaleille. Levykuormituskoetta oli suunnitelmana käyttää kantavuuden pistemäisessä seurannassa todentamaan GNSS-jyrällä tehdyn tiivistystyön laatua.

Lähtökohtana on käyttää jyrän tiiveyden seurantajärjestelmää ohjaamaan tiivistystyötä siten, että rakenteen toteutusmallin rajaama kohde tiivistetään kattavasti koko alueeltaan ja tiivistämistä jatketaan niin kauan, että jyrämittarin CMV-muutoksen raja-arvoksi asetettu tavoite täyttyy. Tarkoitus on, että järjestelmä osoittaa kuljettajalle karttanäytöllä tiivistetyn alueen ja värikartta visualisoi tiiveyden muutoksen suuruutta peräkkäisten yliajokertojen välillä. Tiivistämistyö jaetaan tuotantotyöhön ja mittaustyöhön. Tuotantotyössä käytetään ensimmäisillä ajokerroilla pitkää iskun pituutta (amplitudi) ja 20 Hz taajuutta (frekvenssi). Kun maan tiiviys kasvaa iskupituutta pienennetään ja taajuutta kasvatetaan. Mittausajossa iskunpituutta ja taajuutta ei saa muuttaa ja mittaus tehdään jyrän liikkeessä eteenpäin aina samoilla asetusarvoilla.

Pilotissa CMV-muutoksen raja-arvoksi asetettiin ensin 10%, joka on laitevalmistajan ohjeistuksen mukaan kalliomurskemateriaaleille. Moreenipenkereen tiivistämisessä kokeiltiin 15% CMV -muutoksen raja-arvoa.

Työn aikana tiivistystä jatketaan niin kauan kuin suhteellinen tiiveysarvon (CMV) peräkkäisten samasta kohtaa tehtyjen ajojen välillä kasvaa vähemmän kuin asetuksena annettu arvo.

Tiivistettävältä alueelta otetaan varmistusmittaukset (esim. levykuormituskokeen kantavuusarvo E2 ja/tai tiiviyssuhde E2/E1) kahdesta tiiviyskartan mukaan heikoimmin tiivistyneestä kohdasta 5000 m² pinta-alaa kohden. Tiivistystyön katsotaan riittävän kun varmistusmittaukset täyttävät rakenneosakohtaiset tilaajan asettamat kantavuusvaatimukset

Jyräyskertojen määrän seuranta:

Jyrän ohjausjärjestelmän GNSS-paikannusta käytetään yliajokertojen seurantaan ja tiivistetyn alueen dokumentointiin. Tässä lähtökohtana InfraRYL laatuvaatimuksissa (taulukko 18110) kuvattu yliajokertojen määrä, mikä perustuu jyräkalustoon, materiaalin ominaisuuksiin ja

tiivistettävän kerroksen paksuuteen. Yliajokertojen seurantamenetelmää oli suunnitelmissa käyttää sellaisissa kohteissa, joissa täryjyrän CMV-muutoksen seuranta ei voida soveltaa kuten runsaasti koheesioainesta sisältävien maalajien tiivistämisessä. Lisäksi suunnitelmana oli kokeilla tiivistystyön yhteydessä tehtävää jatkuvaa tarkkaa GNSS-paikannuksen tuottamaa geometristen toteumatiedon tallentamista ja hyödyntämistä toteuman ja korkeustarkkuuden seurannassa.

2.2 Mallipohjaisen tiivistämisen prosessi

Pilotin kokemuksiin perustuen tässä on kuvattu mallipohjaisen tiivistämisen toimintatapaa, jota kehitetään teknologian ja osaamisen edetessä.

2.2.1 Rakentajan lähtötiedot tiivistämiseen

- Väylän rakennussuunnitelmaan, toteutusaikataulun, työselitykseen ja InfraRYL laatuvaatimuksiin perehtyminen
- Selvitetään rakenteiden materiaalitiedot ja kerrospaksuudet
- Selvitetään kantavuus ja tiiviysuhde -vaatimukset rakenneosittain
- Selvitetään GNSS-jyrällä tiivistettävien rakenteiden toteutusmallien tarpeet ja lähtötiedot mallintamisen tekemiseksi
- Selvitetään käytettävän jyrän tyyppi, paino ja käyttöön tulevan ohjausjärjestelmän tiedot
- Lähtötietojen kokoamisesta vastaavat työmaapäällikkö ja mittauspäällikkö

2.2.2 Toteutusmallit tiivistämisen tarpeisiin

- Tehdään toteutusmallit tiivistettävistä rakenneosista
- Penkereiden toteutusmalleissa huomioidaan tiivistystyön kerrospaksuusvaatimukset
- Pintamallit tai taiveviivamallit tiivistettävien alueiden rajaukseen karttanäytöllä
- Pintamallit korkeustarkkuuden seuranta varten
- Toteutusmallien tekemisestä vastaa työmaan mittauspäällikkö

2.2.3 Pilvipalvelu ja yhteydet jyrän/tiiveyden seurantaan

- Projektin perustaminen selainpohjaiseen seuranta- ja dokumentointijärjestelmään (Visionlink tai vastaava)
- Työkoneen ohjausjärjestelmän (CCS900 tai vastaava) linkittäminen projektille
- Koneohjausmallien tallentaminen Visionlinkin kantaan ja siirto työkoneen käyttöön
- Visionlink-työkalun asetusten asettaminen vaatimusten mukaan; CMV muutoksen raja-arvo/CMV-tavoitearvo, optimi yliajokertojen määrä (InfraRYL laatuvaatimuksista)
- Käyttöoikeuksien antamisesta ja työkalun perusasetuksista vastaa laitevalmistajan tekninen tuki ja projektin asetusten oikeellisuudesta vastaa työmaapäällikkö

2.2.4 Työkoneen ohjausjärjestelmän asetukset

- Järjestelmä mitoitetaan, kalibroidaan ja tarkistetaan asennuksen yhteydessä
- Asennuksen yhteydessä varmistetaan myös järjestelmän linkitys pilveen ja Visionlink-palveluun
- Työmaakohtaisesti valitaan RTK-mittausta varten joko verkkopohjainen korjaus (mobiili) tai tukiasemalta tuleva korjaus (radio/mobiili). Paikannusjärjestelmän käyttöön liittyvistä asetuksista vastaa työmaan mittauspäällikkö.

2.2.5 Kuljettajan käyttöopastus

- Järjestelmän XYZ-tarkkuus todennetaan vertailemalla valssin vasenta tai oikeaa reunaa tunnettuihin koordinaatteihin, esim. kiintopisteeseen säännöllisesti
- Järjestelmän käyttöliittymän perustoiminnot:
 - Pilvipalvelun käyttö
 - Käytettävän toteutusmallin valinta
 - Pistemäisen toteumatiedon tallennus (ID ja koodaus)
 - Työnäkymien valinta ja käyttö: Tasonäkymä, leikkausnäkyvät, yliajokerrat, CMV, CMV-muutos ja leikkaus/täyttö
 - Kenttäraportti
- Tarvittavien toleranssien asetus: Yliajokerrat, CMV, CMV-muutos, leikkaus/täyttö
- Tuotantoajon ohjeistus:
 - Aluksi pitkä isku (amplitudi) tehokkuuden takia. Materiaalin tiivistyessä lyhyempi isku. Ajosuunta vapaa, eteen- tai taaksepäin
- Mittausajon ohjeistus:
 - Ajosuunta vain eteenpäin mahdollisimman vakiolla nopeudella, amplitudilla ja taajuudella täry päällä
- Tiiveyden kehittymisen seuranta käytön aikana
- Alueen kattava tiivistäminen ja ylimääräisen tiivistystyön välttäminen
- Siirtyminen seuraavalle alueelle, kun CMV-muutos < määritelty raja-arvo (%). CMV-muutos -näkyvässä väri on tällöin vihreä
- Kuljettajan opastuksesta vastaa laitevalmistajan tekninen tuki asennuksen yhteydessä ja tuotannon aikana urakoitsijan tekninen tukihenkilö/työmaapäällikkö

2.2.6 Tiivistäminen CMV muutoksen seurantaan käyttäen

- Tuotantoajossa käytetään ensin yliajokertojen seuranta-asetusta
 - Vähennetään yliajojen ohjeellisesta määrästä kaksi ja ajetaan sen mukaan
 - Tiivistämistyötä tehdään sekä eteen ja takapäin ajettaessa, amplitudi ja nopeus valittavissa tehokkuuden maksimoimiseksi
- Mittausajoon vaihdetaan näkyväksi CMV muutos
 - Ajo vain eteenpäin, vakionopeus, –amplitudi ja -taajuus
 - Ajetaan vähintään kaksi peräkkäistä yliajoa ja seurataan CMV-muutosta

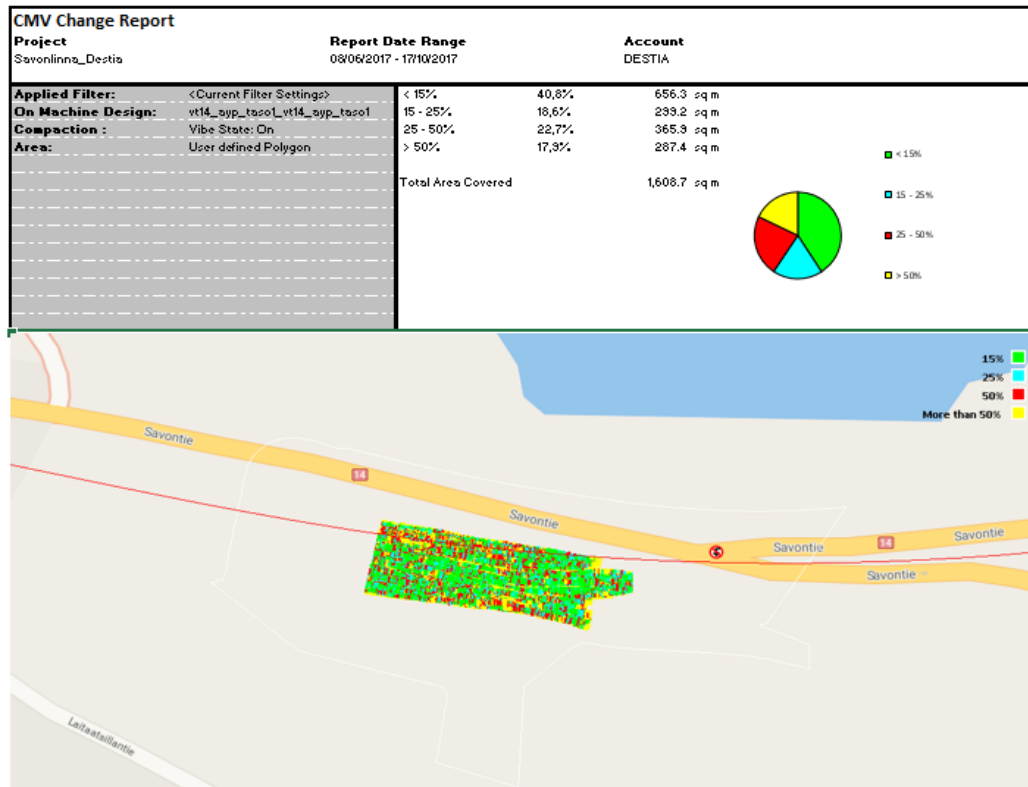
- Jatketaan tiivistämistä, kunnes järjestelmän osoittama CMV-muutosarvo alittaa määritellyn tavoitearvon
- Tuotannon ja mittauksen optimointi:
 - Tuotantoajon osalta yliajokertojen määrää voi tarvittaessa pienentää
 - Mittausajossa on mahdollista muuttaa CMV-muutoksen tavoitearvoa suuremmaksi, mikäli referenssimittaukset ovat selkeästi yli tavoitteen
- Tarkastellaan työmaalla jyrän generoimaa kenttäraporttia, josta selviää heikoimpien alueiden ja pienimpien yliajokertojen sijainnit. Raportti on saatavilla myös pilvipalvelusta.
- Tiivistämistyön laadunvarmistuksesta vastaa työmaapäällikkö ja työn toteutuksesta jyrän kuljettaja

2.2.7 Tiiveyden dokumentointi

- Yhdistetään jyrän koneohjausjärjestelmän tuottama jatkuva tiiveyskartoitus ja levykuormituskokeiden tulokset
- Jyrä koneohjausjärjestelmä tuottaa/tallentaa CMV –muutoksen karttaesityksen
- Tiiveystieto tallentuu GNSS- jyrästä automaattisesti langattoman datayhteyden kautta palvelimelle
- Tiiveyskartta tulostetaan toimistolla selainpohjaisesta työkalusta rakennekerroksittain noin 5000 m² tieosuuksina
- Tehdään varmistusmittaukset kartan mukaan heikoimmin tiivistyneiltä alueilta, kaksi mittausta/5000 m² tiivistetty alue
- Geotekninen suunnittelija ja/tai tilaajan edustaja voivat halutessaan päättää varmistusmittausten paikat
- Levykuormituskokeet paikannetaan työn aikana RTK-GNSS mittalaitteella, mittauksen XYZ-paikkatiedot tai paalulukema/sivumitta liitetään levykuormituskokeen tulosraporttiin ja tulokset siirretään tarkasteltavaksi Infrakit työkaluun
- Laadunvarmistusaineiston dokumentoinnista vastaa työmaapäällikkö ja mittauspäällikkö

2.2.8 Tiivistämisen työnaikainen laadunvarmistusaineisto

- CMV -muutoksen kuvaava värikartta, joka sisältää selitteen, tiedostot nimetään nimikkeistön mukaan toteumamalliohjeiden mukaan, PDF muodossa
- Levykuormituskoemittausten tulokset sisältäen; Kantavuusarvot (E₁ ja E₂, E₂/E₁), aika, paikka (xyz) sekä laitteen ja mittaajan tiedot
- Aineisto viedään selainpohjaiseen karttatyökaluun tarkastelua varten, tiiveyskartat ja varmistusmittaukset esitetään työmaan koordinaatistossa



Kuva 4. CMV -muutosta kuvaava värikartta moreenipenkereen tiivistämisestä.

MITTAUSRAPORTTI: E2

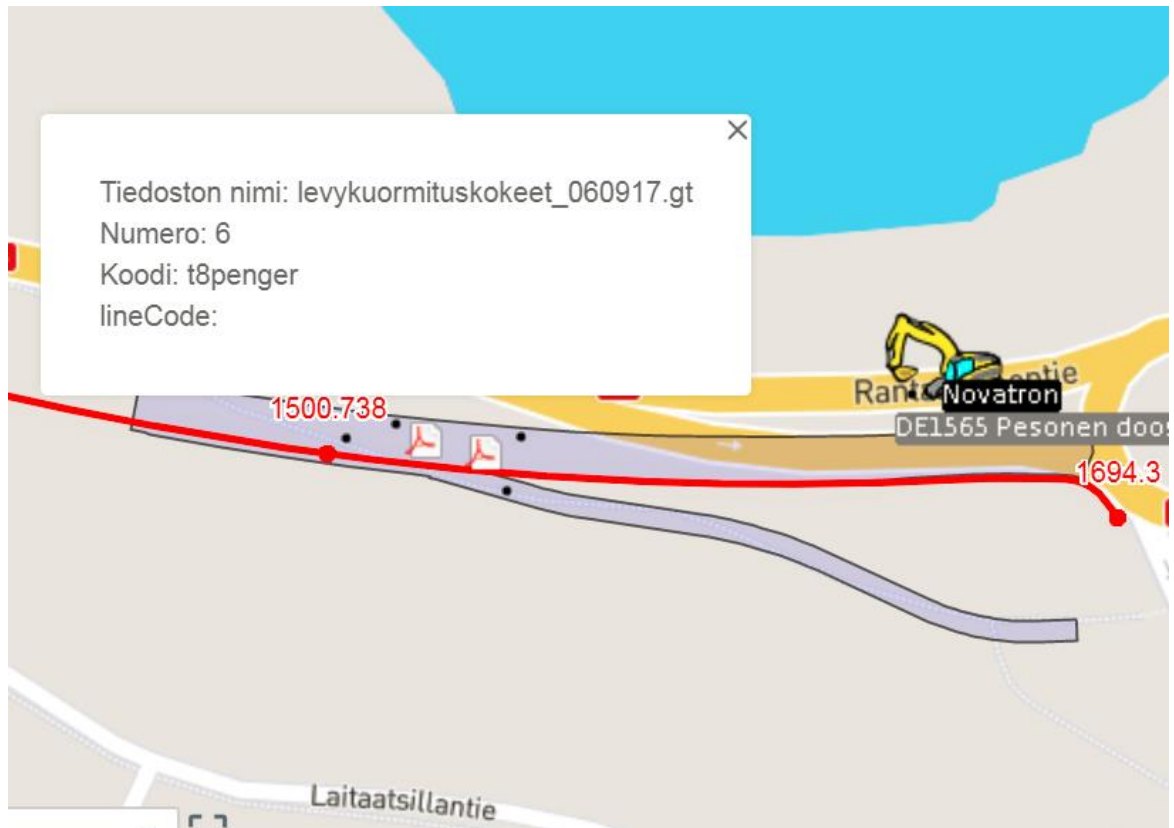
Tien Nimi: Lataatsalmi S T8 penger_2
Tie Numero: 0
Tie Osa Numero: 000
Tiedosto: Lataatsalmi S T8 penger_2.FWD

Tulostettu 08.9.2017
Päivä: 06.9.2017
Mittaja: ro
Ohjearvo: 35
Ajorata: 0

ET	Kantavuus E2	Alitus
4	112	
5	113	
6	97	
7	112	
8	98	

Lukumäärä	Pienin tulos	Suurin tulos	Keskiarvo	Keskihajonta
5	97,00	113,00	106,40	7,28

Kuva 5. Moreenipenkereen levykuormituskokeiden mittausraportti.

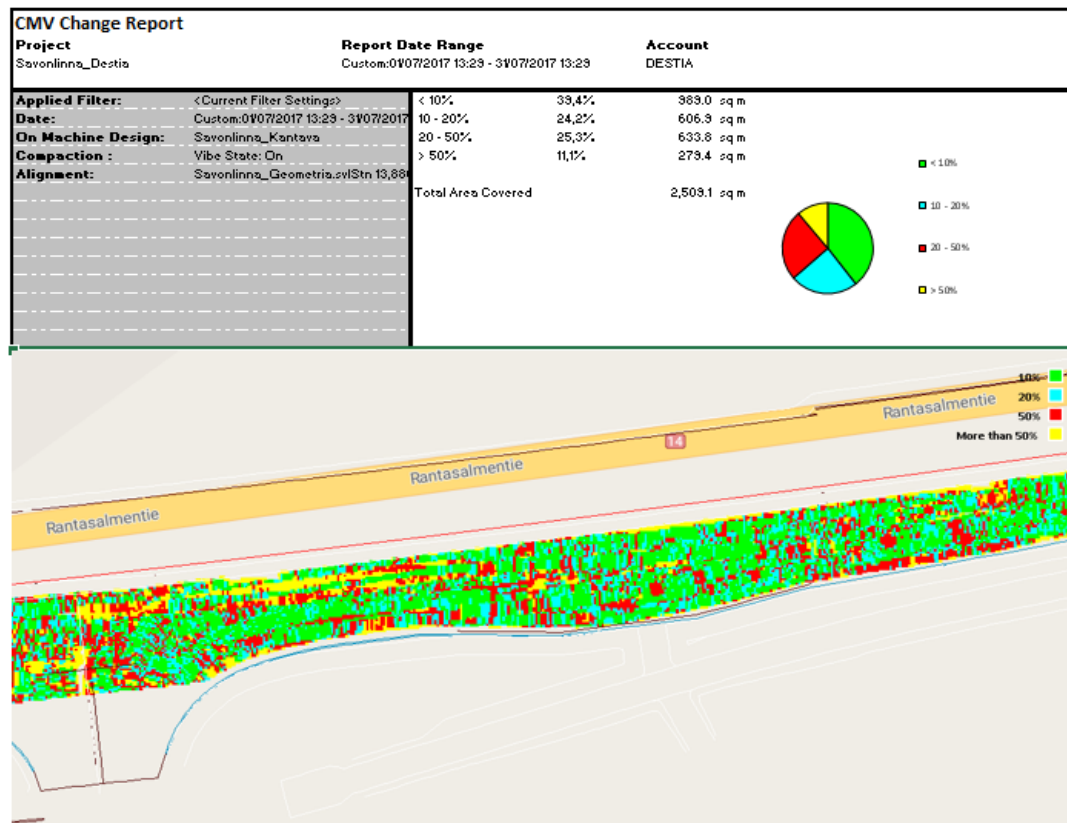


Kuva 6. Esimerkki tiivistystyön laadunvarmistusaineiston esittämisestä Infrakit alustalla. Levykuormituskokeiden paikkatiedot tuodaan karttapohjalle ja niihin linkitetään levykuormituskokeen tulokset PDF-dokumenttina, joita voidaan tarkastella samassa käyttöliittymässä.

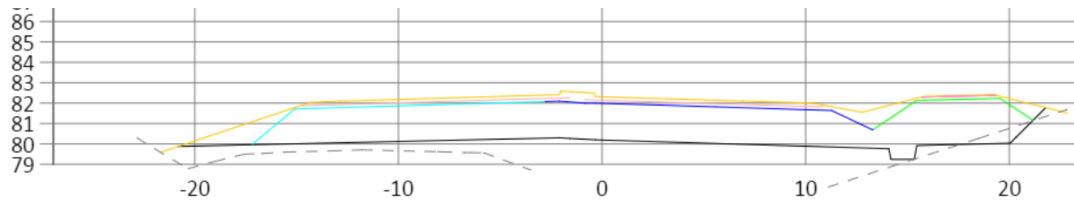
3 MP TIIVISTYSTYÖN LAADUNVARMISTUSMENETELMÄT

3.1 CMV-muutoksen seuranta

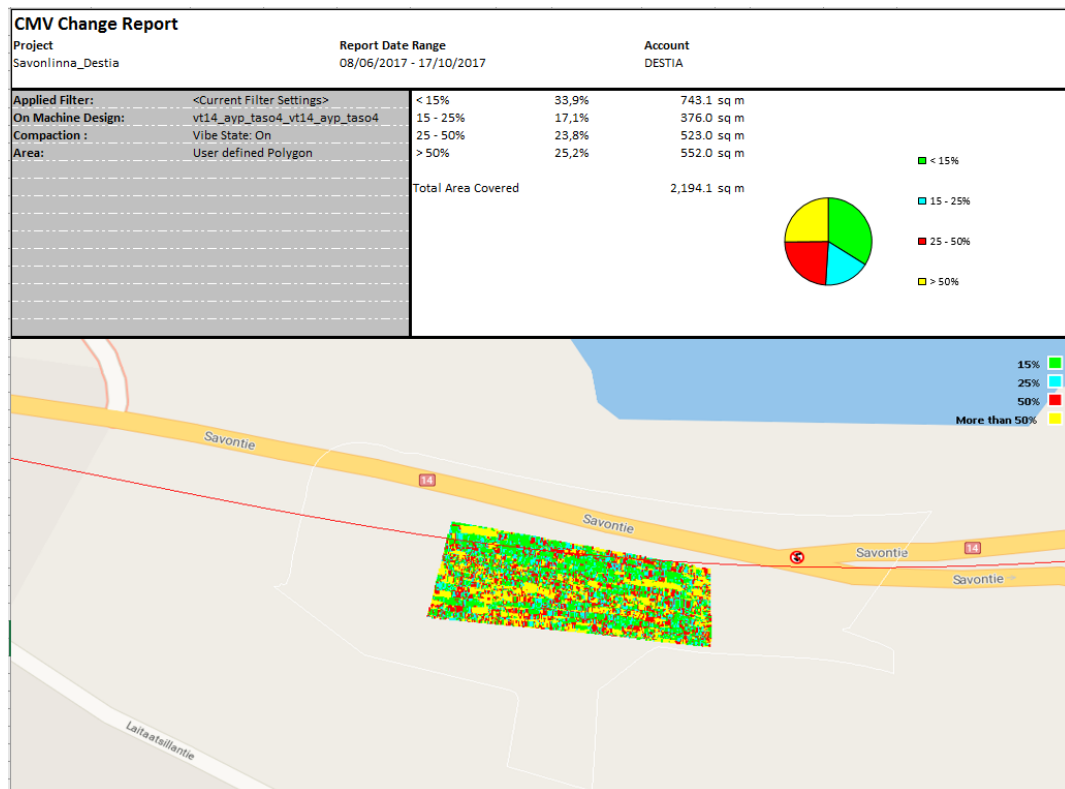
CMV -muutoksen seuranta perustuu peräkkäisten ajokertojen aikana tallennettujen CMV -arvojen muutoksen vertailuun. Tällä kuvataan tiivistymisen suhteellista muutosta ajokertojen välillä ja arvo pienenee kun rakenteen jäykkyys kasvaa tiivistymisen myötä. Kantavan kerroksen tiivistämistyön laadunvarmistuksen osalta testattiin 5%, 10% ja 15% raja-arvoja. Pilotin aikana havaittiin 10% raja-arvon toimivan kalliomurskeen tiivistämisessä. Kun jyrän kuljettajan näytöllä tiivistettävän alueen väri muuttuu pääosin vihreäksi ja/tai näyttöön tulostuva CMV -muutosarvo saavuttaa asetetun 10% raja-arvon ja tiivistäminen voidaan kohteessa lopettaa ja siirtyä seuraavalle alueelle.



Kuva 7. Vt 14 Laitaatsalmi tieosuuden kantava kerros plv 13 950 – 14 250 CMV -muutoskartta tulostettuna Visionlink -työkalusta. Jyrän kuljettajalla on tiivistämistyön aikana sama karttanäkymä.



Kuva 8. Sillan lähestymispenkereet rakennettiin kerroksittain moreenista. Moreenin tiivistämisessä CMV muutoksen raja-arvona käytettiin 15% arvoa.

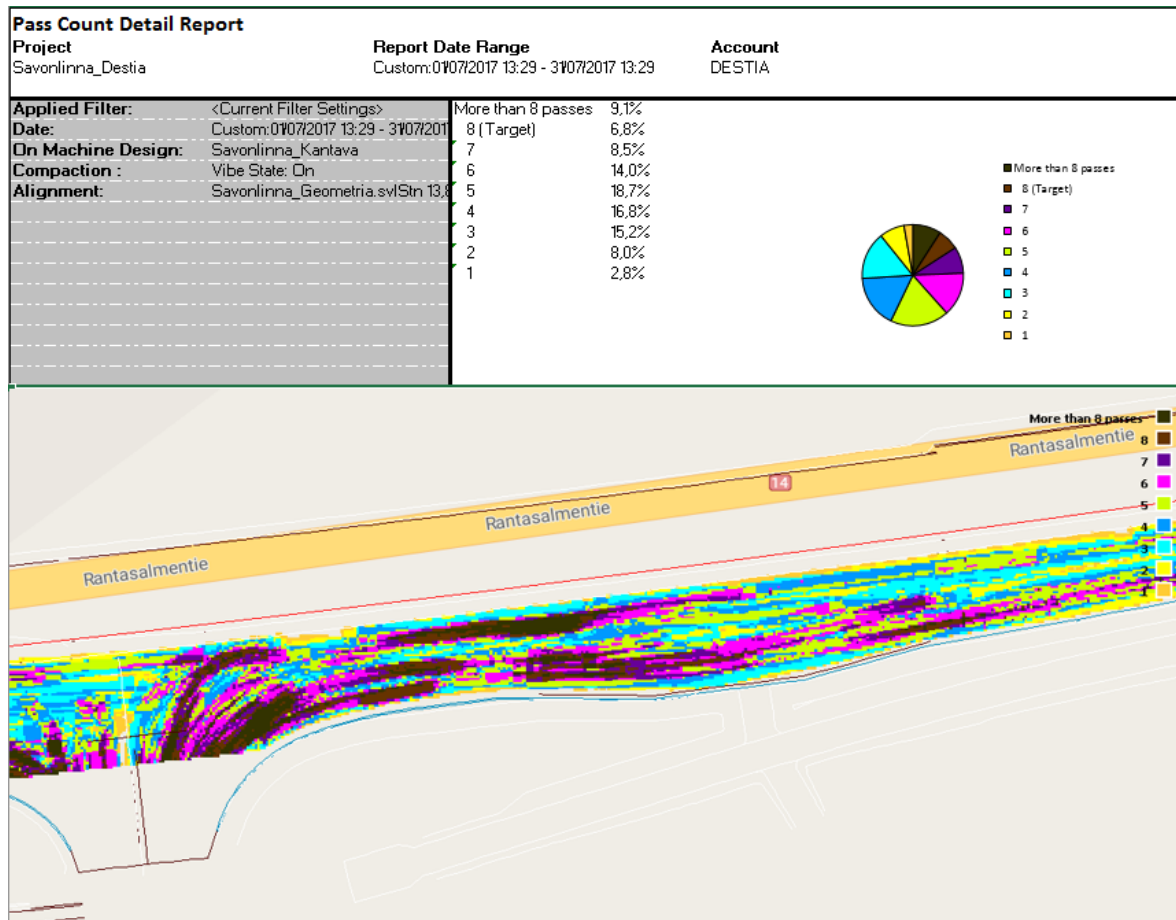


Kuva 9. Vt 14 Laitaatsalmen siltapenkereen tiivistämistä tehtiin noin 1 m kerroksissa.

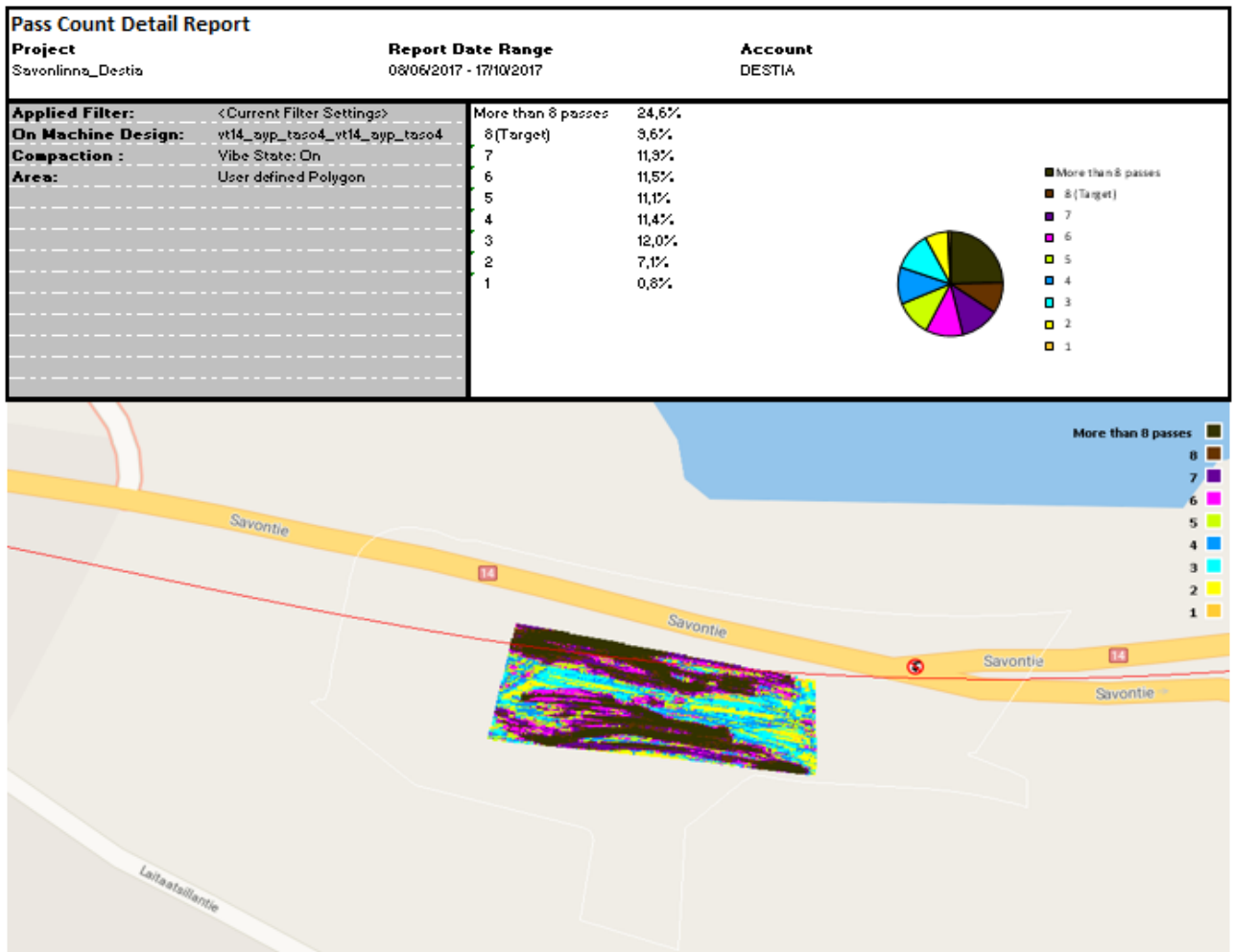
3.2 Jyrän yliajokertojen seuranta

Tiivistystyön seuranta jyrän yliajokertojen määrän perusteella toimii RTK-GNSS-paikannukseen perustuen. Jyrän kuljettaja näkee käyttöliittymän värikartalta työkonen ajoreitin ja yliajokertojen määrän reaaliaikaisesti. Testissä käytettiin tiivistämistä ohjaavana menetelmänä pääosin CMV-muutoksen seuranta, mutta jyrän yliajokerrat tallentuivat samalla automaattisesti tietokantaan. Työnjohdon käytössä olevalla Visionlink -työkalun toiminnoilla voitiin seurata tiivistämistyön etenemistä ja suodattaa esimerkiksi ne jyrän yliajokertojen määrät kun tärytoiminto on ollut käytössä. InfraRYL ohjeen mukaan 0,25 m kantava kerros vaatii kahdeksan yliajokertaa ja 0,8 m moreenikerros 11 yliajokertaa 13 t täryjyrällä. Järjestelmän dokumentoimaa yliajokertojen määrää verrataan vaadittuun

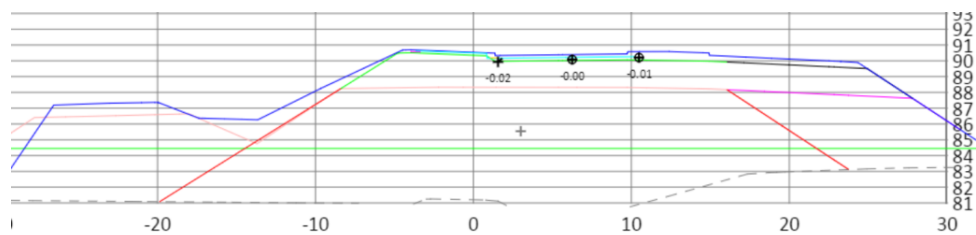
määrään ja se täyttyessä jyräys lopetetaan. Tämä toimii vaihtoehtoisena menetelmänä jos CMV-mittaus ei sovellu käytettäväksi eli silloin kun tärytoimintoa ei voi käyttää maalajin häiriintymisen, valssin pomppimisen tai muun syyn vuoksi.



Kuva 10. Jyrän yliajokertojen määrä värikarttaesityksenä kantavan kerroksen tiivistämisessä.



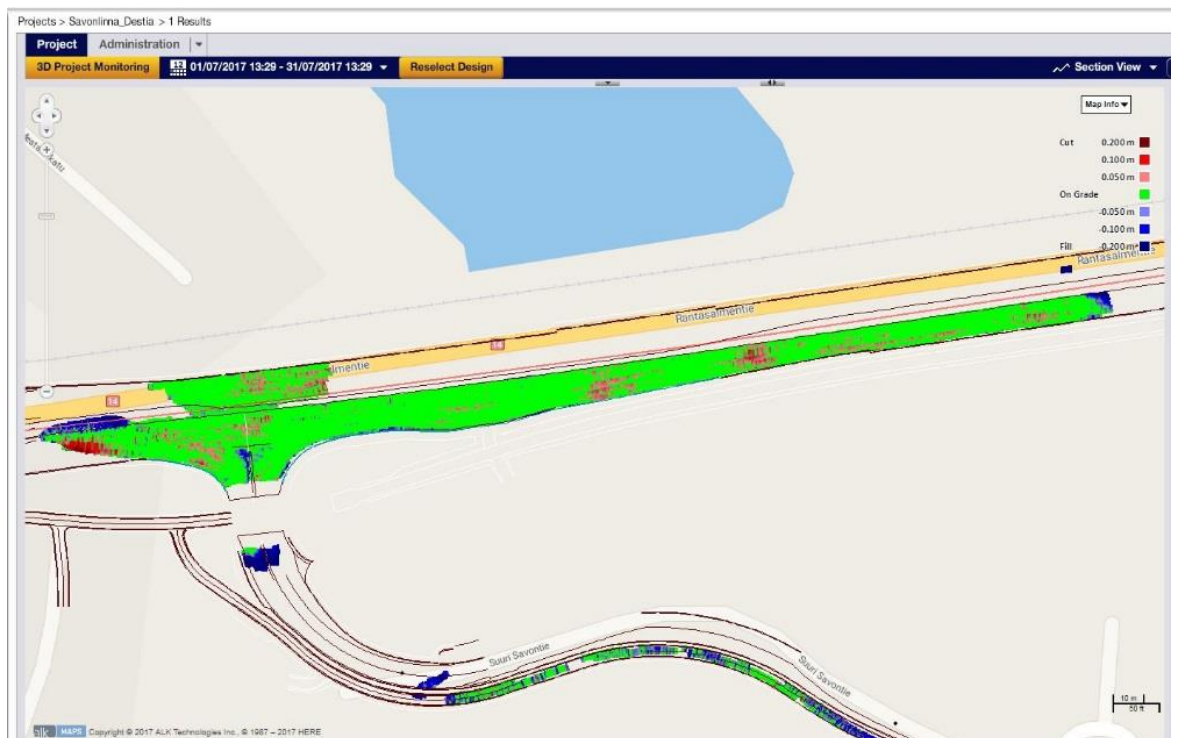
Kuva 11. Moreenipenkereen tiivistämistyön seurantakartta, jossa yliajokertojen määrä on kuvattu väreillä. Kuva on tulostettu Visionlink työkalusta.



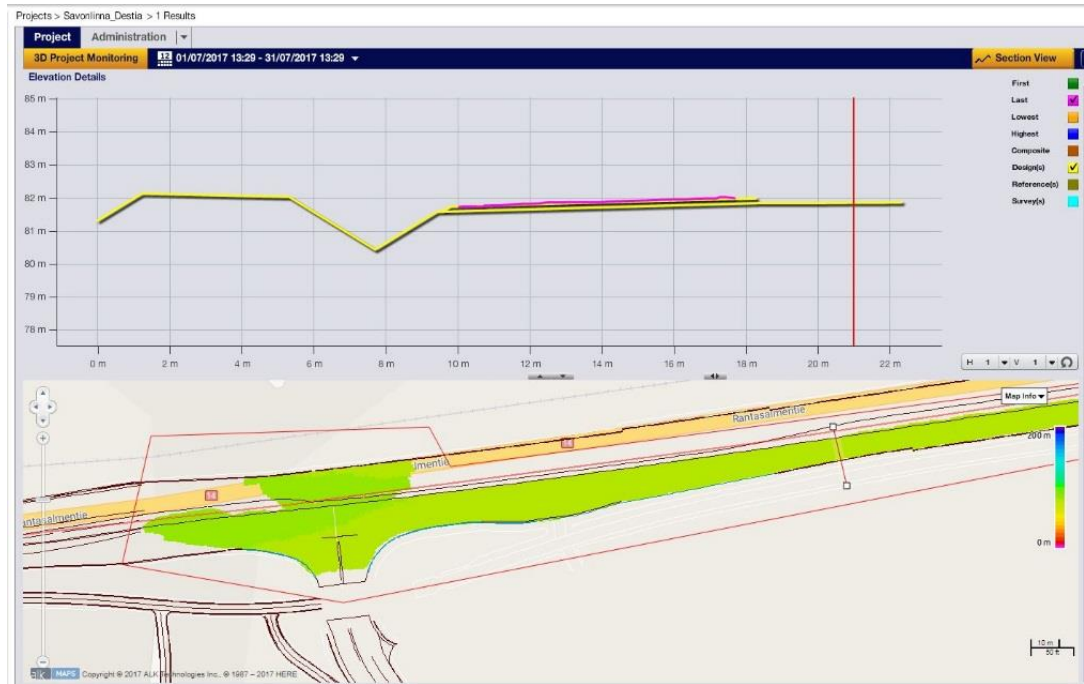
Kuva 12. Tiivistetyn moreenipenkereen poikkileikkaus, jossa näkyy edellisessä kuvassa tiivistystyön kohteena oleva ja vihreällä merkitty tiivistysmalli 4 korkotasolla 84,5 m.

3.3 Geometrisen toteuman seuranta

Pilotissa kokeiltiin tiivistämistyön aikana tehtävää jatkuvaa geometrisen toteumatiedon dokumentointia. Järjestelmä tallentaa RTK-GNNS tarkkuudella tiivistämistyön aikaista jyrän valssiin alapinnan paikkatietoa. Visonlink -työkalulla rakenteen yläpinnan korkeustietoa voidaan tarkastella ja verrata toleransseihin jo työn aikana. Kuvassa 13 vihreä alue on järjestelmän mukaan rakennettu tässä määrätyn ± 5 cm toleranssin sisälle, lukuun ottamatta punaisina kuvautuvia kohtia jotka ovat toleranssin ylittäviä alueita. Koska tässä mittaus tehtiin liikkeessä jyräyksen aikana, paikannuksen tarkkuuden hajonta on hieman suurempi kuin paikallaan tehtävässä toteumamittauksessa. Työkoneen liikkeen ja jyräyksen aikana tehtävä menetelmä soveltuu työn aikaiseen korkeustason tarkkailuun ja työn ohjaukseen, mutta valmiin rakenteen toteumamittaukset tulee tehdä jyrän ollessa paikallaan erillisinä mittauspisteinä.



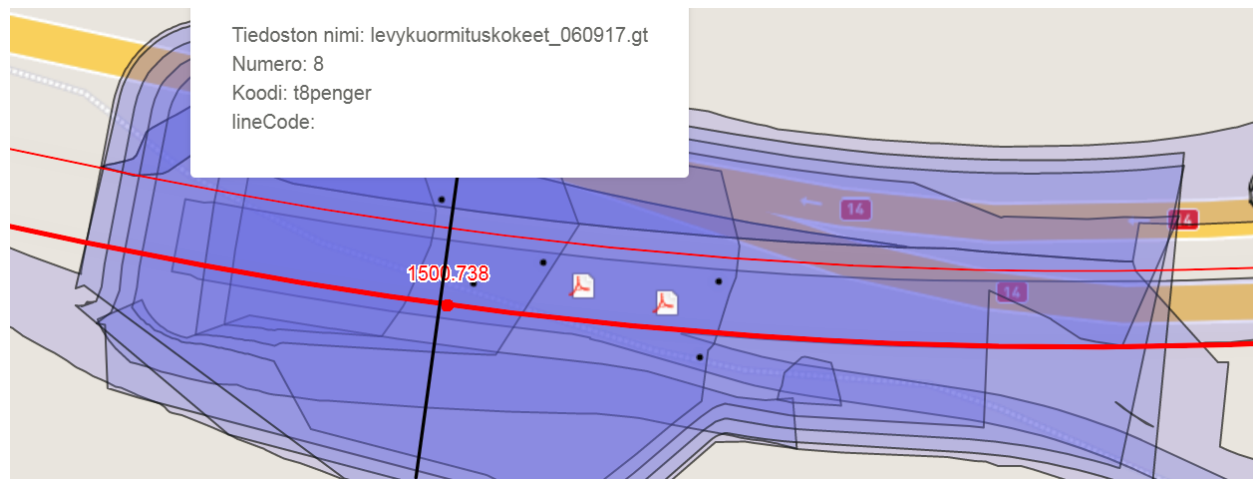
Kuva 13. Jyräyksen yhteydessä RTK-GNSS-paikannuksella tallennettu kantavan kerroksen toteumakartta.



Kuva 14. Jyräyksen aikana tallennetun datan perusteella tulostettu toteumakartta ja poikkileikkaus.

3.4 Levykuormituskokeiden kytkentä

Levykuormituskokeiden sijainnit mitattiin RTK-GNSS mittauksena testin yhteydessä. Pistemäiset paikkatiedot luettiin sisään Infrakit projektille ja mittausraportit linkitettiin koordinaattipisteisiin. Tämän tuloksena levykuormituskokeiden sijaintia ja niiden tuloksia voitiin tarkastella Infrakit käyttöliittymässä toteutusmalliaineiston ohessa. E2 kantavuusarvot ylittivät selvästi kantavuuden tavoitearvon 35 MPa, keskiarvon ollessa 106,4 MPa.



Kuva 15. Vt 14 Laitaatsalmen sillan itäpuolen siltapenkereen alueella tehtyjen levykuormituskokeiden sijainti Infrakitin kartalla.

MITTAUSRAPORTTI: E2

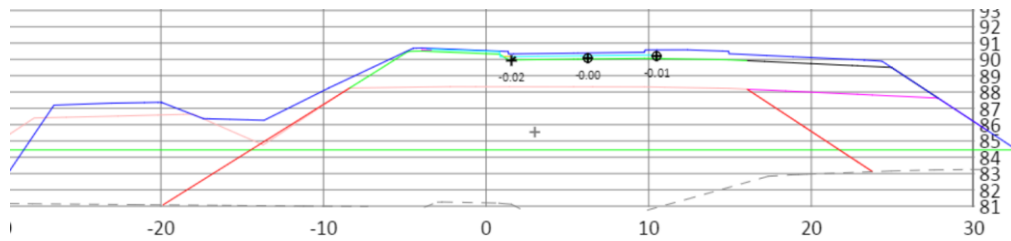
Tien Nimi: Lataatsalmi S T8 penger_2
 Tie Numero: 0
 Tie Osa Numero: 000
 Tiedosto: Lataatsalmi S T8 penger_2.FWD

Tulostettu 08.9.2017
 Päivä: 06.9.2017
 Mittaaja: ro
 Ohjearvo: 35
 Ajoin: 0

ET	Kantavuus E2	Alitus
4	112	
5	113	
6	97	
7	112	
8	98	

Lukumäärä	Pienin tulos	Suurin tulos	Keskiarvo	Keskihajonta
5	97,00	113,00	106,40	7,28

Kuva 16. Vt 14 Laitaatsalmen sillan itäpuolen siltapenkereen levykuormituskokeiden tulokset.



Kuva 17. Vt 14 Laitaatsalmen sillan itäpuolen siltapenkereen poikkileikkaus.

Kantavan kerroksen osalta levykuormituskokeita tehtiin 50 m välein väylien molemmilta kaistoilta. Mittausten tuloksena saadut E2 kantavuusarvot ylittivät selkeästi vaaditun 160 MPa tavoitearvon. Esimerkiksi plv 14250 – 15150 tehtyjen levykuormituskokeiden keskiarvo 248 MPa.

MITTAUSRAPORTTI: E2					Tulostettu 27.10.2017	
Tien Nimi: Kantava_Vt 14 15000 - 15150 sln oik kaist.					Päivä:	20.10.2017
Tie Numero: 14					Mittaaja:	ro
Tie Osa Numero: 000					Ohjearvo:	160
Tiedosto: Kantava_Vt 14 15000 - 15150 sln oik kaist.FWD					Ajorata:	0
	<u>ET</u>	<u>Kantavuus E2</u>	<u>Alitus</u>			
	15 000	213				
	15 050	235				
	15 100	247				
	15 150	296				
Lukumäärä	Pienin tulos	Suurin tulos	Keskiarvo	Keskihajonta		
4	213,00	296,00	247,75	30,41		

Kuva 18. Kantavan kerroksen levykuormituskokeiden mittausraportti plv 15000 – 15150.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

4.1 Mallipohjaisen tiivistämistyön hyödyt

Perinteiseen verrattuna mallipohjaisessa tiivistämisessä on useita hyötyjä. Työn aikainen toteuman seuranta mahdollistaa homogeenisen ja kattavan tiivistämisen. Jyrän kuljettajalle järjestelmä antaa koko ajan tietoa työstettävän rakenteen jäykkyydestä ja yliajokerroista. Tieto päivittyy automaattisesti myös työnjohdon seurattavaksi. Poikkeamat tiivistymisessä tai ongelmakohdat on mahdollista havaita ja ryhtyä korjaaviin toimenpiteisiin. Tiivistystyön tuloksena muodostuva karttaesitys on visuaalinen dokumentointiaineisto, joka osoittaa työstetyn alueen ja rakenteen suhteellisen tiiveyden. Kun tähän yhdistetään heikoimpien kohtien kantavuuden mittausta levykuormituskokeella, saadaan luotettava laadunvarmistusaineisto rakenteen tiiveydestä ja kantavuudesta. Kun levykuormituskoemittauksia tehdään vain kahdesta heikoimmasta kohdasta 5000 m² pinta-alaa kohden, mittauksen määrää väylärakenteen laadunvarmistusmittauksen osalta voidaan vähentää jopa kymmenesosaan nykyisestä käytännöstä. Lisäksi reaaliaikaisen laatatiedon mahdollistama tiivistystyömäärän optimointi on tärkeä työn tuottavuutta parantava tekijä. Lisäarvona tarkan RTK-GNSS-paikannuksen käytöstä tulee tiivistämisen yhteydessä muodostuva geometrisen toteuman mittausaineisto. Perinteiseen menetelmään verrattuna mallipohjainen tiivistystyön seuranta mahdollistaa aiempaa kattavamman dokumentoinnin ja tuottavuuden paranemisen.

Mallipohjaisen tiivistystyön toimintatavan laajemman käyttöönottoon haaste liittyy hankintakäytäntöön. Perinteisellä infrarakentamisen alalla tiivistämistyö on pääurakoitsijan näkökulmasta usein alihankkijan suorittamaa tuntityötä, jonka kehittämällä ei nähdä merkittävää hyötyä projektin tuottavuuteen ja laadunvarmistus tehdään joka tapauksessa tilaajan InfraRYL-vaatimusten ja ohjeiden mukaan. Koneurakoitsijan näkökulmasta tiivistämistyötä tehdään kunnes laatuvaatimukset todennetaan erillisinä mittauksina. Lisäksi jyrään tarvittavan koneohjausjärjestelmän investointi on koneurakoitsijoille iso kynnys, jota on vaikea ylittää ellei menetelmän käytölle ole tilaajavaatimuksia. Tilajavaatimuksen myötä mallipohjainen tiivistämistyö todennäköisesti yleistyisi nopeasti. Kaivu- ja täyttötyö tehdään jo pääosin työkoneautomaatiolla, joten tiivistämisessä on perusteltua hyödyntää samoja mallipohjaisen tuotannon lähtötietoja ja järjestelmiä.

4.2 Ehdotus jatkotoimiksi

Mallipohjaisen tiivistämisen laajempaan käyttöönottoa väyläurakoissa voisi edistää huomioimalla asia positiivisesti laatupisteytyksessä. Väylärakenteen penger- ja kerrosrakenteiden tiiveystiedon dokumentointi ja luovuttaminen jatkuvana paikkatietoon kytkettynä tiiveyskarttana yhdessä kantavuuden todentavien pistekoemittauksen kanssa voidaan edellyttää käytettäväksi urakan laadunvarmistusmenetelmänä. Menetelmän käyttöönottoa voitaisiin suosia ensin tilaaja-urakoitsija yhteistyötä tukevien hankintamallien kanssa.

LÄHTEET

- 1 Tietomallipohjaisen suunnittelu- ja rakentamisprosessin Inframodel3-pilotti, Pilottiprojektin loppuraportti, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 17/2015.
- 2 InfraRYL, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Osa 1 Väylät ja rakenteet 2010.
- 3 InfraRYL päivitys TK242TR1, 23.09 2016. Liite T25. Kerrosrakenteiden tiivistystyön ja tiiveyden tarkkailun menetelmät. Liikenneviraston luovuttama julkaisematon ohjeluonnos.
- 4 Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys ja kantavuustutkimus, Antti Kalliainen, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, 10/2010.
- 5 Geotekninen suunnitelmaselostus ja geotekniset laskelmat, Valtatien 14 parantaminen välillä Aholahdentie -Savontie, Destia Oy/Geotekninen suunnittelu Mikko Smura 2017.
- 6 Compaction control system – Intelligent Compaction, Trimble Heavy Civil Compaction, Norbert Mattivi, Jyrän koneohjausjärjestelmän koulutus- ja käyttöohje, Janne Paitsola/SITECH Finland luovuttama esitysaineisto 79 s.

