



Lauri Kortelainen

Stabiloidun kantavan kerroksen pakkaskestävyys

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo 20.06.2019

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaajat: DI Ilari Harju ja DI Henry Gustavsson

Tekijä Lauri Kortelainen

Työn nimi Stabiloidun kantavan kerroksen pakkaskestävyys

Koulutusohjelma Master's Programme in Geoenineering

Pääaine Geoenineering**Koodi** ENG23

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaajat Ilari Harju, Henry Gustavasson

Päivämäärä 20.06.2019 **Sivumäärä** 53 + 48**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Suomen alemman tieverkon, eli vähäliikenteisen seututieverkko ja yhdysteiden, liikennemäärien ja ajoneuvojen massan kasvu ovat kasvattaneet tierakenteeseen kohdistuvaa liikennekuormitusta. Samaan aikaan Suomessa vuodenaikojen lämpötilavaihtelut ovat suuria ja aiheuttavat tierakenteeseen ympäristökuormitusta. Kuormitustekijät aiheuttavat tieverkkoon vaurioita. Päälysrakenteen vauriot voidaan korjata uusimalla tien päälysrakenne kokonaan, mutta alemman tieverkon rakenteen parantaminen pyritään tekemään mahdollisimman kustannustehokkaasti. Tierakenteen parantamisessa voidaan käyttää mm. sekoitinjyrsintää, bitumistabilointia tai hydraulista stabilointia.

Tässä diplomityössä tutkitaan uusiomateriaaleja hyödyntävän hydraulisesti stabiloidun kantavan kerroksen pakkaskestävyyttä. Uusiomateriaaleja on käytetty tutkimuksessa stabiloinnin sideaineseoksessa. Hyödynnettävät uusiomateriaalit ovat lentotuhka, kipsi ja masuunikuona. Referenssideaineena tutkimuksessa käytettiin sementtiä. Työssä tutkittiin yhteensä kymmenen erilaista koekappalesarjaa, jotka koostuvat murskeen ja sideaineen seoksista, kolme murskeesta ja sementistä, neljä murskeesta, sementistä ja lentotuhkasta sekä kolme murskeesta, sementistä, kipsistä, lentotuhkasta ja masuunikuonasta.

Koekappaleiden pakkaskestävyyttä tutkittiin pakkasrapautumiskestävyys-, suola-pakkaskestävyys-, routanousu- ja vedenläpäisevyyskokeilla. Koekappaleiden pakkasrapautumiskestävyyttä tutkittiin 12-syklin jäädytys-sulatuskokeella, joka tehtiin kaikille kymmenelle sideaineseokselle. Suola-pakkaskestävyyskokeissa jäädytys-sulatussykli toistettiin kuusi, 12 tai 24 kertaa, ja sulamisveden suolapitoisuus nostettiin 7,5 %:iin tai 15 %:iin, joka tehtiin seitsemälle sideaineseokselle. Jäädytys-sulatuskokeiden vaikutusta tarkasteltiin kappaleen muutosten avulla, jotka määritettiin yksiaksiaalisella puristuskokeella. Pakkasrapautumiskestävyyskokeiden kaikki sideaineseokset täyttivät *Päälysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeen puristuslujuusvaatimukset. Suola-pakkaskestävyyskokeissa havaittiin, että referenssimateriaalina toiminut sementtistabilointi vaurioitui kokeessa muita materiaaliseoksia herkemmin. Routanousukoe tehtiin kolmelle sideaineseokselle sekä suola- että pakkaskestävyyskokeiden jälkeen. Koekappaleet olivat routimattomia.

Avainsanat kerrosstabilointi, uusiomateriaalit, pakkaskestävyys, routanousu



Author Lauri Kortelainen

Title of the thesis The frost resistance of stabilized base course

Degree of programme Master's Programme in Geoengineering

Major Geoengineering

Code ENG23

Thesis supervisor Leena Korkiala-Tanttu

Thesis advisors Ilari Harju, Henry Gustavsson

Date 20.06.2019

Number of pages 53 + 48

Language Finnish

Abstract

The traffic load on the road structure of Finnish lower road network, i.e. on regional and connecting roads, is growing due to an increased traffic flow and vehicle mass. In addition, seasonal temperature variation in Finland is great and causes environmental load. These factors cause damages, such as longitudinal loads and transverse cracks, on the road network. Damages to the pavement can be repaired by reconstructing the entire pavement, but it is more typical to improve the already existing bearing course as it costs less. Full depth reclamation method, bitumen stabilization and hydraulic stabilization are frequently used to improve the road structure.

This thesis studies the frost resistance of base course which has been hydraulically stabilized using recycled materials. The recycled materials used comprise fly ash, gypsum and slag. A compound of crushed gravel and cement has been used as reference material. The tests were made with ten different mixtures, three of them consisted of crushed gravel and cement, four consisted of crushed gravel, cement and fly ash and the rest consisted of crushed gravel, cement, fly ash, gypsum and slag.

The frost resistance of these mixtures was examined with frost weathering resistance tests, salt frost weathering resistance tests, frost heave tests and water permeability tests. The frost weathering resistance tests were made in accordance with VTT test manual. The frost resistance of the test samples was tested with freezing and thawing test. The freezing and thawing cycle was repeated 12 times. In the salt frost weathering tests the freezing and thawing cycle was repeated six, 12 or 24 times, and the salt content of the thaw water was raised to 7,5% or 15%. The compression strength of the test samples was defined with unconfined compression test. The frost weathering resistance tests were made with all ten test samples while the salt frost weathering resistance tests were made with the seven test samples with the lowest binder content. All the test samples in the frost weathering resistance tests met the compression strength requirements set by Finnish Transport Agency. The reference material was the only one that did not meet the requirements in salt frost weathering resistance tests.

Keywords stabilization, recycled materials, freezing and thawing resistance, frost heave

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty osana EU-life IP CIRCWASTE- hanketta. Diplomityön ohjaajina toimivat Ilari Harju Ramboll Finland Oy:stä ja Henry Gustavsson Aalto-yliopistossa. Työn valvojana toimi Leena Korkiala-Tanttu Aalto-yliopistosta. Työn ohjausryhmään kuului myös Harri Jyrävä, Juha Forsman ja Taavi Dettenborn Ramboll Finland Oy:stä.

Kiitän suuresti diplomityön ohjaajiani ja ohjausryhmään kuuluneita henkilöitä, jotka ovat antaneet arvokasta tietoa ja auttaneet työn kokeiden suunnittelussa ja tekemisessä. Erityiset kiitokset haluan antaa Ilari Harjulle, joka antoi korvaamatonta apua diplomityön kirjoittamisessa sekä Aalto-yliopiston pohjarakentamisen laboratorioteknikko Matti Ristimäelle ja yliopisto-opettaja Henry Gustavssonille, jotka auttoivat tutkimuksen eri kokeiden toteuttamisessa.

Kiitokset myös perheelleni ja kavereilleni sekä koulussa että Ramboll Finland Oy:ssä kaikesta tuesta ja kannustuksesta diplomityön teon aikana.

Espoo 20.6.2019

Lauri Kortelainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
1 Johdanto	6
2 Tien päällysrakenne	8
2.1 Päällysrakennetyypit	8
2.2 Tierakenteeseen kohdistuvat ympäristökuormitukset	10
2.3 Tierakenteeseen kohdistuvat liikennekuormitukset ja tien vaurioituminen	12
3 Tien päällysrakenteen stabilointi	15
3.1 Kantavan kerroksen hydraulinen stabilointi	15
3.2 Stabiloidun kerroksen suunnittelu ja mitoitus	16
4 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit	21
4.1 Kalliomurske	21
4.2 Sementti	22
4.3 Lentotuhka	24
4.4 Kipsi	25
4.5 Suola	25
4.6 Masuunikuona	26
5 Laboratoriotutkimukset	27
5.1 Runkoaineen suhteutus	27
5.2 Koekappaleiden valmistus ja tiivistäminen	28
5.3 Puristuslujuus	31
5.4 Pakkasrapautumiskestävyys	33
5.5 Routanousukoe	33
5.6 Suola-pakkaskestävyyskoe	36
5.7 Vedenläpäisevyyskoe	38
6 Tutkimustulokset	39
6.1 Runkoaineiden ominaisuudet	39
6.2 Puristuslujuus ja pakkasrapautumiskestävyys	40
6.3 Suola- ja pakkaskestävyys	42
6.4 Routivuus	45
6.5 Vedenläpäisevyys	47
7 Tuloksien analyysi	48
8 Johtopäätökset	49
Lähteet	50
Liiteluettelo	53

1 Johdanto

Suomen päällystetty alempi tieverkko, eli vähäliikenteinen seututieverkosto (KVL alle 200 ajon/vrk) ja yhdystiet, on yhteispituudeltaan noin 25 600 km, eli noin 32 % koko Suomen yleisistä teistä (Tiehallinto 2005a). Vuonna 2017 seututeiden keskimääräinen vuorokausiliikenne oli koko maassa 1439 autoa. Vuonna 1983 seututeiden keskimääräinen vuorokausiliikenne oli koko maassa 1099, eli 34 vuodessa on tapahtunut noin 24 % kasvu ajoneuvojen vuorokausiliikenteessä samalla, kun ajoneuvojen akselimäärät ja rengaskuormat ovat suurentuneet. Erityisesti raskaan liikenteen kasvu on ollut suurta. Vuosien 1983 ja 2017 välisenä aikana raskaiden ajoneuvojen osuus Suomen liikennemäärästä on kasvanut 57 %. Henkilöautojen osuus tieverkon käyttäjistä on 34 vuodessa kasvanut samassa suhteessa 56 %. (Tiehallinto 2002; Liikennevirasto 2018b.) Suuresta tieverkon käytön kasvusta ja ajoneuvojen yhä suuremmasta massasta johtuen Suomen tieverkossa ilmenee enenevissä määrin päällystevaurioita, kuten pituus- ja verkkohalkeilua. Alemman tieverkon huonoa kuntoa osaltaan selittää viime vuosien niukka rahoitus (Liikennevirasto 2017b). Vuoden 2017 Liikenneviraston *Perusväylänpito ja liikenneväylien korjausvelkaohjelma 2016 – 2018* -selvityksen mukaan erittäin huonokuntoisia teitä on noin 2800 kilometriä, joista suurin osa on vähäliikenteisiä seutu- ja yhdysteitä, eli alempaa tieverkostoa.

Tieverkkoa vaurioittaa liikenteen ja iän aiheuttaman vaurioitumisen lisäksi ympäristö. Tieverkon pituushalkeamat ovat suurelta osin routimisesta aiheutuvia. Tien pinnalle jäävä vesi ja nastarenkaat yhdessä aiheuttavat päällysrakenteen urautumista. Tieverkosto on sekä liikenne- että ympäristökuormitusten seurauksena jatkuvassa rasituksessa. Päällysrakenteeseen rasitusten aiheuttamia vaurioita voidaan korjata rakentamalla päällysrakenne uusiksi tai kunnostamalla vanhaa päällysrakennetta. Erityisesti alemman tieverkon kunnostaminen halutaan hoitaa mahdollisimman kustannustehokkaasti, jolloin vaurioiden korjaaminen tapahtuu parantamalla olemassa olevaa tierakennetta (Hölttä 2012). Tierakenteen parantamiseen voidaan käyttää muun muassa sekoitinjyrsintää, bitumistabilointia tai hydraulista stabilointia. Stabiloinnilla voidaan lisätä stabiloitavan kerroksen kuormituskestävyyttä, korjata vaurioita ja pinnan epätasaisuutta sekä vähentää stabiloitavan kerroksen routimisherkkyyttä. Stabilointi on ympäristön kannalta kestävä ratkaisu, koska sen avulla voidaan hyödyntää olemassa olevia rakennekerroksia ja usein uutta materiaalia tarvitaan vähän. (Tiehallinto 2007.)

Stabilointimenetelmät luokitellaan niissä käytettävän sideaineen perusteella. *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa on esitetty erilaisia stabilointimenetelmiä: bitumistabilointi, komposiittistabilointi, sementtistabilointi ja masuunihiekkastabilointi. Bitumistabiloitu tien rakennekerros on joustava, ja sementillä stabiloitu kerros on jäykkä. Sementillä stabiloidun kerroksen lujuuden kehitys on nopeampaa kuin bitumilla stabiloidussa kerroksessa, ja masuunihiekalla stabiloidun kerroksen lujuuden kehitys on hitaampaa kuin bitumilla stabiloidun kerroksen lujuuden kehitys. Sementin korkean hinnan ja hiilijalanjäljen takia olisi suotavaa käyttää mahdollisimman vähän sementtiä stabiloinnissa. Uusiomateriaalien, kuten teollisuuden sivutuotteena syntyvän tuhkan, hyödyntäminen stabiloinnin sideaineena voi vähentää stabiloinnissa tarvittavan kaupallisen sideaineen osuutta sideaineseoksessa.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sementin ja uusiomateriaalien seoksella stabiloitavan kantavan kerroksen pakkaskestävyyttä. Uusiomateriaalistasabilointia ollaan tutkittu aikaisemmin *Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa (Harju 2017)* ja *Kivituhkan soveltaminen sidotun kantavan kerroksen runkoaineksi (Melander 2018)* diplomitöissä. Diplomityössä (Harju 2017) tutkittiin uusiomateriaalistasabiloinnilla

stabiloidun kantavan kerroksen päällysrakenteiden pitkäaikaistoimivuutta Suomen liikenne-, ilmasto- ja pohjamaaolosuhteissa. Diplomityössä todetaan hydraulisesti uusiomateriaaleilla ja sementillä stabiloidun kantavan kerroksen lujuusominaisuuksien säilyvän Suomen ilmastorasituksissa ja kehittyvän rakenteessa ajan saatossa. Marika Melander on diplomityössään *Kivituhkan soveltaminen sidotun kantavan kerroksen runkoaineeksi (2018)* tutkinut kivituhkan soveltuvuutta uusiomateriaaleilla ja sementillä stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineeksi. Diplomityössä todetaan kivituhkan 0/3 soveltuvan stabiloitavan kantavan kerroksen runkoaineeksi, mikäli sen kanssa käytetään sopivaa sideainetta. Kivituhkan ja sementin seos sekä kivituhkan ja kaupallisen sideaineen seos täyttivät Tiehallinnon *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeen tavoitevaatimukset.

Aikaisemmissa tutkimuksissa ei ole selvitetty maantiesuolan vaikutusta uusiomateriaalein stabiloidun kantavan kerroksen lujuuteen. Tätä tutkittiin *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa esitetyn suola-pakkaskestävyyskoemenetelmän avulla sillä erotuksella, että tutkimuksessa valittu suolapitoisuus oli ohjeessa esitettyä 1 % pitoisuutta suurempi. Uusiomateriaalein stabiloituja näytteitä tutkittiin työssä myös muilla kokeilla, kuten pakkasrapautumiskestävyys-, routanousu- ja vedenläpäisevyyskokeilla. Stabiloidun kantavan kerroksen routanousua on arvioitu laboratoriossa suoritetuilla kokeilla. Tutkimuksissa saatuja tuloksia verrattiin *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa asetettuihin vaatimuksiin. Tässä työssä ei ole tarkasteltu uusiomateriaalien ympäristökelpoisuutta ja hyötykäyttöä koskevaa lainsäädäntöä.

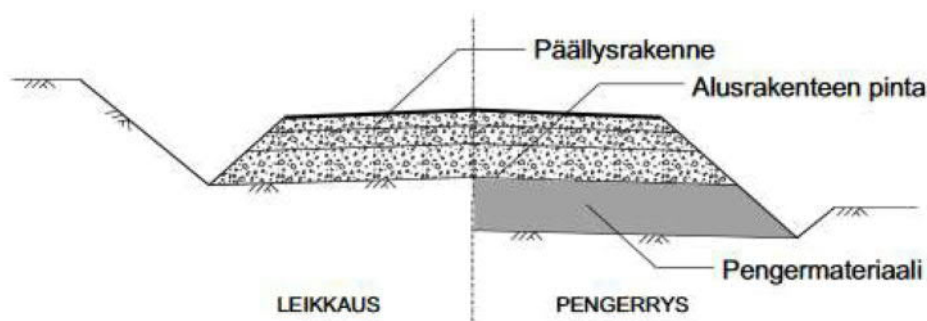
2 Tien päällysrakenne

Tierakenne koostuu alusrakenteesta ja päällysrakenteesta, jotka on esitetty kuvassa 1. Alusrakenne koostuu pohjamaasta tai penkereestä, ja sen tehtävänä on toimia tasalaatuisena, kantavana ja painumattomana perustana päällysrakenteelle. Päällysrakenteen tehtävänä on kantaa liikenteen kuormitukset ja jakaa ne tasaisesti alusrakenteelle mahdollisimman laajalle alueelle. (Tiehallinto 2002.)

Päällysrakenteen päällimmäistä kerrosta kutsutaan kulutuskerrokseksi tai päällyskerrokseksi. Kulutuskerroksen tehtävänä on toimia päällysrakenteessa vettä hylkivänä ja jäykkyyttä lisäävänä kerroksena, joka lisää ajomukavuutta ja liikenneturvallisuutta. Tierakenteen kulutuskerroksen alapuolella on kantava kerros, jonka tehtävänä on muodostaa oikean muotoinen ja luja pohja päällysteelle sekä jakaa liikennekuormitukset päällysrakenteen alemmille kerroksille. Lisäksi kantava kerros kuivattaa kulutuskerroksen läpi tulevan veden. Kantavan kerroksen alapuolella on jakava kerros, jonka tehtävänä on lisätä rakenteen kantavuutta, jakaa kuormia ja ehkäistä roudan nousua rakennekerroksissa. Jakava kerros kuivattaa kantavaa kerrosta ohjaamalla kantavan kerroksen läpi tulevan veden sekä katkaisemalla mahdollisen kapillaarisen veden nousun. Jakavan kerroksen tulee kestää liikennekuormituksen seurauksena syntyvät leikkausjännitykset ja muodonmuutokset. Jakavan kerroksen alapuolella on suodatinkerros, joka erottaa alusrakenteen tien muista rakennekerroksista. Suodatinkerros myös lisää päällysrakenteen paksuutta ja näin vähentää veden kapillaarisen nousun mahdollisuutta ylempiin rakennekerroksiin. Suodatinkerros tarvitaan aina kun alusrakenne on routivaa. Kerroksellisella rakenteella saavutetaan päällysrakenteelle luonnostaan paksuutta, joka suojaa koko rakennetta routimiselta (Ehrola 1996; Liikennevirasto 2018a; Tiehallinto 2002; Tekes 2000.)

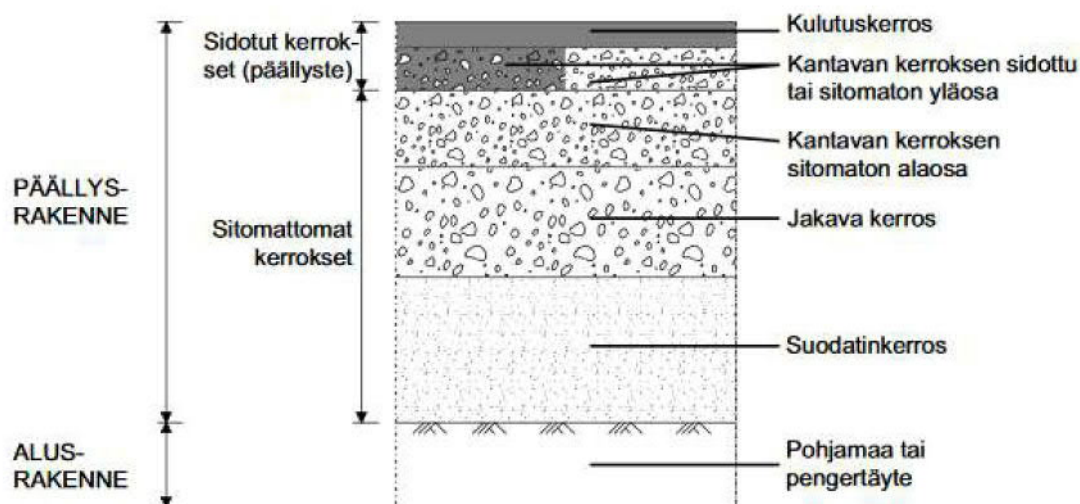
2.1 Päällysrakennetyypit

Tierakenteen päällysrakennetyypit jaetaan joustaviin, puolijäykkiin ja jäykkiin päällysrakenteisiin. Yleisin päällysrakennetyyppi on joustava päällysrakenne, joka on esitetty kuvassa 2. Joustavan päällysrakenteen kulutuskerros on bitumisella sideaineella sidottu joustava kerros, ja loput rakennekerrokset ovat sitomattomia. Joustavassa päällysrakenteessa sitomattomat kantava ja jakava kerros voidaan korvata kokonaan tai osittain bitumisilla sideaineilla sidotuilla rakennekerroksilla. (Tiehallinto 2002.)



Kuva 1. Tien rakennekerrokset (Tiehallinto 2002).

Puolijäykällä päällysrakenteella tai yhdistelmärakenteella tarkoitetaan tierakennetta, jossa kulutuskerros on joustava bitumilla sidottu kerros, ja sidotun kerroksen alapuolella on yksi tai useampi hydraulisilla sideaineilla sidottu rakennekerros. Tämän kaltaisen yhdistelmärakenteen tarkoituksena on yhdistää joustavan ja jäykän rakennekerroksen parhaat puolet. Joustavan bitumilla sidotun kulutuskerroksen etuihin kuuluu muun muassa päällysteen helppo kunnossapito sekä tien kulutuskerroksen vaurioitumismahdollisuuksien ja ajomukavuusongelmien välttäminen verrattuna betonipäällysteiseen saumarajaiseen tierakenteeseen. Sementillä tai muilla hydraulisilla sideaineilla sidottujen kerroksien etuja ovat muun muassa rakenteen jäykkyys ja kyky vastustaa deformaantumista. Jäykkä sidottu rakennekerros voi kuitenkin halkeilla esimerkiksi sementille ominaisen kutistumisen seurauksena. Halkeamat voivat heijastua ajan myötä myös tien päällysrakenteen bitumilla sidotun kulutuskerroksen halkeamiksi. Jäykkä sementillä sidottu rakennekerros voi halkeilla myös epätasaisen routanousun seurauksena. Routanousujen aiheuttaman halkeilun ehkäisemiseksi voidaan joko puolijäykkä päällysrakenne rakentaa riittävän paksuksi tai lisätä routaeriste jakavan- ja suodatinkerroksen väliin. Routanousujen ja liikennekuormien aiheuttamia vaurioita voidaan ennaltaehkäistä rakentamalla kulutuskerrokseen elastinen ja vesitiivis asfalttipäällyste, jolloin sade- ja sulamisvedet eivät suotaudu alempiin rakennekerroksiin. (Ehrola 1996; Liikennevirasto 2018a.)



Kuva 2. Joustava päällysrakenne (Tiehallinto 2002).

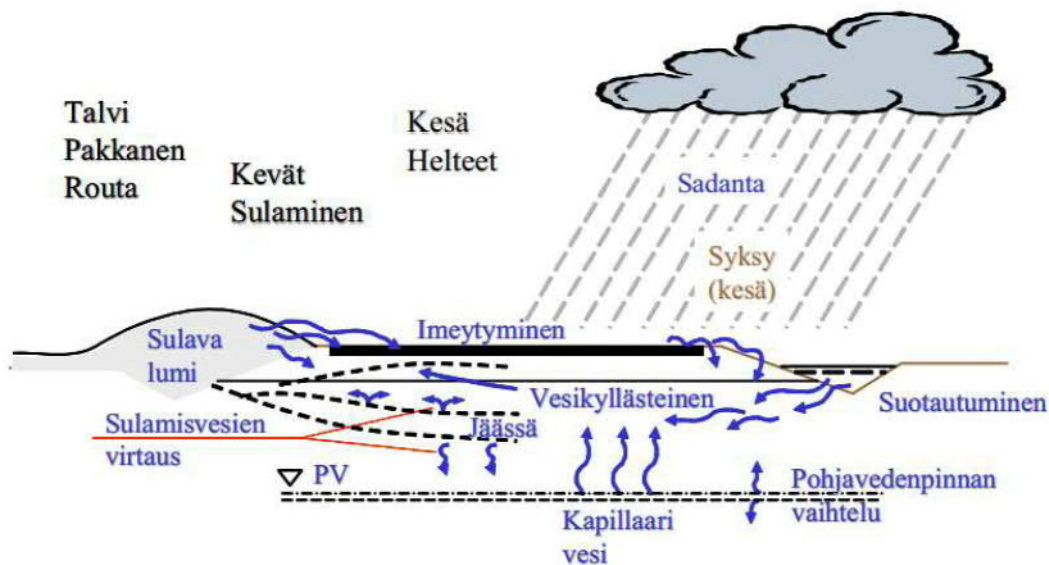
Jäykän päällysrakenteen kulutuskerros ja kantava kerros ovat hydraulisella sideaineella (sementti) sidottuja rakenteita. Jäykät sementillä sidotut kerrokset vaurioituvat herkästi epätasaisten painumien ja/tai routanousujen seurauksena. Betonipäällysteisen jäykän rakenteen vaurioiden ennaltaehkäisyyn kiinnitetään paljon huomiota, koska betonipäällysteisen rakenteen korjaaminen on vaikeaa ja kallista. Jäykän päällysrakenteen rakentamisessa tulee varmistaa alustan routimattomuus. Lisäksi alustan tasalaatuisuus ja painumattomuus on varmistettava hyvällä suunnittelulla. (Ehrola 1996.) Suurien investointikustannusten, herkkien routivuustekijöiden sekä huonon nastarengaskestävyyden johdosta betonilla päällystettyjen teiden rakentamisesta ollaan Suomessa luovuttu.

Joustavan, puolijäykän ja jäykän päällysrakenteen lisäksi tierakenne voi olla kivipäällysteinen, kuten katujen ja torien päällykset. Sorapäällysteistä rakennetta käytetään vähäliikenteisillä

teillä. Sorapäälysteisessä rakenteessa kulutuskerros on runkokiviaineksesta ja savesta tehty sitomaton rakenne. Erikoisrakenteisiin kuuluvat esimerkiksi lämpöeristeet, joiden tarkoituksena on rajoittaa roudan tunkeutuminen routivaan alusrakenteeseen sekä kevennysrakenteet, kuten kevytsorasta valmistetut rakenteet, joiden tarkoituksena on vähentää alusrakenteeseen kohdistuvaa kuormitusta. Erikoisrakenteita ovat myös kuitukankaat ja vahvisteet, kuten geolujitteet ja teräsverkot. Kuitukankaita käytetään pääasiassa tien rakennekerrosten erottamiseen, kuten esimerkiksi alusrakenteen ja rakennekerroksien erottamiseen. Kuitukangas estää hienoaineksen kulkeutumisen ylempiin rakennekerroksiin. Geolujitteilla lujitetaan sitomattomia rakennekerroksia, jotka eivät kestä veto- ja leikkausjännityksiä. Geolujitteiden tarkoituksena on vähentää veto- ja leikkausjännityksien aiheuttamaa deformaatiota. (Ehrola 1996.)

2.2 Tierakenteeseen kohdistuvat ympäristökuormitukset

Tierakenteeseen kohdistuu ympäristö- ja liikennekuormitusta. Ympäristökuormitukset muodostuvat lämpötilan ja kosteusolosuhteiden muutoksista sekä roudan vaikutuksesta. Lisäksi teiden kunnossapitotoimenpiteet, kuten tien suolaaminen ja auraaminen rasittavat tierakennetta. (Ehrola 1996.) Kuvassa 3 on esitetty ympäristöstä aiheutuvia erilaisia kuormitustekijöitä.



Kuva 3. Tierakenteeseen kohdistuvat Ilmastokuormitukset (Tiehallinto 2002).

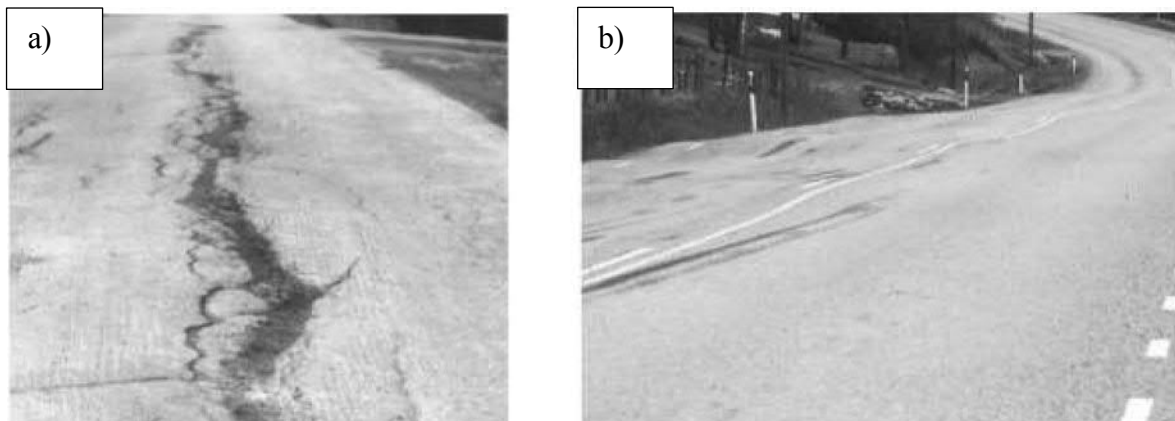
Tierakennetta kuormittavista ympäristötekijöistä vesi aiheuttaa tierakenteen kantavuuden pienentymistä rakenteeseen imeytyessään, ja kosteus tien pinnalla lisää nastarenkaista aiheutuvaa tien pinnan kulumista. Sade- ja sulamisvedet voivat päätyä tien rakennekerrokseen imeytymällä päällysteen läpi, suotautumalla tai nousemalla kapillaarisesti tien alusrakenteesta tai pohjamaasta. Tämän johdosta keväisin lumien sulaessa tierakenteen kantavuus pienenee ja tien vaurioitumisriski kasvaa. Karkearakeiset rakennekerrokset läpäisevät vettä, eikä kyllästymistä yleensä pääse syntymään, mutta hienorakeisilla rakennekerroksilla korkea vesipitoisuus yhdistettynä kuormitukseen aiheuttaa rakenteessa kohonnutta huokosvedenpainetta, jonka johdosta rakenteen leikkauslujuus pienenee. (Ehrola 1996.)

Tien pinnan lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n huokosvesi jäätyy ja materiaali routaantuu. Tierakenteen routaantuminen muuttaa rakenteen fysikaalisia ominaisuuksia siten, että

tierakenteen jäykkyys ja kantavuus suurenevät. Roustaantuminen ei kuitenkaan välttämättä aiheuta epätasaista routanousua. Routanousu on seurausta routivaan rakennekerrokseen syntyvistä jäälinseistä, jotka muodostuvat, kun jäätymisvyöhykkeeseen pääsee imeytymään vettä kapillaarisesti. Maan routivuus on seurasta pohjavedestä ja maan rakenteessa olevan veden jäätymisestä, mikä aiheuttaa routivaan maahan jäälinsejä, jolloin maan tilavuus kasvaa. Maan tilavuuskasvun seurauksena maan pinnalla tapahtuu routanousua. Mikäli maan jäätyessä ei tapahdu tilavuuden kasvua tai routanousua, on maa silloin routimatonta. (Ehrola 1996.) Tien rakenne mitoitetaan kestävästi pohjamaassa tapahtuvat epätasaiset routanousut, eikä tällöin pohjamaassa tapahtuvat epätasaiset routanousut vahingoita tien päällysrakennetta. Sitomattomien kerroksien toistuva jäätyminen ja sulaminen voivat vaurioittaa päällysrakennetta ja aiheuttaa rakennekerros materiaalien raekokojakauman muuttumista sekä hienoainemäärän kasvua, mikä lisää routimisen riskiä. (Tiehallinto 2001a.) Päällysrakenteen kerroksien routimisherkkyttä voidaan korjata stabiloinnilla. Stabiloinnissa sideaineella sidotaan hienoainesta, jolla pyritään vähentämään materiaalin routimisherkkyttä. Päällysrakennekerrosten stabilointi ei vaikuta pohjamaan routimistaipumuksiin. (Tiehallinto 2007.) Routanousut aiheuttavat tierakenteelle pysyviä vaurioita, kun taas maan sulaminen välillisiä vaikutuksia, kuten tierakenteen kantavuuden alenemista (Tiehallinto 2002).

Routimisen lisäksi tierakennetta kuormittavat ilman lämpötilanmuutokset. Lämpötilanmuutokset aiheuttavat päällysrakenteeseen sekä pakkas- että väsymishalkeilua. Pakkashalkeilu on seurausta lämpötilan laskun aiheuttamista termisistä vetojännityksistä päällysrakenteessa. Termiset vetojännitykset syntyvät päällysrakenteen pyrkimyksestä kutistua lämpötilan laskun seurauksena. Tätä pyrkii vastustamaan päällysrakenteen ja alusrakenteen välinen tartunta. Kun jännitykset eivät pääse purkautumaan vastustuksen seurauksena tierakenteen alempiin kerroksiin, ne kumuloituvat päällysteeseen. (Tiehallinto 2002.)

Kutistumisen lisäksi termisiä jännityksiä aiheutuu jännityksien relaksoitumisilmiöstä, joka on seurausta asfalttipäällysteen viskoelastisuudesta. Sideaineilla stabiloitujen kerroksien jäykkyys kasvaa ja vaikuttaa pakkashalkeiluun siten, että termiset jännitykset ovat pienempiä joustavassa rakenteessa kuin jäykässä rakenteessa. Jäykän rakenteen termiset jännitykset ylittävät rakenteen vetolujuuden korkeammassa lämpötilassa, kuin joustavalla rakenteella. (Ehrola 1996.) Väsymishalkeilu muodostuu päivittäisten lämpötilaerojen suuresta vaihtelusta. Väsymishalkeilu muistuttaa vaurioitumismekanismiltaan paljon liikennekuormituksen aiheuttamaa päällysteen väsymistä. Hydraulisilla sideaineilla stabiloitaessa kantavan kerroksen jäykkyys kasvaa ja riski erilaisten lämpötilanmuutoksesta johtuvien vaurioiden syntymiseen pienenee. (Ehrola 1996; Tiehallinto 2007.) Kuvassa 4 on esitetty ympäristön ja liikenteen kuormituksista aiheutuvia vaurioita, tien pinnan halkeilua ja epätasaisuutta.



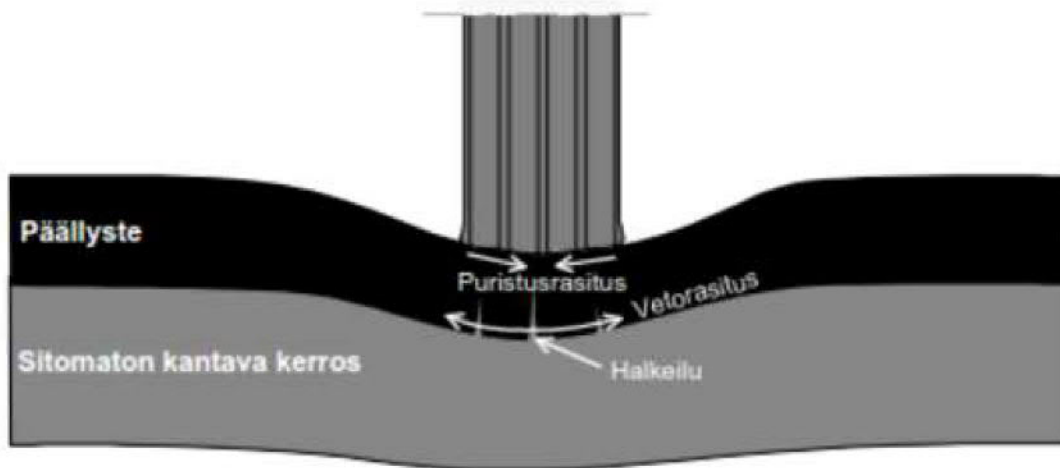
Kuva 4. Pituushalkeilua (a) ja tien epätasaisuutta (b) (Tiehallinto 2002).

2.3 Tierakenteeseen kohdistuvat liikennekuormitukset ja tien vaurioituminen

Tien liikennekuormitukset muodostuvat eri tyyppisistä moottoriajoneuvoista, kuten moottoripyöristä, henkilöautoista, pakettiautoista, linja-autoista ja erilaisista kuorma-autoista. Tierakenteen kuormituskestävyyksimitoituksessa kuorma-autot ja muut raskaat ajoneuvot, kuten linja-autot, ovat usein määrääviä kuormitustekijöitä. Kuormituskestävyyksimitoituksen tarkoituksena on ehkäistä raskaan liikenteen aiheuttamat vauriot ja pysyvät muodonmuutokset tierakenteessa. Kulutuskerros mitoitetaan kestävästi henkilöautojen nastarenkaiden tekemät vauriot. (Ehrola 1996; Liikennevirasto 2018a.) Liikenteestä aiheutuva kuormitus on kasvanut vuosien saatossa etenkin siksi, että raskaassa liikenteessä on siirrytty käyttämään raskaampaa kalustoa, jonka lainsäädäntö ja ajoneuvotekniikan kehittyminen ovat mahdollistaneet. Samaan aikaan henkilöautojen koko ja massa ovat kasvaneet merkittävästi. (Tiehallinto 2002.)

Ajoneuvojen aiheuttama kuorma tierakenteelle muodostuu ajoneuvon kokonaismassasta ja rengaskuormasta. Ajoneuvon kokonaismassa siirtyy jousien välityksellä ajoneuvon akseleille ja akseleilta edelleen renkaihin ja tien pinnalle. Akseliston ja jousituksen rakenne määrittelevät ajoneuvon kokonaismassan jakaantumisen tien pinnalle. Rengaskuorma muodostuu akseleilla olevien renkaiden lukumäärän mukaan. Rengaskuorman suuruuden määrittelee renkaiden erilaiset rengaspaineet, jotka vaikuttavat rengaskuorman jakautumiseen tien pinnalle. Tien epätasaisuudet vaikuttavat sekä ajoneuvon kokonaismassan että rengaskuorman jakautumiseen tien pinnalle. (Ehrola 1996.) Koska tierakenne on yhtenäinen kokonaisuus, voi yksittäinen vaurio edetä tierakenteessa aiheuttaen myös toisen tyyppisten vaurioiden muodostumista.

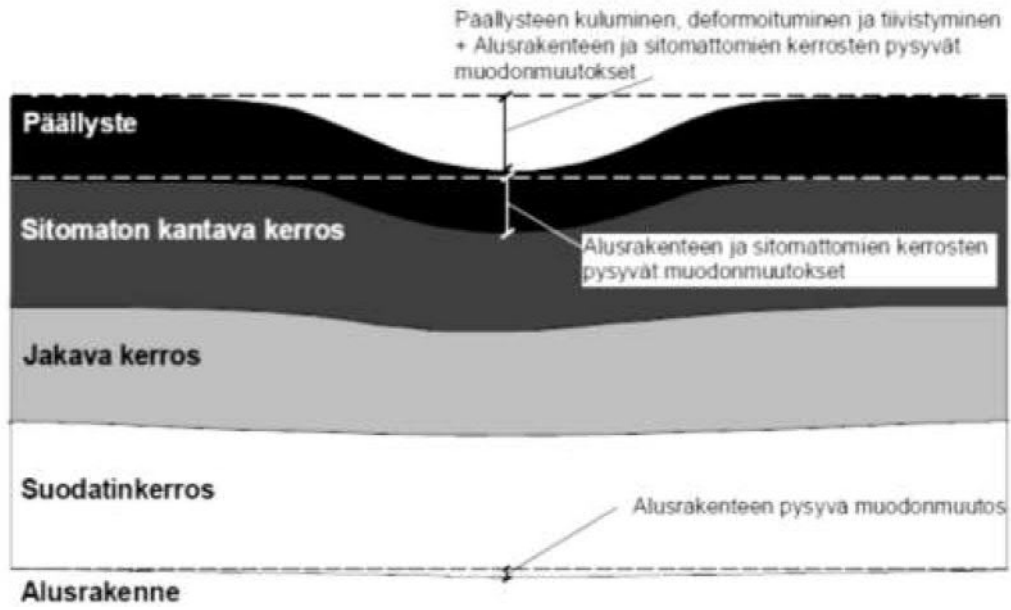
Liikennekuorma ja ympäristökuormitus aiheuttavat tierakenteelle kolmenlaisia vauriotyyppejä: halkeamia, epätasaisuuksia ja hajoamisvaurioita, kuten reikiä. Raskas liikenne aiheuttaa jokaisella ylityskerrallaan tierakenteeseen taipuman, josta seuraa puristusrasituksia päällysteen pintaan ja vetorasituksia päällysteen ja kantavan kerroksen väliseen saumaan (kuva 5). Ylityskertojen toistuessa useasti, päällysteeseen syntyy sekä pituus- että poikkihalkeamia. Pituus- ja poikkisuuntaisten halkeamien lisäksi yleisiä vilkasliikenteisillä teillä tavattavia halkeamatyyppejä ovat verkkohalkeamat. Verkkohalkeamat ovat seurausta asfaltin väsymisestä, jossa bitumin murtolujuus ja -venymä pienenevät ylityskertojen lisääntyessä. Verkkohalkeilu ilmenee ensin sitomattoman kerroksen yläpinnassa, josta se etenee kohti päällysrakenteen pintaa muodostaen verkon hiushalkeamia. (Tiehallinto 2002; Liikennevirasto 2016.)



Kuva 5. Asfalttipäällysteeseen kohdistuvat rasitukset ja väsymisvauriot liikennekuormituksen seurauksena (Liikennevirasto 2016).

Päällysrakenteen urautuminen on seurausta nastarenkaiden aiheuttamista kulumavaurioista sekä raskaan liikenteen aiheuttamasta plastisesta deformaatiosta sekä sitomattomille rakenteille että alusrakenteelle (kuva 6). Vilkasliikenteisillä teillä urautuminen on seurausta nastarenkaan aiheuttamasta raapaisevasta vaikutuksesta ja nastan iskusta päällysteen pintaan. Vähäliikenteisillä teillä raskas liikenne aiheuttaa tierakenteen tiivistymistä ja pysyviä deformaatioita, jotka kehittyvät sitomattomissa kerroksissa pitkän ajan kuluessa. Vähäliikenteisillä teillä raskas liikenne muokkaa sitomatonta kerrosta. Sitomattoman kerroksen materiaali siirtyy ajourilta sen sivulle aiheuttaen ajouran kohdalla tierakenteen painumista ja ajourien välissä tierakenteen kohoamista.

Tien kulutuskerrokseen voi muodostua myös hajoamisvauriota. Ne ovat päällysrakenteeseen muodostuvat purkaumat ja reiät, jotka ovat seurausta päällysteen sideaineen ja kiviaineksen välisten sidosten murtumisesta kuormituksen seurauksena. Hajoamisvaurion seurauksena päällysteestä voi irrota kokonaisia kiviainesrakeita. Purkauman kehittyessä ajan kuluessa suuremmaksi siitä tulee reikä, joka laajenee yhä suuremmaksi, mikäli sitä ei paikata. Nastarenkaat hajottavat päällysteen kiviainesmassaa, ja vesi jäätyessään ja sulaessaan hajottaa reikää yhä suuremmaksi. (Liikennevirasto 2016.) Tien rakennekerroksien vaurioituminen ei ole koskaan yhden yksittäisen vaurioitumistyyppin tulosta, vaan monen erilaisen vaurioitumistyyppin summa.



Kuva 6. Päällysrakenteen urautumiseen vaikuttavat tekijät (Liikennevirasto 2016).

3 Tien päällysrakenteen stabilointi

Stabiloinnin tarkoituksena on lisätä tierakenteen kuormituskestävyyttä, korjata kulutuskerroksen epätasaisuutta, paikata tien pinnan vaurioita ja vähentää stabiloitavan kerroksen routimista. Päällysrakenteen stabiloinnissa kasvatetaan stabiloitavan tierakenteen kuormituskestävyyttä lisäämällä rakenteeseen sideaineita. Sideaineina stabiloinnissa käytetään bitumia, masuunihiekkaa, sementtiä sekä bitumin ja hydraulisen sideaineen seosta. Sideaineen valintaa määrittelee ominaisuudet, jotka tierakenteelle ovat mitoittavia tekijöitä. Bitumistabiloitu tien rakennekerros on joustava. Hydraulisilla sideaineilla stabiloidut kerrokset ovat puolestaan jäykkiä ja ne kestävät suurempia kuormia kuin bitumisideaineilla stabiloidut kerrokset. Se kumpi ominaisuus, jäykkyys vai joustavuus, on mitoittava tekijä, riippuu tierakenteen routa- ja kuormitusolosuhteista. Optimaalinen tierakenne olisi sekä jäykkä että joustava. Yleisesti käytettyjen kaupallisten sideaineiden lisäksi sideaineina voidaan käyttää teollisuuden sivutuotteita kuten hiilen- tai puunpolton lentotuhkia. (Tiehallinto 2007.)

3.1 Kantavan kerroksen hydraulinen stabilointi

Hydraulisen stabiloinnin sideaineena käytetään usein sementtiä, joka yhdessä veden ja runkoaineen kanssa sementti muodostaa yhtenäisen hydraulisesti kovettuneen kerroksen. Sementillä sidotusta massasta on käytetty myös nimitystä maabetoni. Sementtistabiloinnin hyötyjä ovat muun muassa kantavan kerroksen taipuman pieneneminen, eli sementillä stabiloidun kantavan kerroksen jäykkyys paranee ja kulutuskerrokseen sekä kantavaan kerrokseen kohdistuvien jännityksien ja muodonmuutoksien sietokyky kasvaa. Sementtistabiloidun kerroksen rakenne toimii jäykän laatan tavoin ja vähentää vuodenaajoista johtuvia kantavuuseroja. Lisäksi sementtistabiloitu kerros on lähes liukenematon rakenne, jolloin monet ympäristölle haitalliset aineet eivät pääse leviämään ympäristöön, vaan säilyvät sementtistabiloidun kerroksen rakenteessa. (Tiehallinto 2001a; VTT 1995.)

Sementin lisäksi hydraulisen stabiloinnin sideaineena Suomessa on tutkittu erilaisia uusiomateriaaleja, kuten lentotuhkaa ja masuunikuonaa. Vuonna 2019 Väyläviraston julkaisemassa selvityksessä on tarkasteltu uusiomateriaalien hyödyntämistä muun muassa kantavassa ja/tai jakavassa kerroksessa. *Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteissa (2019)* -julkaisussa on esitetty rakennuskohteita, joissa uusiomateriaaleja, kuten lentotuhkaa on käytetty yhdessä sementin kanssa hydraulisessa stabiloinnissa. Julkaisussa esitetyn tarkastelun perusteella uusiomateriaalein stabiloidun kantavan kerroksen side- ja seosainemäärä määräytyy suurelta osin runkoaineen hienoainespitoisuuden mukaan. Mitä suurempi on runkoaineen hienoainespitoisuus, sitä suurempi on uusiomateriaalien määrä side- ja seosaineessa, jotta stabiloitu kantava kerros saavuttaa sille asetetut tekniset vaatimukset. Julkaisussa tarkastelluissa kohteissa on havaittu päällysrakenteen pituus- ja poikkihalkeilua erityisesti sementillä stabiloiduissa kohteissa. Tierakenteen vauriot ovat tutkimuksen mukaan peräisin pohjamaan routivuudesta ja sementillä stabiloidun kerroksen kuivumiskutistumisesta. Harju on diplomityössään *Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa (2017)* tutkinut uusiomateriaalasideaineseoksella stabiloidun kantavan kerroksen pitkäaikaiskestävyyttä Suomen liikenne-, ilmasto- ja pohjamaaolosuhteissa. Diplomityössä tehtyjen havaintojen perusteella Harju esittää kuivumiskutistumahalkeilun esiintymistiheyden olevan verrannollinen murskeen stabiloinnissa käytetyn sideaineseoksen sementtipitoisuuden

kanssa. Uusiomateriaalien vähentäessä sementinpitoisuutta sideaineessa myös päällysrakenteen vauriot vähenevät ilman, että stabiloitu kerros menettää teknisiä ominaisuuksiaan. *Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteissa (2019)* -julkaisun mukaan uusiomateriaaleja sideaineena hyödyntävien stabiloitujen kantavien kerroksien päällysrakenteissa ei havaittu kantavuuden pienenemistä verrattuna luonnon maa- ja kiviainesrakenteisiin. Hydraulisesti stabiloitujen päällysrakenteiden kantavuusvaatimukset ylittyivät selkeästi.

3.2 Stabiloidun kerroksen suunnittelu ja mitoitus

Päällysrakenteen stabilointi (2007) -ohjeessa määritellään hydraulisesti stabiloidun kantavan kerroksen suunnittelu ja mitoitus. Stabilointi soveltuu kohteisiin, joiden kantavuutta ja muita teknisiä ominaisuuksia, kuten routimattomuutta halutaan parantaa. Ohjeessa (Tiehallinto 2007) kerrotaan hydraulisesti stabiloidun kerroksen sopivan uusien routimattomiksi rakennettävien teiden rakennekerrokseksi. Rakenteen parantamiskohteissa tulee tutkia vanhan tierakenteen perusmaan painuma- ja vakavuusominaisuudet, routanousu, routavauriot, kuivatusongelmat sekä perusmaan kantavuus roudan sulamisen jälkeen. (Tielaitos 1992.) Hydraulinen stabilointi ei sovellu käytettäväksi tienrakennuskohteissa, joissa tarvitaan joustavia rakennekerroksia, sillä sementillä stabiloidut kerrokset ovat jäykkiä ja joustamattomia (Tiehallinto 2007).

Tierakenteen parantamiskohteille erityisen tärkeitä ovat ennakkotutkimukset, joissa määritetään vanhan rakenteen eri kerroksien paksuudet, vanhojen materiaalien ominaisuudet, sidottujen kerroksien sideaineiden laatu ja pitoisuus, hienontuneen kantavan kerroksen rajapinta, asfalttirouheen rakeisuus ja rouheen kiviaineksen rakeisuus sekä sitomattomien stabiloitavien materiaalien rakeisuus. Mikäli rakenteen parantamiskohteessa on eri-ikäisiä tai eri materiaalein rakennettuja päällysteitä, tulee niistä ottaa näytteitä erikseen. (Tiehallinto 2007.)

Päällysrakenteen stabilointi (2007) -ohjeen mukaan, jos esitutkimuksien jälkeen päätetään parantaa nykyistä kohdetta stabiloinnilla, tarvitaan stabilointimassan suhteutussuunnitelma. Stabilointimassan suhteutuksessa tulee ottaa huomioon (sideainelajista riippumatta):

- asfalttirouheen osuus stabilointimassasta
- asfalttirouheen ominaisuudet
- mahdollisen lisäkiviaineksen rakeisuus ja hienoainesominaisuudet
- massan tiivistettävyyden
- vaadittu säänkestävyys.

Hydraulisessa stabiloinnissa stabilointimassa suhteutetaan aina kokeellisesti eikä kokemusperäisesti. Kokeellisessa suhteutuksessa stabilointimassan ominaisuuksia testataan erilaisilla kokeilla, kuten vedenkestävyys-, puristuslujuus-, pakkasrapautumiskestävyys-, deformaatiokestävyys-, jäykkyyshuomio- ja suola-pakkaskestävyys-, routanousu- ja imupainekokeilla. Testausmenetelmät perustuvat kansainvälisiin standardeihin tai yleisesti käytössä oleviin testausmenetelmiin. (Tiehallinto 2007.)

Stabiloinnin tavoitteena on vahvistaa ennestään heikkoa tierakennetta ja parantaa sen kuormituskestävyyttä. Hydraulisen stabiloinnin sisältävän päällysrakenteen kuormituskestävyys tulee mitoittaa Odemarkin kantavuuskaavalla (1):

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

jossa:

E_A on mitoitettavan kerroksen alapinnan kantavuus (MPa)

E_Y on mitoitettavan kerroksen yläpinnan kantavuus (MPa)

E on mitoitettavan kerroksen materiaalin E – moduuli (MPa)

h on mitoitettavan kerroksen paksuus (m)

Rakennekerroksien kerrospaksuus vaihtelee Odemarkin kantavuuskaavaa käytettäessä 150...300 mm välillä. Kerrospaksuus ei saa olla 150 mm ohuempi. Sidottujen tai osittain sidottujen kerrosten E -moduuli on enintään $n \cdot E_A$, missä n saadaan taulukosta 1. Bitumilla sidotut kerrokset, joiden E -moduuli on suurempi kuin 1500 MPa, lasketaan yhtenä kerroksena, jonka E -moduuliksi lasketaan moduulien kerrospaksuuksilla painotettu keskiarvo. Sementillä tai masuunikuonalla sidottujen kerroksien E -moduulit on esitetty taulukossa 1. (Liikennevirasto 2018a)

Taulukko 1. Sidottujen kerroksien E -moduulien arvot (Liikennevirasto 2018a).

Materiaali	Lyhenne	E [MPa]*
Komposiittistabilointi 1	KOST 1	900 $E_A \geq 70, n = 13$
Komposiittistabilointi 2	KOST 2	1250 $E_A \geq 70, n = 18$
Bitumiemulsiostabilointi 1	BEST 1	700 $E_A \geq 70, n = 10$
Bitumiemulsiostabilointi 2	BEST 2	1050 $E_A \geq 70, n = 15$
Masuunihiekkastabilointi 1	MHST 1	600 $E_A \geq 80, n = 7,5$
Masuunihiekkastabilointi 2	MHST 2	1200 $E_A \geq 80, n = 15$
Sementtistabilointi 1	SST 1	1500 $E_A \geq 80, n = 18$
Sementtistabilointi 2	SST 2	3500 $E_A \geq 100, n = 35$

*Rakenteen mitoituksessa käytettävä materiaalin E -moduuli (MPa), jos stabiloidun kerroksen alustan kantavuus E_A on vähintään samassa solussa mainittu arvo. Jos E_A on pienempi, mitoituksessa käytettävä E -moduuli on $n \cdot E_A$.

Routamitoituksen tarkoituksena on estää routimisesta aiheutuvien vaurioiden muodostuminen päällysrakenteeseen. Tierakenteen mitoituksessa routiminen otetaan huomioon arvioimalla pohjamaan routaturpoamaa (t), laskennallisen routaantuvan alusrakennekerroksen paksuutta (P) ja tierakenteen laskennallisen routanousun suuruutta (RN_{lask}) sekä vertaamalla sitä sallittuun laskennalliseen routanousuun (RN_{sall}). Routaturpoama (t) on esitetty taulukossa 2, joka kuvaa kuinka monta prosenttia maakerroksen paksuus kasvaa kerroksen jäätyessä. Routaantuvan alusrakennekerroksen paksuus määräytyy mitoitettavan roudansyvyyden (S) ja päällysrakenteen laskennallisen paksuuden (R_{red}) tulona kaavan (2) mukaan. Roudansyvyys on esitetty kuvassa 7. (Liikennevirasto 2018a.)

$$P = S - R_{red} \quad (2)$$

Missä,

P on Routaantuvan alusrakennekerroksen paksuus (mm)

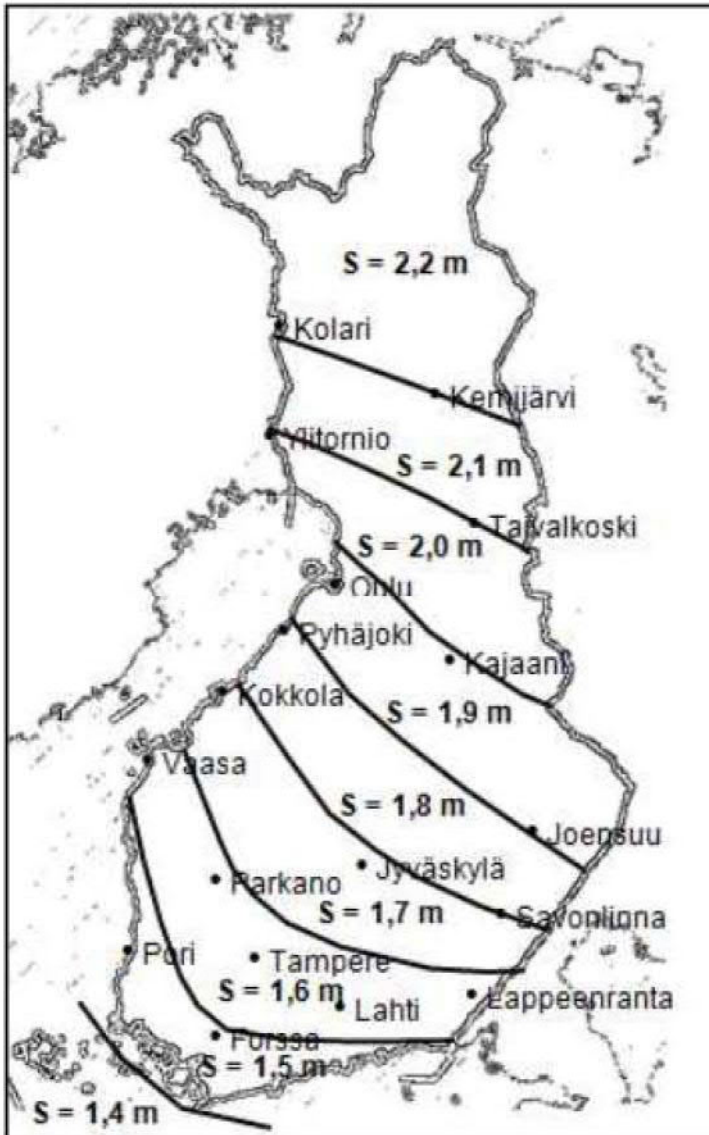
S on Mitoittava roudan syvyys kuvasta 7 (mm)

R_{red} on rakenteen laskennallinen, muunnettu kokonaispaksuus (mm)

Taulukko 2. Alusrakenteen routaturpoama (Liikennevirasto 2018a).

Routaturpoama t^*		Alusrakenneluokka		Alusrakenne
Kuiva	Märkä	Kuiva	Märkä	
0	3	D	E	SrMr, srHkMr
3	6	E	F	SrMr, srHkMr
6	12	F	H	siSrMr, sisrHkMr
3	3	E	E	Hk, HkMr
6	12	F	H	Hk, HkMr
6	12	F	H	siHk, siHkMr
12	16	H	J	Si, SiMr
-	6	-	F	Jäykkä Sa
-	6	-	G	Pehmeä Sa
-	6	-	G	Lieju

*Alusrakenteen kuivatusolosuhteet voivat olla kuivat tai märät. Kuivatusolosuhteet määräytyvät pengerkorkeuden, vesipintojen korkeuksien ja pohjamaan kosteustilan perusteella.



Kuva 7. Tierakenteen mitoittava roudansyvyys (S) (Liikennevirasto 2018a).

Päällysrakenteen laskennallinen routanousu (RN_{lask}) määritetään kaavalla 3:

$$RN_{lask} = P \cdot t / 100 \quad (3)$$

Missä,

P on Routaantuvan alusrakennekerroksen paksuus (mm)

t on alusrakenteen routaturpoama (%) taulukosta 2.

Sallittu routanousu on esitetty taulukossa 3. Sallittuun routanousuun vaikuttaa tien vaatimusluokka, joka määräytyy liikennemäärästä, ajonopeudesta ja rakenteen tyypistä, pohjamaan tasalaatuisuudesta, tierakenteen vaurioitumisherkkydestä sekä siitä onko rakenne louherakenne, lämpöeristetty tai vaurioitumisherkkä rakenne. Tien routimista ennaltaehkäistään muun muassa käyttämällä riittävän paksuja sekä lämpöä eristäviä rakenteita, raudoitettuja päällysrakenteita, pohjamaan tasaamista sekä pohjaveden virtausten säätelyä. (Liikennevirasto 2018a.)

Taulukko 3. Sementtistabiloidun kerroksen mitoituksessa suurimmat sallitut routanousut (Liikennevirasto 2018a).

Tie	Suurin sallittu laskennallinen routanousu (RN_{sall})
Moottoritieväylät	30
Päätiet	70
Seututiet 80...100 km/h	70
Seututiet 60 km/h	70
Yhdystiet	100
Reunatuellinen, 80 km/h	30
Reunatuellinen, 50...70 km/h	70
Reunatuellinen, alle 50 km/h	70
Viemäröity tai muita viettoputkia sisältävä	70
Jalkakäytävä, päällystetty	70
Jalkakäytävä, korotettu	70

4 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit

4.1 Kalliomurske

Kalliomurske on murskattua kalliota, jota käytetään laajasti tienrakentamisessa rakennusmateriaalina. Suomessa kalliomurskeen raekoko vaihtelee yleisesti 0 mm ja 90 mm välillä. Kalliomurskeelle, jonka raekoko on 0-32 mm välillä käytetään lyhennettä KaM 0/32. Kalliomurskeen ominaisuudet vaihtelevat murskatun kallion laadun, tyyppin ja erilaisten louhintatapojen mukaan. (Thom 2008; Melander 2018.)

Tämä työ on osa EU Life IP CIRCWASTE-hanketta, ja aluksi työn runkoaineeksi suunniteltiin käytettävän jotain samassa hankkeessa tarkasteltavan tiehankkeen kantavan kerroksen mursketta. Aikataulullisista syistä jouduttiin todellisen kohteen sijasta valmistamaan itse alemman tieverkon kantavaa kerrosta muistuttava runkoaine. KaM 0/32 päätettiin hakea Destian Loviisan Koskenkylän murskaamolta. Murskaamolta haettu KaM 0/32 ei soveltunut sellaisenaan käytettäväksi työn kokeiden materiaaliksi liian hyvien ominaisuuksiensa (taulukko 4) takia. KaM 0/32 päätettiin aluksi katkaista 0/20 raekokoon ja tämän runkoaineen hienoainespitoisuuden ollessa liian alhainen siihen päätettiin lisätä 0/4 mm kivituhkaa (taulukko 5) nostamaan materiaaliseoksen hienoainespitoisuutta lähelle 10 p-%: a. Runkoaineen suhteutustyö on kuvattu kappaleessa 5.1. Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty kalliomurskeen 0/32 ja kivituhkan 0/4 ominaisuudet ja liitteessä 4 KaM 0/32 ja kivituhka 0/4 rakeisuuskäyrät.

Taulukko 4. Kalliomurske 0/32, Koskenkylä (Destia Oy 2018).

Ominaisuus	Suoritustaso (SFS-EN 13242)
Raekoko	0/32
Rakeisuus	G _A 85
Väliseulan raja-arvot ja sallitut poikkeamat tyyppikäyrästä	G _{TC} 20
Raemuoto	FI ₃₅
Kiintotiheys	NPD
Iskunkestävyys	LA ₂₀
Hienoaineksen määrä	f _S
Vedenimeytyminen	WA ₂₄₁
Jäädytys-sulatuskestävyys	hyväksytty, WA ₂₄₁
Koostumus/määrä	hyväksytty, kalimaasälpä 35 %, kvartsi 27 %, plagioklaasi 20 %, biotiitti 12 %, saussuriitti 4 %, opaakki 2 %
Happoliukoiset sulfaatit	AS _{NR}
Kokonaisrikki	S _{NR}
Radioaktiivinen säteily	I ₁ =0,67 I ₂ =0,27 I ₃ =0,10

Taulukko 5. Kalliomurske 0/4, Koskenkylä (Destia Oy 2018).

Ominaisuus	Suoritustaso (SFS-EN 13242)
Raekoko	0/4
Rakeisuus	G _F 85
Tyyppirakeisuuden poikkeama	G _{TC} 10
Raemuoto	NPD
Kiintotiheys	2,6...2,8 Mg/m ³
Puhtaus	

Hienoaineksen määrä	f_{16}
Hienoaineksen laatu	MB _{FNT}
Murtopintaisen rakeiden osuus	C_{NR}
Nastarengaskulutuskestävyys	NPD
Vedenimeytyminen	0,4
Jäädytys-sulatuskestävyys	hyväksytty, WA ₂₄₁
Koostumus/määrä	hyväksytty, plagioklaasi 50 %, kvartsi 40 %, biotiitti 8 %, kloriitti 1 %, muut 1 %
Radioaktiivinen säteily	I ₁ =0,67 I ₂ =0,27 I ₃ =0,10

4.2 Sementti

Sementillä tarkoitetaan hydraulista sideainetta, joka veden kanssa reagoidessaan muodostaa seoksen, joka sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktion kautta (Suomen standardisoimisliitto SFS 2012). Sementin valmistus aloitetaan murskaamalla kalkkikiveä pienempiin osiin. Murskattu kalkkikivi sekoitetaan saven, hiekan ja rautamalmin kanssa sekaisin muodostaen homogeenisen jauheen. Sekoittamisen jälkeen seos kuumennetaan 1400 -1600 C°:ssa uunissa, jossa muodostuu klinkkeriä. Klinkkeri jäädytetään ja sen joukkoon lisätään pieni määrä kipsiä, jolla säädetään sementin sitoutumisaikaa. Kipsin jälkeen lisätään vesi, joka hydrataatio prosessin seurauksena lujittaa sementin. (University of Illinois 1993.) Sementin kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 6.

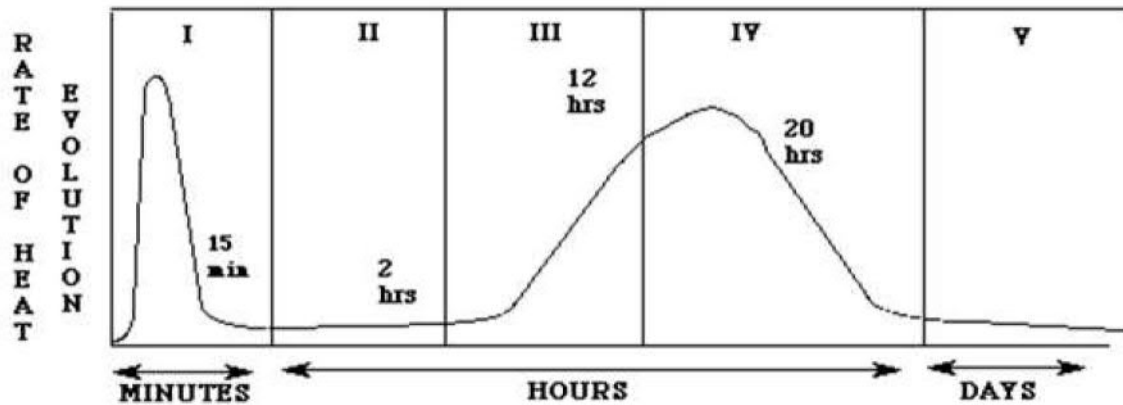
Taulukko 6. Sementin kemiallinen koostumus (Aalto yliopisto 2016).

Kemiallinen komponentti	Tyypillinen raaka-ainemateriaali	kemiallinen kaava	massaprosentti [%]
Kalkki tai kalsium oksidi	Kalkkikivi, kalkki, savikivi	CaO	60-70
Silikaatti	Hiekka, savi	SiO ₂	17-25
Alumiini	Bauksiitti, kierrätetty alumiini, savi	Al ₃ O ₂	3-8
Rauta	lentotuhka, savi, rautamalmi	Fe ₂ O ₃	0,5-6,0
sulfaatti	Kipsi	SO ₃	0,5-1,3
Vesi		H ₂ O	

Hydrataatio on kemiallinen reaktio, jossa sementin seokset muodostavat sidoksia veden molekyylien kanssa. Kuvassa 8 on esitetty sementin ja veden välinen hydrataatio reaktio, johon kuuluu viisi vaihetta.

1. C₃A ja C₃S hydrataatio. Veden lisäämisen seurauksena tapahtuva nopea lämpeneminen, joka kestää 7-15 minuuttia. Hydrataation reaktiotuotteena sementtikiteiden ympärille muodostuu amorfinen kerros, joka estää seoksen liiallisen liukenemisen.
2. Indusoitumis periodi, joka kestää 1-2 tuntia ja jonka aikana hydrataatio ei ole aktiivisesti käynnissä. Periodin aikana sementistä valmistettava betoni on helposti kuljetettavassa plastisessa muodossa.
3. Noin 12 tuntia kestävä vaihe, jonka aikana hydrataatio prosessi kiihtyy ja joka määrittelee lopullisen lujuuden.

4. Määrittelee hydrataatio prosessin seurauksena materiaalin rakenteen ja sementin varhaisen lujuuden. Kestää noin 20 tuntia. Täysin riippuvainen diffuusiosta.
5. Vakaa viimeinen vaihe, jonka aikana hydrataatio on saavuttanut lopullisen formaationsa. Lämpötilalla on vähän vaikutusta hydrataatioon tässä vaiheessa. (University of Illinois 1993.)



Kuva 8. Portland sementin hydrataatio reaktio (University of Illinois 1993).

Euroopassa käytetään standardin EN 197-1 mukaisia laatuvaatimuksia eri sementtiseoksille. Nämä sementtiseokset voidaan jakaa viiteen eri kategoriaan, jotka on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Eri sementtien koostumus standardin EN 197-1, mukaan jaoteltuna (Aalto yliopisto 2016).

Merkintä	Sementtityyppi	Koostumus	
		klinkkeri [%]	Muut materiaalit kuin klinkkeri
CEM I	Portlandsementti	95-100	-
CEM II	Portlandseossementti	65-94	Jopa 35 % muita materiaaleja kuin sementtiä, kuten masuunikuona tai lentotuhka
CEM III	Masuunikuonasementti	5-64	36-95 % masuunikuonaa
CEM IV	Pozzolaanisementti	45-89	11-65 % pozzolaanisia materiaaleja, kuten silikaatit tai alumiinisilikaatit
CEM V	Seossementti	20-64	Sekoitus 18-50 % masuunikuonaa ja 18-50 % pozzolaanisia materiaaleja tai lentotuhkaa

Suomessa yleisimmin käytössä olevat sementtiseokset ovat Plussementti (CEM II), yleissementti (CEM II), rapidsementti (CEM II), pika sementti (CEM I), Megasementti (CEM I), SR-sementti (CEM I) ja valkosementti (CEM I). Eri sementtiseokset eroavat toisistaan varhaislujuuden ja koostumuksen suhteen. Tässä työssä ollaan käytetty Plussementtiä, joka on normaalisti kovettuvaa Portlandsementtiä. Plussementti on yleisimmin käytetty rakennussementti, joka sisältää 15 – 25 %:a masuunikuonaa. (Aalto yliopisto 2016.)

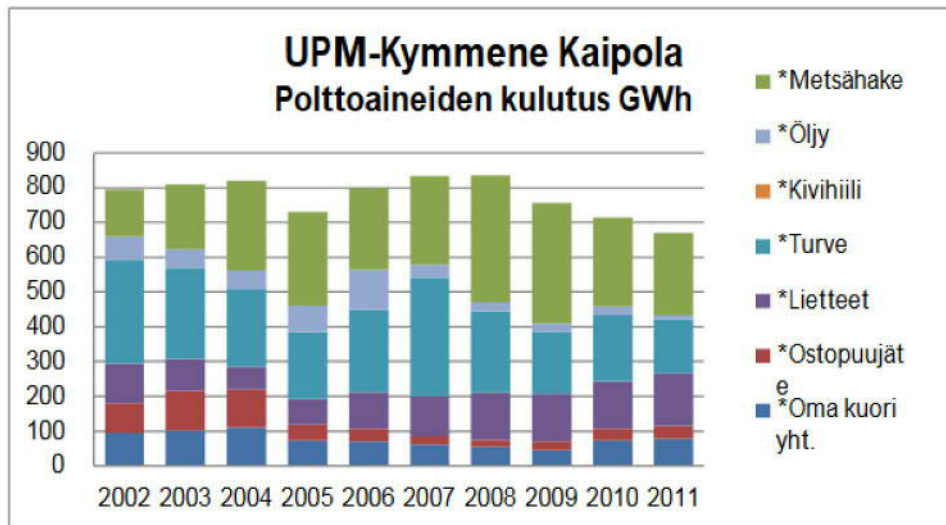
Stabiloinnissa sementtiä käytetään sellaisenaan tai aktivaattorina yhdessä muiden sideaineiden kanssa. Sementillä sidotun rakenteen hyviä ominaisuuksia ovat muun muassa suuri puristuslujuus sekä suuri kimmomoduuli, pieni palautumaton painuma kuormitettaessa, kyky vastustaa deformaatiota sekä alhainen murtovenymä. Sementillä stabiloidun tien rakennekerroksen huonoina puolina voidaan pitää sementtistabiloidun materiaalin herkkyyttä halkeilulle. (Tielaitos 1992.) *Päälysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeen mukaan stabiloinnissa käytettävän sementin tulee olla portland- tai portlandseossementtiä. Myös masuunikuonasementtejä voidaan käyttää stabiloinnissa, joskin masuunikuonasementtejä käytettäessä tulee huomioida, että hydraulisten sideaineiden kokonaismäärästä masuunikuonajauhetta saa olla enintään 70 %. Masuunikuonasementin kanssa ei saa käyttää erikseen sideaineena masuunikuonajauhetta. Ohjeen (Tiehallinto 2007) mukaan sementtistabiloinnin tulee täyttää seuraavat vaatimukset: 7 vuorokauden ikäisenä sementillä stabiloidun kerroksen puristuslujuuden tulee olla 3-8 MPa ja 28 vuorokauden ikäisenä puristuslujuuden tulee olla 5-13 MPa, ja sementtistabiloidun kerroksen tulee säilyttää 67 %:a puristuslujuudestaan pakkaskestävyyskokeiden jälkeen, kun näytteet ovat olleet lujittumassa 28 vuorokautta. Sementillä stabiloitavan näytteen säänkestävyyden varmistamiseksi sementtipitoisuuden tulee olla 4-5 p-%, jos stabiloitavan kiviaineksen hienoainepitoisuus on 5 % tai enemmän. Näytteiden sementtipitoisuus vaihtelee 2-5 p-% välillä riippuen näytteen muista sideaineista. Sementtipitoisuuden vaihtelulla haluttiin saada mahdollisimman erilaisia tuloksia näytteiden välille. Kaikki näytteet lujittuivat 28 vuorokautta.

4.3 Lentotuhka

Energiateollisuuden polttoprosesseissa muodostuu sivutuotteena tuhkaa. Tuhka luokitellaan sen mukaan, kuinka tuhka on kerätty. Pohjatuhka kerätään kattilan pohjalta ja lentotuhka erotetaan savukaasuista. Toinen luokittelun peruste on lajitella tuhkat polttoprosessin polttoainekoostumuksen mukaan kivihiilen polton, seospolton tai rinnakkaispolton tuhkiin. Seospoltosta puhuttaessa tarkoitetaan tavanomaisten polttoaineiden polttamisesta syntyviä tuhkia ja rinnakkaispoltolla jätteiden ja tavanomaisten polttoaineiden rinnakkaispolttoa. (Ramboll 2012.) Lentotuhkan tekniisiin ominaisuuksiin, kuten lujittumisominaisuuksiin, vaikuttavat tuhkapartikkelin muoto, koostumus ja jakauma. Hienojakoiset tuhkat kuten kivihiilen lentotuhkat osallistuvat sementin reaktioihin nopeammin ja kokonaisvaltaisemmin kuin suuripartikkeliset tuhkat. Tuhkan partikkelikoon lisäksi lentotuhkan lujuusominaisuuksiin vaikuttaa tuhkan kemiallinen koostumus. (Tarkkio 2014.) Lentotuhkat voidaan jakaa kemialliselta koostumukseltaan silikaattipitoisiin ja kalkkipitoisiin lentotuhkiin. Silikaattipitoiset lentotuhkat ovat luonteeltaan pozzolaanisia, jolloin ne lujittuvat ja kovettuvat kalsiumoksidien ja hydroksidien vaikutuksesta. Kalkkipitoiset lentotuhkat ovat luonteelta joko pozzolaanisia tai hydraulisia, jolloin ne lujittuvat ja kovettuvat pelkän veden vaikutuksesta. (Rakennustieto 2018.) Tässä työssä lentotuhkaa ei olla käytetty yksinään stabiloitavana sideaineena, vaan yhdessä sementin, kipsin ja masuunikuonan kanssa.

Tässä työssä käytetään Kaipolan UPM-Kymmene Oyj paperitehtaan seospolton lentotuhkaa. Vuonna 2008 Kaipolan UPM-Kymmene Oyj tuotti 69 % energiastaan biopolttoaineilla. Turpeen osuus poltettavasta polttoaineesta on vaihdellut vuosittain 26 – 41 %:iin ja lietteiden osuus 8 – 16 %. Seospolton raaka-ainemateriaalit riippuvat niiden saatavuudesta. Kuvassa 9 on esitetty Kaipolan polttoaineiden kulutus vuosilta 2000 – 2011. Metsä- ja turveteollisuuden tuhkien laatu vaihtelee suuremmin kuin kivihiilen poltosta aiheutuvien tuhkien ominaisuudet. Tuhkan laadun suuri vaihtelu on seurausta seospoltossa käytettävästä raaka-ainemateriaalista, joka metsäteollisuudessa voi vaihdella suuresti. Metsäteollisuudessa saatetaan seospolton

raaka-aineena käyttää turvetta, puuta, puun kuorta, öljyä ja kivihiiltä. (Aluehallintovirasto 2012.)



Kuva 9. Polttoaineen kulutus vuosina 2000 – 2011 (Aluehallintovirasto 2012).

4.4 Kipsi

Merkittävin Suomessa teollisuuden tuottama sivutuotekipsi on fosforikipsi, joka muodostuu apatiitin trikalsiumfosfaatin reagoitessa rikkohapon kanssa synnyttäen fosforihappoa ja dihydraattikipsiä. Fosfokipsiä valmistuu fosforihapon pesun ja suodatuksen sivutuotteena. Fosfokipsiä tavataan sekä dihydraattikipsin että hemihydraattikipsin muodossa. Dihydraattikipsi sisältää enemmän kidevettä, ja se syntyy alhaisemmissa lämpötiloissa kuin hemihydraattikipsi. Fosfokipsi toimii maanrakentamistarkoituksiin ainoastaan seostettuna tai sideaineena. Lisäksi se vähentää kaupallisten stabilointiaineiden, kuten sementin, hankintaa ja toimii muiden sideaineiden kanssa yhdessä stabiloitavaa maata lujittavana tekijänä. (Ramboll 2012; Harju 2017) Tässä työssä käytettiin Yara Siilinjärven tuotantoprosessin dihydraattikipsiä yhdessä sementin, lentotuhkan ja masuunikuonan kanssa. Dihydraattikipsin hyödyntämistä kantavan kerroksen stabiloinnin sideaineseoksessa on tarkasteltu mm. Harjun (2017) diplomityössä. Harjun mukaan kipsin käyttö tuhkapohjaisen sideaineseoksen osakomponenttina voi parantaa materiaaliaseoksen pitkän ajan lujuuskehitystä.

4.5 Suola

Suomessa tien liukkaudentorjuntakemikaaleina käytetään joko natrium- tai kalsiumkloridia. Natriumkloridin ja kalsiumkloridin tarkoituksena on edistää jään sulamista, estää tai hidastaa tien pinnan jäätymistä sekä lisätä tienpinnan ja renkaan välistä kitkaa. Suolan kykyyn ennaltaehkäistä jään muodostumista tai jään sulaminen perustuvat liuonnan suolan aiheuttamaan veden sulamispisteen pienenemiseen. Tällöin vesi ei jäädy uudelleen kyseisessä lämpötilassa, vaan tarvitsee jäätymiseen alhaisemman lämpötilan. Natriumkloridin lisäksi myös kalsiumkloridia käytetään teiden suolaamiseen. Suomessa kaikista liukkaudentorjunta-aineista kalsiumkloridin osuus on noin 13 %. Kalsiumkloridi on hygroskooppinen suola, ja se absorboi itseensä vettä hyvin nopeasti ja muuttuu kiinteäksi nesteeksi erittäin nopeasti. Muuntumisnopeutensa ansiosta kalsiumkloridi sulattaa jäätä nopeammin kuin natriumkloridi. Lisäksi kalsiumkloridi sitoo sulanutta vettä alhaisemmassa lämpötilassa ja ilmankosteudessa kuin natriumkloridi. Edellä mainittujen ominaisuuksien takia etenkin ns. mustan jään

ehkäisyssä käytetään kalsiumkloridia. Kalsiumkloridin pitoisuuden suolaliuoksessa tulee olla 32 % ja natriumkloridin noin 23 %. Kalsiumkloridin huonoja puolia ovat tien pinnan hidas kuivuminen, joka aiheutuu kalsiumkloridin kyvystä sitoa itseensä vettä ilmasta nopeammin kuin tien pinnasta ehtii haihtua. Toinen kalsiumkloridin haittavaikutus on sen korroosiovaikutus, joka on voimakkaampi kuin natriumkloridilla. (Tiehallinto 2006; Liikennevirasto 2017a.) Tässä työssä käytetään suola-pakkaskestävyyskokeiden suolaliuoksessa natriumkloridia, joka valittiin sen helppokäyttöisyyden ja saatavuuden takia. Lisäksi natriumkloridi on yleisin käytössä oleva liukkaudentorjunta-aine Keski- ja Etelä-Suomessa. (Liikennevirasto 2017a.)

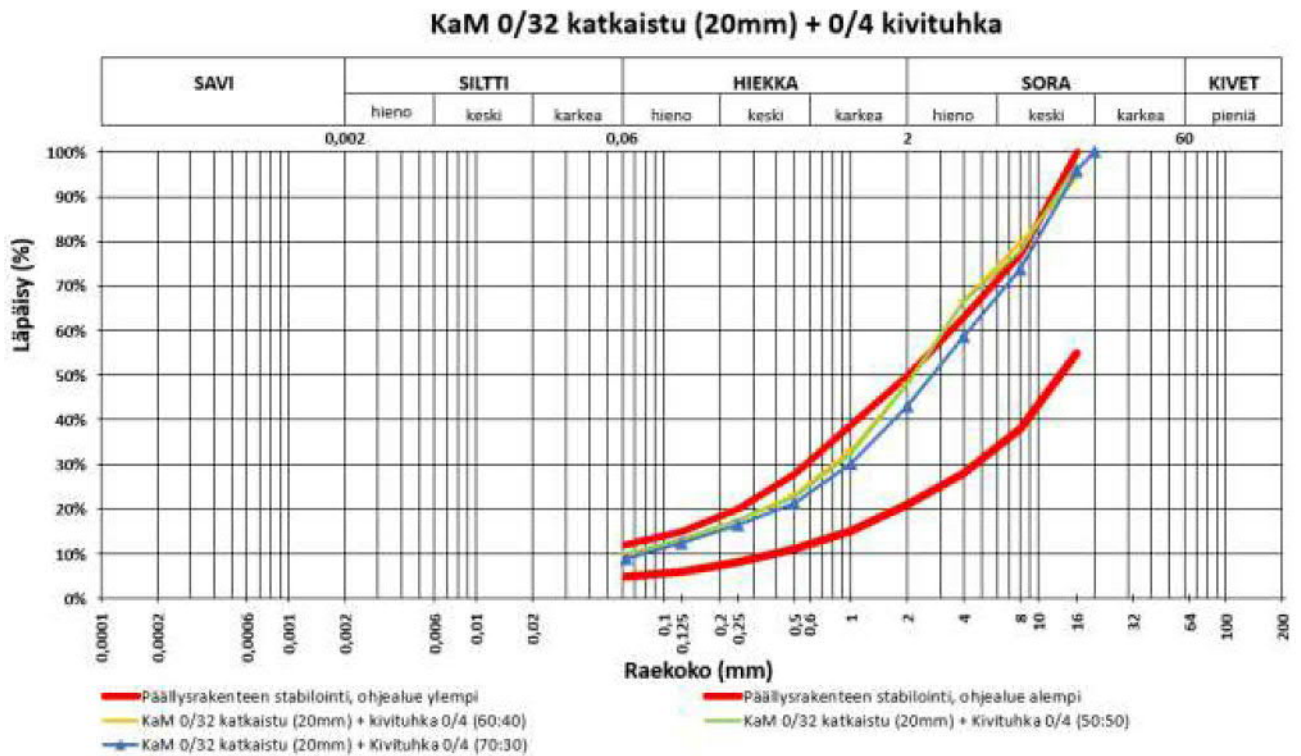
4.6 Masuunikuona

Raudan valmistuksen sivutuotteena syntyy masuunikuonaa, joka sisältää rautarikasteen sivukiveä sekä kalkkikiveä. Masuunikuona sisältää piitä, kalsiumia, alumiinia ja magnesiumin oksideja. Pienempinä pitoisuuksina masuunikuona sisältää titaania, alkaleita, mangaania ja rikkiä. Masuunikuonan hydraulisiin ominaisuuksiin vaikuttaa kemiallisen koostumuksen lisäksi valmistusprosessi ja kuonapartikkelin raekoko. Masuunikuonan valmistusprosessissa nopea vesijäähdytys tekee masuunikuonan rakenteesta lasimaisen ja huokoisen. Kuonapartikkelin pieni koko vaikuttavaa positiivisesti hydrauliseen sitoutumiseen, koska hienoainesmäärän kasvaessa myös veden kanssa reagoitavan pinnan ala kasvaa. Muihin hydraulisiin sideaineisiin verrattuna masuunikuonan sitoutuminen on hitaampaa, ja sitoutumislämpö on selkeästi pienempi. Pieni raekoko ja aktivaattorin, kuten sementin, kalkin tai kipsin, käyttäminen kiihdyttävät sitoutumisreaktiota. Ilman aktivaattoria kuonajauhe muodostaa yhdessä veden kanssa huonosti vettä läpäisevän kerroksen kuonarakenteen pinnalle. Kerros estää veden imeytymisen ja näin ollen hydrataatioprosessin. Aktivaattorin ensisijainen rooli on ylläpitää ja nopeuttaa hydrataatioprosessia. (Mäkelä & Höynälä 2000; Mäkikyö 1995.)

5 Laboratoriotutkimukset

5.1 Runkoaineen suhteutus

Stabiloidun kantavan kerroksen pakkaskestävyyskokeiden runkoaineena käytettiin Destian Koskenkylän murskaamalla valmistettua 0/32 mm kivimurskettä, joka kuivattiin, homogenisoitiin ja katkaistiin 0/20 raekokoon laboratoriossa. Runkoaineen suhteutuksessa päädyttiin käyttämään 40 %:a katkaistua 0/20 KaM:a ja 60 %:a 0/4 kivituhkaa. Ennen lopulliseen runkoaineeseen päätymistä tehtiin kalliomurskeesta ja kivituhkasta erilaisia suhteutuksia, jotka on esitetty kuvassa 10. Kivituhkan lisäämisellä tavoiteltiin noin 10 p-%:n hienoainepitoisuutta kuitenkin nostamatta runkoaineen rakeisuuskäyrää karkeammasta päästä *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa asetetun ohjealueen yläpuolelle. Hienoaineksen nostaminen runkoaineessa mahdollisimman lähelle 10 p-%:a pidettiin tutkimuksen kannalta tärkeänä, jotta runkoaineena käytettävä materiaali olisi ominaisuuksiltaan mahdollisimman lähellä heikkolaatuisen tierakenteen kantavan kerroksen murskettä, jonka eräänä parantamisvaihtoehtona voisi olla stabilointi. Koska stabiloinnin runkoaineen hienoainepitoisuuden on todettu vaikuttavan stabiloinnin lopputulokseen, hienoainepitoisuuden keinotekoisesti kasvattamisen avulla tavoiteltiin sitä, että tutkimuksessa tarkasteltavien sideaineseosten lujittumisvaikutuksissa havaittaisiin eroavaisuuksia eri sideaineiden välillä. Tutkimuksessa käytettäväksi runkoaineeksi valittiin katkaistun KaM 0/32 (20mm) ja 0/4 kivituhkan seosta 40:60. Tällöin rakeisuuskäyrä nousi karkeammasta päästään ohjealueen yläpuolelle, mutta hienoainepitoisuus saatiin pidettyä mahdollisimman lähellä tavoiteltua 10 p-%:a. Runkoaineen rakeisuuskäyrä on esitetty kappaleessa 6.1 kuvassa 18.



Kuva 10. Katkaistun KaM 0/32 (20 mm) ja 0/4 kivituhkana materiaaliseosten rakeisuus.

5.2 Koekappaleiden valmistus ja tiivistäminen

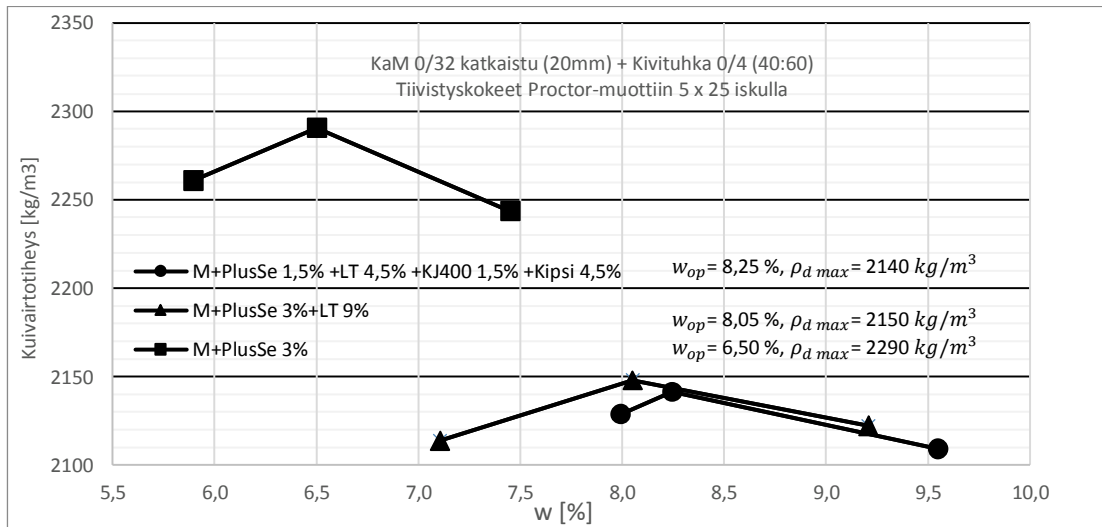
Työssä tutkittiin kolmen eri sideaineseosten soveltuvuutta työssä käytetyn murskeen stabilointiin. Tutkimuksessa sideaineina käytettiin sementtiä, lentotuhkaa, kipsiä ja masuunikuonaa. Eri sideaineseokset muodostuivat 1) sementistä, 2) lentotuhkasta ja sementistä sekä 3) sementistä, lentotuhkasta, kipsistä ja masuunikuonasta. Murskeen ja sementin seoksen sementtipitoisuus stabilointimassassa oli 2-5 p-%, joka on *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeen suosittelema sementtipitoisuus sementtistabiloinnissa. Murskeen ja sementin stabilointimassaa käytettiin tämän työn referenssimateriaalina.

Koekappaleissa käytetyn lentotuhkan pitoisuus stabilointimassasta oli 6-9 p-% ja kipsin 3-4,5 p-%. Lentotuhkan ja kipsin pitoisuuksien määrittämisessä hyödynnettiin Ramboll:n vuonna 2012 julkaisemaa Tuhkarakentamisen käsikirjaa sekä Ramboll:n tekemää *LTU, Ekoinfo II KYVO:n lentotuhkan hyödyntäminen vanhan tierakenteen stabiloinnissa (2006)* -raportissa saatuja tuloksia. *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeen mukaan masuunihiekan pitoisuuden tulee olla 4-10 p-% stabilointimassasta. Työssä käytettiin masuunihiekan sijasta hienompirakeista masuunikuonaa yhdessä muiden sideaineiden kanssa, jolloin masuunikuonan pitoisuus stabilointimassasta oli 1,5-2,0 p-%. Koekappaleissa käytettyjen sideaineiden pitoisuudet on esitetty taulukossa 8. Koekappaleiden valmistusvaiheen dokumentoidut mittaustulokset on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 8. Koekappaleiden sideainepitoisuudet.

Tunniste	Seos	Sementti [%]	Lentotuhka [%]	Kipsi [%]	Masuunikuona
MS1	Murske + Sementti	2	0	0	0
MS2	Murske + Sementti	3	0	0	0
MS3	Murske + Sementti	5	0	0	0
MSL1	Murske + Sementti + Lentotuhka	2	6	0	0
MSL2	Murske + Sementti + Lentotuhka	3	6	0	0
MSL3	Murske + Sementti + Lentotuhka	3	9	0	0
MSL4	Murske + Sementti + Lentotuhka	4	8	0	0
MSKLM1	Murske + Sementti + Kipsi + Lentotuhka + Masuunikuona	1,5	3	3	1,5
MSKLM2	Murske + Sementti + Kipsi + Lentotuhka + Masuunikuona	1,5	4,5	4,5	1,5
MSKLM3	Murske + Sementti + Kipsi + Lentotuhka + Masuunikuona	2	4	4	2

Koekappaleiden maksimikuivairtoteheys ja optimivesipitoisuus määritettiin parannetulla Proctor-kokeella standardin SFS EN 13286-2 mukaan. Kokeessa Proctor-muotin halkaisija oli 100 mm ja korkeus olivat 100 mm ja tiivistystyömäärä 5 kerrosta 25 iskua kerros. Maksimikuivairtoteheys ja optimivesipitoisuus määritettiin kolmella eri sideaineseokselta. MS2, MSL3 ja MSKLM2. Seosten optimivesipitoisuudet ja maksimikuivairtoteheydet on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Murskeen, sementin, lentotuhkan, masuunikuonan ja kipsin seosten optimivesipitoisuus ja maksimikuivavirttiheys.

Koekappaleiden maksimikuivavirttiheyden ja optimivesipitoisuuden määrittämisen jälkeen kokeissa käytettävät koekappaleet valmistettiin ICT-kiertotiivistimellä (Intensive Compaction Tester). ICT-kiertotiivistin on suomalaisvalmisteinen kiertotiivistinlaite, jolla tavallisesti valmistetaan maamassojen sekä niistä side- ja lisäaineiden kanssa valmistettujen massojen tiivistymistä. Kokeessa tutkittava massa annostellaan pyöreään näytesylinteriin, jonka pohjalle ja päälle asetetaan pyöreät metallilevyt. ICT-kiertotiivistimen mäntä puristaa kansilevyä tasaisella paineella, jolloin sylinteriin annosteltu massa tiivistyy kokoon. Männän puristaessa näytettä sylinteri pyörii hienoisessa kulmassa itsensä ympäri. Sylinterin pyöriminen ja männän tasainen puristus aikaansaavat koekappaleessa tasaisen muodonmuutosliukuman, jonka suunta pyörii työkierron mukaan. Näin ollen liukuma ja männän paine tiivistävät yhdessä näytettä. ICT-kiertotiivistimen kaikkia parametrejä voidaan muuttaa. Työssä kiertotiivistimen keskimääräiseksi aksiaalipaineeksi valittiin 600 kPa ja liikekulman arvoksi 2,29°. (Tiehallinto 2001b.) Kuvassa 12 on esitetty tässä työssä käytetty ICT-kiertotiivistin.



Kuva 12. ICT-kiertotiivistin (valokuva Kortelainen 2018).

Päällysrakenteen stabilointi (2007) -ohjeen mukaan sementtistabiloidut koekappaleet tulee ICT-kiertotiivistimellä tiivistää 96 % tiiveyteen. Tällöin koekappaleiden tiiveys vastaa hydraulisilla sideaineilla stabiloidun kantavan kerroksen työmaaolosuhteissa saavutettavaa tiiveyttä. Koekappaleiden 96 % tiiveysaste laskettiin Proctor-kokeissa saaduilla maksimikuivairtoteheyksillä. Kun tiedettiin stabilointimassan maksimikuivairtoteheys ja koekappaleen tilavuus voitiin kaavalla 4 laskea koekappaleen massa (m). Koska koekappaleet haluttiin saada 96 % tiiveysasteeseen kerrottiin saatu massa (m) 0,96. Massojen valmistuksessa punnittiin ensin runkoaine, sitten sideaineet ja viimeiseksi vesi. Tämän jälkeen massaa ravistettiin muovipussissa minuutin ajan, jonka jälkeen se kaadettiin muottiin, joka asetettiin ICT-kiertotiivistinkoneeseen. Tiivistämisen jälkeen koekappaleita säilytettiin muovipusseissa, jotka suljettiin kosteuden haihtumisen estämiseksi. Koekappaleet lujittuivat 28 vuorokautta huoneenlämmössä. Kuvassa 13 on esitetty koekappaleiden säilytysolosuhteet.

$$m = \frac{\rho}{V} \quad (4)$$

Missä,

m on massa (g)

ρ on tiheys ($\frac{g}{mm^3}$)

V on tilavuus (mm^3)

Kokeiden runsaan lukumäärän johdosta päätettiin kokeita suorittaa kahdessa vaiheessa. Koekappaleiden mitat, massat ja koemenetelmä, on esitetty liitteissä 1 - 2. Ensimmäisessä vaiheessa jokaisesta koekappaleesta tehtiin 6 samanlaista kappaletta, joista kahta käytettiin määrittämään 28 vuorokauden puristuslujuus. Jäljellä olevasta neljästä koekappaleesta kolme laitettiin pakkaskaappiin. Kahdesta koekappaleesta määritettiin pakkaskestävyys ja kolmas pakkaskaapissa ollut koekappale säästettiin routanousukokeita varten. Toisessa vaiheessa valittiin ensimmäisen vaiheen tuloksien perusteella 7 eri seosta: MS1, MS2, MSL1, MSL2, MSL4, MSKLM1 ja MSKLM2.



Kuva 13. Koekappaleet säilytettiin muovipusseissa huoneenlämmössä (valokuva Kortelainen 2019).

5.3 Puristuslujuus

Koekappaleiden puristuslujuuden määrittämiseen käytettiin Zwick ja Roell:n puristuslaitetta. Puristuslujuus määritettiin standardin SFS-EN 13286-41 mukaisesti, kuitenkin sillä erotuksella, että Zwick ja Rowll:n puristuslaitteen kuormitus tehtiin siirtymäohjattuna ja puristuksen kuormitusnopeus oli 1mm/min koko kokeen suorituksen ajan. Zwick ja Rowll:n puristuslaite ja koekappaleiden kipsaus on esitetty kuvassa 14. Ennen koekappaleiden puristamista niiden ylä- ja alapääts kipsattiin. Kipsauksen tarkoituksena oli varmistaa mahdollisimman tasainen puristaminen, jotta pintojen epätasaisuudet eivät vaikuttaisi koekappaleiden puristuslujuuteen.

Puristuslaite mittaa puristusvoiman (F), jossa koekappaleet murtuvat. Puristusvoiman (F) ja koekappaleen pinta-alan (A) avulla pystytään laskemaan näytteen murtumiseen vaadittava puristusjännitys (σ). Kaavassa 5 on esitetty puristusjännityksen laskeminen.

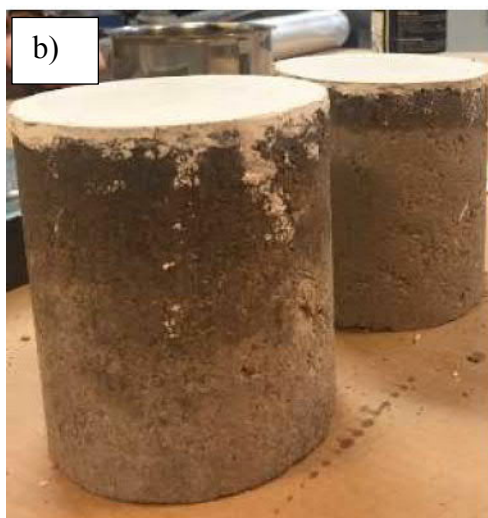
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

missä

σ on puristusjännitys (MPa)

F on puristusvoima (N)

A on koekappaleen poikkipinta – ala (mm²)

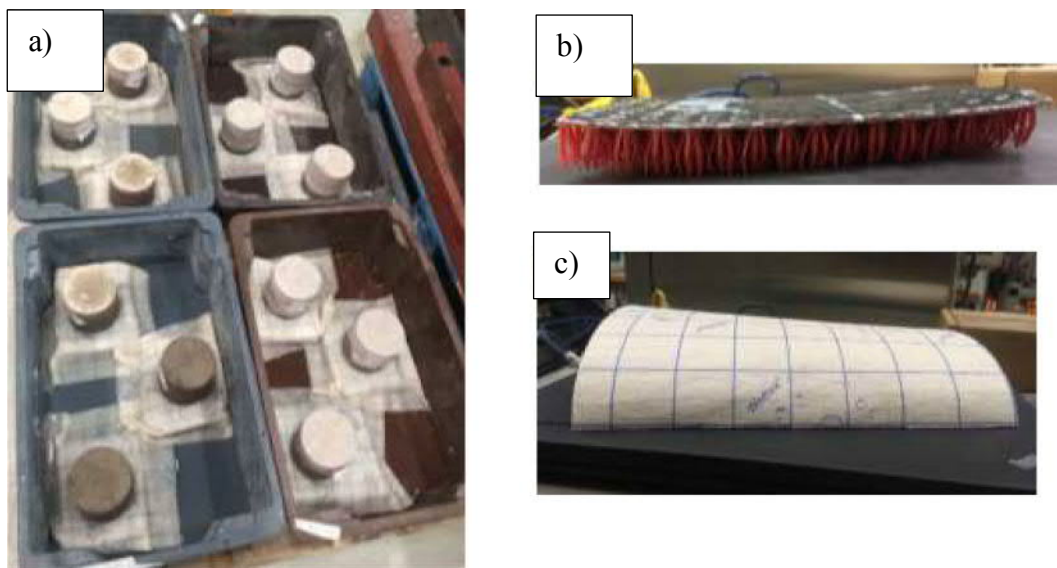


Kuva 14. Zwick & Roell puristuslaite (a) sekä koekappaleiden päiden tasoitus kipsilaastilla ennen purituslujuuden määrittämistä (b) ja (c) (valokuvat Kortelainen 2018).

5.4 Pakkasrapautumiskestävyys

Pakkasrapautumiskestävyyskoe tehtiin VTT:n (*Tien rakennekerroksissa käytettävän hydraulisesti sidotun materiaalin pakkas-sulamiskestävyyskokeen suoritus*) menetelmäehdotuksen mukaisesti. Testissä 28 vuorokauden lujittumisen jälkeen stabiloitu näytekappale asetetaan kapillaarisen maton päälle, josta näytekappale absorboi itseensä vettä kapillaarimaton kautta noin 4 tunnin ajan. Tämän jälkeen näytekappale laitetaan pakkaskaappiin -18 °C lämpötilaan. Näytekappale on pakkasessa noin 16 tuntia, jonka aikana näytekappale jäätyy. Pakkaskaapista näytekappale otetaan ulos huoneenlämpöön ja asetetaan kapillaarimaton päälle sulamaan. Jäätymis-sulamisvaiheet toistetaan 12 kertaa. Näytekappaleita käännetään 180 ° jokaisen sulamisjakson alussa, jotta vesi imeytyisi molemmista päistä. Jäätymis-sulamiskierroksien jälkeen näytekappaleille suoritettiin yksiaksiaalinen puristuslujuustesti.

Toisen vaiheen pakkasrapautumiskestävyyskokeissa sulamisveteen lisättiin 7,5 p-% tai 15 p-% suolaa ja normaalin 12 syklin jäätymis-sulamisvaiheen lisäksi tehtiin 6- ja 24-syklin suola-pakkaskestävyyskokeita. Suola-pakkaskestävyyskokeiden aikana koekappaleita ei käännetty syklien välissä, vaan suolaveden annetaan imeytyä samalle pinnalle koko kokeen ajan. Kuvassa 15 on esitetty pakkasrapautumiskokeen koemenetelmä.

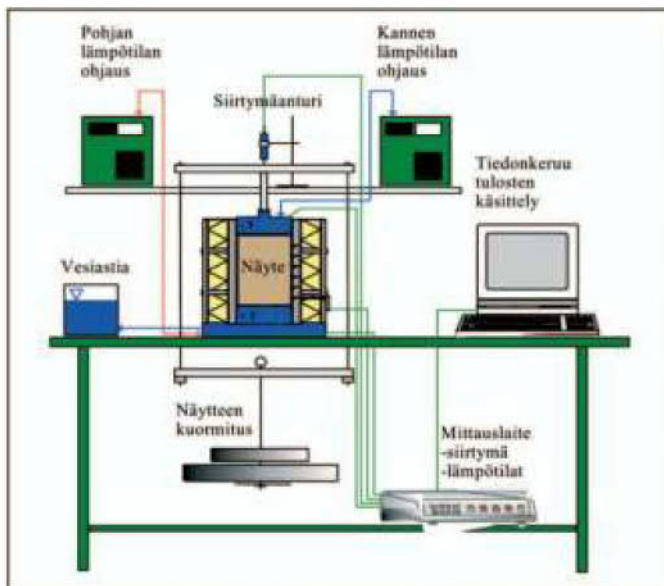


Kuva 15. Pakkasrapautumiskestävyyskokeen sulamisvaihe (a) ja kapillaarimattojärjestely (b) ja (c) (valokuvat Kortelainen 2019).

5.5 Routanousukoe

Koekappaleiden mahdollista routivuutta voidaan laboratorio-olosuhteissa testata routanousukokeilla. Routanousukoe koostuu kylmähuoneesta, jonne routakoelaitteisto sijoitetaan, kahdesta jäähdytyslaitteesta, joissa kierrätetään pakkasnestettä routasellin molemmissa päissä, itse routasellistä, jonka kansielementissä, että pohjaelementissä on lämpöanturit, jotka kirjaavat lämpötilan muutoksen muistiin, vesiastiasta, kuormituskehikosta sekä instrumentoinnista, joka sisältää lämpötila-anturit, siirtymäanturin ja

tiedonkeruujärjestelmän. Routaselli on teflonista ja PVC-muovista valmistettu halkaistava sylinteri. (Pesu 2010.) Aalto-yliopistossa käytössä oleva routanousukoejärjestely on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Routanousukokeen koejärjestely (Tiehallinto 2007).

Routanousukoe toteutettiin *Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 - 2001 (TPPT) (2001)* -menetelmällä. Lyhennetty versio menetelmästä on esitetty *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa nimellä routanousukoe menetelmä A. Poikkeuksena TPPT:ssä (2001) esiteltyyn menetelmään verrattuna, tässä tutkimuksessa ei suoritettu esiroutanousukokeita. Esiroutanousukoe suoritetaan silloin, jos näyte ei ole aikaisemmin joutunut routimaan tai jos näytekappale on löyhä, huonokuntoinen tai häiriintynyt. Tässä tutkimuksessa ei suoritettu esiroutanousukokeita, koska koekappaleille oli ennen routanousukokeen suorittamista tehty pakkasrapautumiskestävyyskoe tai suolapakkaskestävyyskoe. Routanousukokeen kesto on vähintään yhden vuorokauden, ja kokeen aikana mitataan lämpötiloja sekä routanousua, jota kannella tapahtuu. Koe lopetetaan, kun routarajan eteneminen on pysähtynyt vähintään neljäksi tunniksi. Routanousukokeesta haluttuja tuloksia ovat routanousun suuruus, roudansyvyys ja routimiskerroin. (Pesu 2010.) Routanousukokeita suoritettiin myös syklistenä, jossa jäädytyslaitteet säädettiin kierrättämään pakkasnestettä pohjaelementissä $+3/+6/+9$ °C:ssa ja kansielementissä $-1/-2/-3$ °C:ssa. Yhden syklikierroksen kesto oli kaksi päivää, jonka jälkeen pohja- ja kansielementissä kiertävän pakkasnesteen lämpötilaa muutettiin. Syklisten routanousukokeiden tarkoituksena oli selvittää koekappaleiden routaantumisherkkyyttä suuremmilla pakkasilla. Koekappaleen asentaminen routanousukoelaitteistoon on esitetty kuvassa 17.

Maan routivuutta kuvaa segregatiopotentiali, jolla tarkoitetaan maakerroksessa olevan veden kulkeutumista maakerroksessa. Segregatiopotentialiteoria on, että veden virtaus jäälinssin kasvaessa on suoraan verrannollinen jääntyneen maakerroksen lämpötilagradienttiin kaavan 6 mukaan. (Pesu 2010)

$$v_w = SP(t) \cdot gradT_f(t) \quad (6)$$

missä

v_w on veden virtausnopeus jäälinsseen ($\frac{m}{h}$)

$SP(t)$ on segregatiopotentiali ($\frac{m^2}{Kh}$)

$gradT_f(t)$ on osittain jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti ($\frac{K}{h}$)

Maan routivuutta kuvaa segregatiopotentialin lisäksi routimiskerroin (SP_0). Ero segregatiopotentialin (SP) ja routimiskertoimen (SP_0) välillä liittyy veden jäätymisestä aiheutuvaan 9 %:n tilavuudenkasvuun. Segregatiopotentialissa lämpötilagradientti määritetään vain osittain jäätyneestä maakerroksesta, kun taas routimiskerrointa laskettaessa lämpötilagradientti otetaan koko jäätyneestä kerroksesta. Routimiskertoimen laskenta on esitetty kaavassa 7.

$$SP_0 = \frac{v}{gradT} = \frac{dh/dt}{dT/z} \quad (7)$$

missä

SP_0 on routimiskerroin ($\frac{mm^2}{Kh}$)

Δh on routanousun muutos mittausvälin aikana (mm)

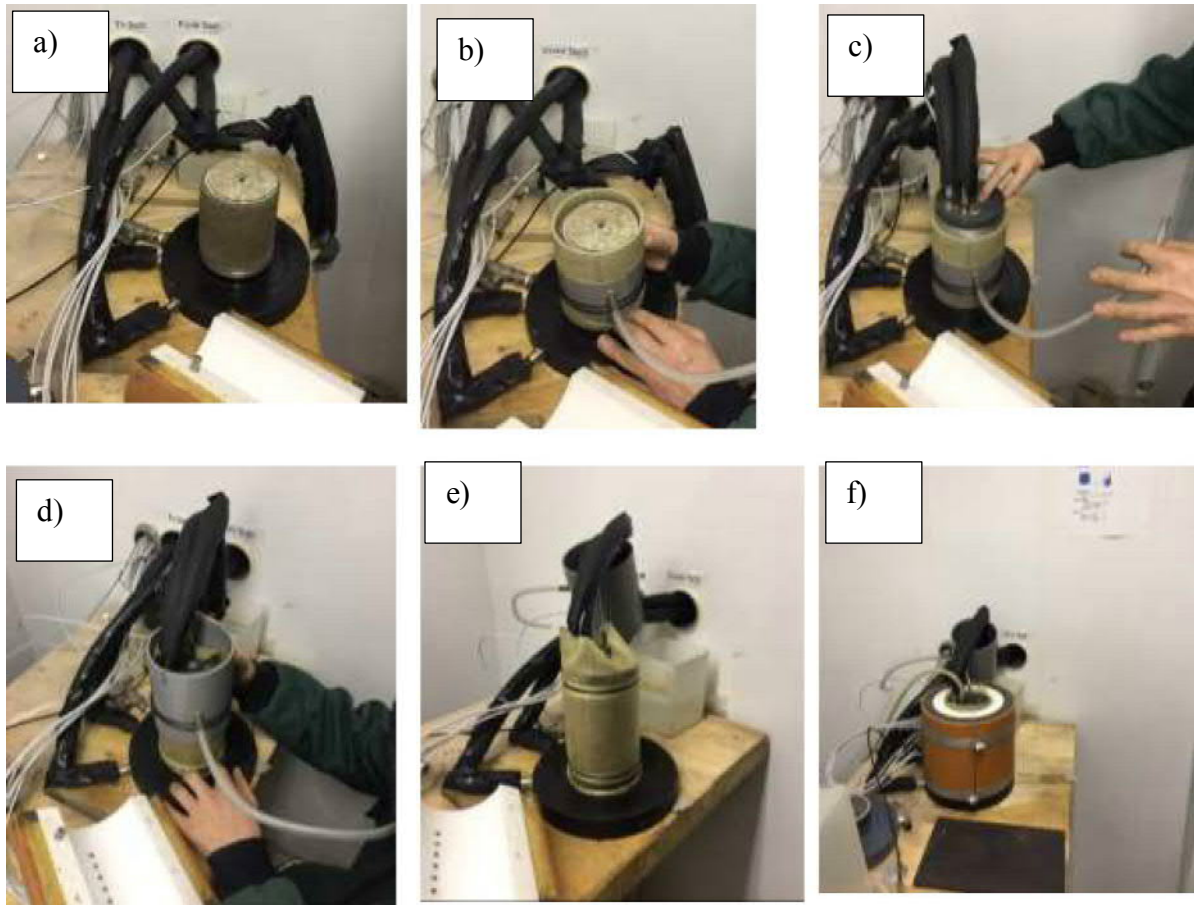
Δt on routanousun muutosta vastaava aikaväli tunteina (h)

T on kannen lämpötila ($^{\circ}C$)

Z_j on roudan syvyys jäätyneen näytteenosan korkeus (mm)

v on routanousunopeus ($\frac{mm}{h}$)

Tässä työssä näytekappaleiden routivuus määritettiin yllä esitettyllä kaavalla 7. Routimiskerroin määräytyy routanousunopeuden ja lämpötilagradientin lisäksi maassa vallitsevista jännityksistä. Tässä tutkimuksessa koekappaleisiin ei kohdistettu koelaitteista syntyneen kuorman lisäksi ylimääräistä kuormaa. (Pesu 2010.)



Kuva 17. Koekappaleen asettaminen routanoususelliin (a). Tiiviin kumimembraanin asettaminen koekappaleen ympärille muovisylinlerin avulla (b). Koekappaleen päälle asetetaan alumiininen kansi, joka nousee roudan mukana (c). Kumimembraanin tiivistäminen kumilenkkien avulla koekappaleeseen (d-e). Koekappaleen ja kumimembraanin ympärille asetetaan halkaistava routaselli (f). (valokuvat Kortelainen 2019.)

5.6 Suola-pakkaskestävyyskoe

Suola-pakkaskestävyyskokeet suoritettiin VTT:n (Tien rakennekerroksissa käytettävän hydraulisesti sidotun materiaalin pakkas-sulamiskestävyyskokeen suoritus) menetelmäehdotuksen mukaisesti, sillä erotuksella että suola-pakkaskestävyyskokeiden sulamisvesiin lisättiin 7,5 ja 15 massaprosenttia natriumkloridia, jota ei tehty pakkasrapautumiskestävyyskokeissa. Tässä tutkimuksessa haluttiin varmistaa, että saadaan eroavaisuuksia eri uusiomateriaalien välille, jolloin sulamisveden suolapitoisuus päätettiin nostaa erittäin korkealle. *Päällysteen stabilointi (2007)* -ohjeessa suola-pakkaskestävyyskokeiden sulamisveden suolapitoisuus on 1 massaprosenttia. Tässä tutkimuksessa lisätyn suolan määrä arvioitiin julkaisujen *Talvihoidon suoritteet ja kustannukset eri tyypeille* (Tiehallinto 2006) sekä *Maanteiden talvihoidon* (Liikennevirasto 2017a) perusteella.

Kantavaan kerrokseen imeytyneen suolan määrä selvitettiin Suomen vuotuisen sademäärän, talven aikana tapahtuvien suolauskertojen ja liukkaudentorjunta-aineena käytettävän suolaliuoksen suolan määrän avulla. Helsingin keskimääräinen sademäärä on 655 mm vuodessa (Ilmatieteenlaitos 2019) ja *Talvihoidon suoritteet ja kustannukset eri tyypeillä (2006)* -selvityksen mukaan tien suolaustoimenpiteitä oli kolmen vuoden aikana suoritettu yhteensä n.

153 kertaa, eli vuodessa 51 kertaa molemmille ajokaistoille. Tässä työssä on laskettu tien pinnan suolan määrä yhdelle neliömetrille, jolloin yhden neliömetrin suolaustoimenpide tehdään n. 26 kertaa vuodessa. *Maanteiden talvihoito (2017)* -selvityksen mukaan teille levitettävän suolaliuoksen määrä on 10 g/m^2 , jolloin suolaliuoksen suolan määrä on $2,3 \text{ g/m}^2$. Levitettävän suolaliuoksen määrä voi myös olla suurempi 40 g/m^2 , jolloin suolaliuoksen suolan määrä on $9,2 \text{ g/m}^2$. Kaavoilla 8-9 on määritetty yhden neliömetrin tien pinnan suolapitoisuus vuotuisen sademäärän jälkeen:

Kun levitettävän suolaliuoksen määrä on 10 g/m^2 .

$$1 \text{ m}^2 \text{ alalle} = \frac{(2,3 \cdot 26) \text{ g}}{0,655 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0001 \% \quad (8)$$

Kun levitettävän suolaliuoksen määrä on 40 g/m^2 .

$$1 \text{ m}^2 \text{ alalle} = \frac{(9,2 \cdot 26) \text{ g}}{0,655 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0004 \% \quad (9)$$

Yllä esitettyjen laskelmien perusteella yhden neliömetrin alueen suolapitoisuus on vuodessa $0,0001 \%$, kun liukkaudentorjuntaan käytettävän suolaliuoksen määrä on 10 g/m^2 tai $0,0004 \%$, kun liukkaudentorjuntaan käytettävän suolaliuoksen määrä on 40 g/m^2 . Tutkimukseen valittiin *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa esitettyä 1% suolapitoisuutta korkeammat suolapitoisuudet, jotta tutkimuksissa voitaisiin varmuudella havaita suolapitoisuuden vaikutukset koekappaleiden lujuuksiin. Suurempien suolapitoisuuksien valinta on arvioitu tässä tutkimuksessa olevan perusteltua, koska Kemi-Tornio moottoritieellä tehdyissä tutkimuksissa on mitattu stabiloidusta kantavasta kerroksesta jopa 750 mg/kg suolapitoisuuksia. Tutkitulla moottoritieosuudella levitettiin talvella 2001 – 2002 suolaa tielle keskimäärin noin $1,8 \text{ kg/m}^2$ ja suolauskertoja tuona talvena oli 94. (Luiro & Saarenketo 2003.)

Suola-pakkaskestävyyskokeiden syklien lukumäärän määrittämistä varten selvitettiin tierakenteen eri syvyydeltä mitattuja vuotuisia jäätymis-sulamiskertoja Suomen olosuhteissa. Liikenneviraston vuonna 2012 julkaiseman *Asfalttimassan kestävyys jäätymis-sulamista sekä veden kuormien yhteisvaikutusta vastaan* – julkaisun mukaan viitenä talvena vuosien 2003 – 2009 aikana jäätymis-sulamissyklejä esiintyi 5 cm:n syvyydellä maanpinnasta noin 14 kertaa talvessa (taulukko 9). Koska kantavan kerroksen jäätymis-sulamissykliin lukumäärästä ei ole tarkkaa tietoa, tässä tutkimuksessa testattiin koekappaleiden suola-pakkaskestävyyttä kolmella eri syklillä: 6-, 12-, ja 24-syklillä.

Taulukko 9. Päälyysrakenteen jäätymis-sulamissykliä lukumäärä viitenä talvena, kolmella eri syvyydellä päälyysrakenteen pinnasta (Liikennevirasto 2012).

Asema ID	Asema Nimi	Jäätymis-sulamissykliä lukumäärä (4 talvea, 3 jäätymis-sulamissyvyyttä ja 5 talvea)														
		Jäätymis-sulamissyvyys 2 cm				Jäätymis-sulamissyvyys 3 cm					Jäätymis-sulamissyvyys 5 cm					
		2003-2004	2005-2006	2007-2008	2008-2009	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2007-2008	2008-2009	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2007-2008	2008-2009	
1017	vt25 Vihti, Haimoo	41	35	43	32	30	39	23	36	27	19	19	13	29	16	
2027	vt9 Aura	43	36	50	43	33	30	24	40	36	21	14	12	27	23	
3004	vt5 Mikkeli	41	30	42	43	26	25	22	33	36	15	13	9	15	17	
4006	vt3 Tampere, Kulju	32	36	52	43	22	18	25	40	35	14	10	10	25	17	
7009	vt17 Liperi, Ylämylly	44	20	38	34	30	20	14	24	27	10	7	4	7	13	
8005	vt5 Siilinjärvi	36	28	38	47	27	26	18	28	38	11	9	6	14	23	
9014	vt9 Jyväskylä	43	30	43	42	30	25	21	32	31	13	8	5	16	18	
10022	st724 Mustasaari	30	29	35	42	26	24	21	28	29	12	7	8	17	19	
14009	vt4 Rovaniemi	39	29	33	35	31	24	18	26	29	13	10	5	11	15	
	keskiarvo	39	30	42	40	28	26	21	32	32	14	11	8	18	18	
	keskihajonta	5,0	5,0	6,4	5,1	3,4	6,1	3,5	5,9	4,3	3,6	3,9	3,2	7,5	3,4	

5.7 Vedenläpäisevyyskoe

Sitomattomissa rakennekerroksista toteutetun tierakenteen vedenläpäisevyyden tulee kasvaa syvyysuunnassa. Veden pitää päästä suotautumaan rakennekerrosten läpi, jotta se ei jää liian vesitiiviin rakenteen takia kahden rakennekerroksen väliin. Tällöin vesitiiviin kerroksen pintaan voi kertyä vettä, joka voi jäätyessään irrottaa ylemmän päällysteen. (Tiehallinto 2004.) Hienoainesmäärän lisääntyessä kantavassa kerroksessa sen kyky sitoa vettä kasvaa, jolloin kantavan kerroksen vesipitoisuuden ollessa suuri myös liikennekuormituksen aiheuttama huokosvedenpaine kasvaa. (Pihlajamäki 2012.) Koekappaleiden vedenläpäisevyyttä testattiin standardin SFS-179-2 – CEN ISO/TS 17892-11 mukaan. Vedenläpäisevyydestä koekappale laitetaan kolmiakseliseen paineselliin, jossa koekappaleen läpi johdetaan vettä. Vesi virtaa koekappaleen läpi, kun etusäiliö on korkeammassa paineessa kuin takasäiliö. Tällöin vesi virtaa testisäiliössä alhaalta ylöspäin. Vedenläpäisevyys lasketaan kaavalla 10.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot H} \quad (10)$$

missä,

k on vedenläpäisevyys (m/s)

Q on koekappaleen läpi menneen veden tilavuus (m³)

L on koekappaleen korkeus (m)

A on koekappaleen pinta – ala (m²)

t on aika (s)

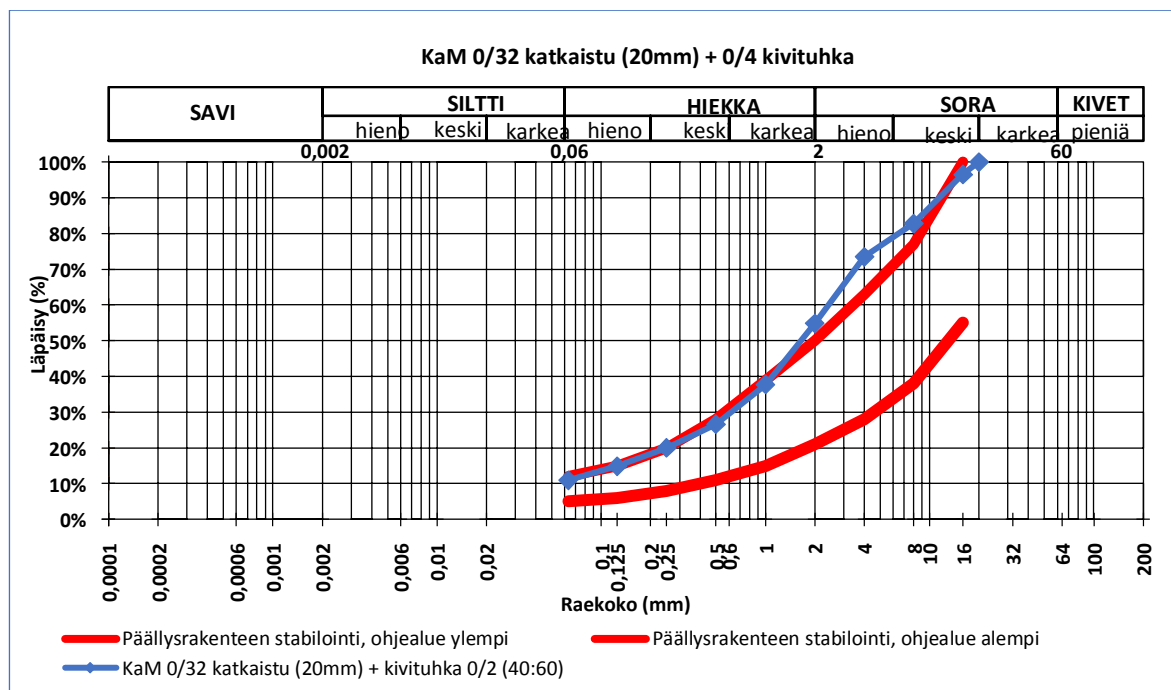
H on hydraulinen paine – ero (m)

6 Tutkimustulokset

6.1 Runkoaineiden ominaisuudet

Runkoaine valmistettiin KaM 0/32, joka katkaistiin 0/20 mm ja 0/4 mm kivituhkasta, joita sekoitettiin 40:60 suhteella keskenään. Sekoituksella saatiin nostettua runkoaineen hienoainespitoisuus haluttuun noin 10 p-%: n. Sekoitetulle runkoaineelle tehtiin pesu- ja kuivaseulonta, jolla määritettiin runkoaineen rakeisuuskäyrä (kuva 18). Runkoaine noudattelee *Päällysrakenteen Stabilointi (2007)* -ohjeen ohjealueen ylärajaa, poikkeuksena raekokoalue 2 – 7 mm, jossa runkoaine ylittää ohjealueen ylempään rajan.

Työssä käytettyyn runkoaineen seokseen päädyttiin Höltän diplomityön *Sekoitusjyrsinnän soveltaminen alempiasteisen tieverkon parantamiseksi (2012)* sekä Rambollin tekemän *LTY, Ekoinfo II KYVO:n lentotuhkan hyödyntäminen vanhan tierakenteen stabiloinnissa (2006)* -raportin tuloksien perusteella. Hölttä (2012) on diplomityössään tutkinut kantavan kerroksen rakeisuutta todellisilta rakennuskohteilta ennen ja jälkeen sekoitusjyrsinnän. Höltän sekä Rambollin tutkimusten perusteella kantavan kerroksen hienoainespitoisuus on maksimissaan noin 10 p-%.



Kuva 18. Tutkimuksessa käytetyn runkoaineen rakeisuuskäyrä sekä sementtistabiloinnille *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa esitetyt runkoaineen rakeisuuskäyrän ohjealueet.

6.2 Puristuslujuus ja pakkasrapautumiskestävyys

Koekappaleiden puristuslujuudet määritettiin yksiaksiaalisella puristuskokeella 28 vuorokauden lujittumisen, pakkasrapautumiskestävyyskokeiden sekä suola-pakkaskestävyyskokeiden jälkeen. Kaikki 28 vuorokauden lujittumisaajan jälkeen testatut koekappaleet täyttivät *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeen sementtistabiloinnin tavoitelujuusvaatimuksen 5 MPa. Pakkasrapautumiskestävyyskokeiden eli jäätymsulamiskokeiden (JS-koe) jälkeen määritetyt puristuslujuuden alenemat olivat suurimmillaan sementin, lentotuhkan, kipsin ja masuunikuonan seoksilla, jotka menettivät kokeen aikana 9,1-25,1 % lujuudestaan. Kaikki koekappaleet saavuttivat kuitenkin pakkasrapautumiskestävyyskokeiden jälkeiselle puristuslujuudelle asetetut vaatimukset sementtistabiloinnille (Tiehallinto 2007). Koekappaleiden puristuslujuudet olivat yli 5 MPa ja ne säilyttivät yli 67 % puristuslujuudestaan pakkasrapautumiskestävyyskokeiden jälkeen (taulukko 11).

Päällysrakenteen stabilointi (2007) -ohjeessa on esitetty hydraulisen stabiloinnin lujuuden laatuvaatimukset ainoastaan sementti- ja masuunihiekkastabiloinnille, joten tässä tutkimuksessa tehtyjen puristuskokeiden tuloksia verrattiin myös *Tuhkarakentamisen käsikirjassa (2012)* esitettyihin kerrosstabiloinnin laboratoriolujuuden laatuvaatimuksiin. Käsikirjan (Ramboll 2012) mukaan kerrosstabiloinnin (käyttöluokka 1) puristuslujuudet tulisi olla 28 vuorokauden lujittumisen jälkeen 3 MPa ja pakkasrapautumiskestävyyskokeen jälkeen suoritettuna puristuslujuuden alenema saa olla enintään 20 %. MSKLM2 ja MSKLM3 eivät täyttäneet *Tuhkarakentamisen käsikirjan (2012)* puristuslujuusvaatimusta pakkasrapautumiskestävyyskokeiden jälkeen. MSKLM2 menetti pakkasrapautumiskestävyyskokeiden jälkeen tehtyjen puristuskokeiden mukaan lujuudestaan 25,1 % ja MSKLM3 menetti lujuudestaan 21,6 %. Muut sideaineseokset täyttivät *Tuhkarakentamisen käsikirjassa (2012)* esitetyt lujuusvaatimukset pakkasrapautumiskestävyyskokeiden jälkeen suoritetuissa puristuskokeissa. Taulukossa 10 on esitetty koekappaleiden lujuudet eri kokeiden jälkeen. Punaisella värillä on merkitty ne koekappaleet, jotka eivät täyttäneet *Tuhkarakentamisen käsikirjassa (2012)* esitettyjä vaatimuksia puristuslujuuden alenemalle JS-kokeen jälkeen. Kappaleessa 6.3 on käsitelty suola-pakkaskestävyyskokeiden jälkeen tehtyjen puristuslujuuskokeiden tuloksia.

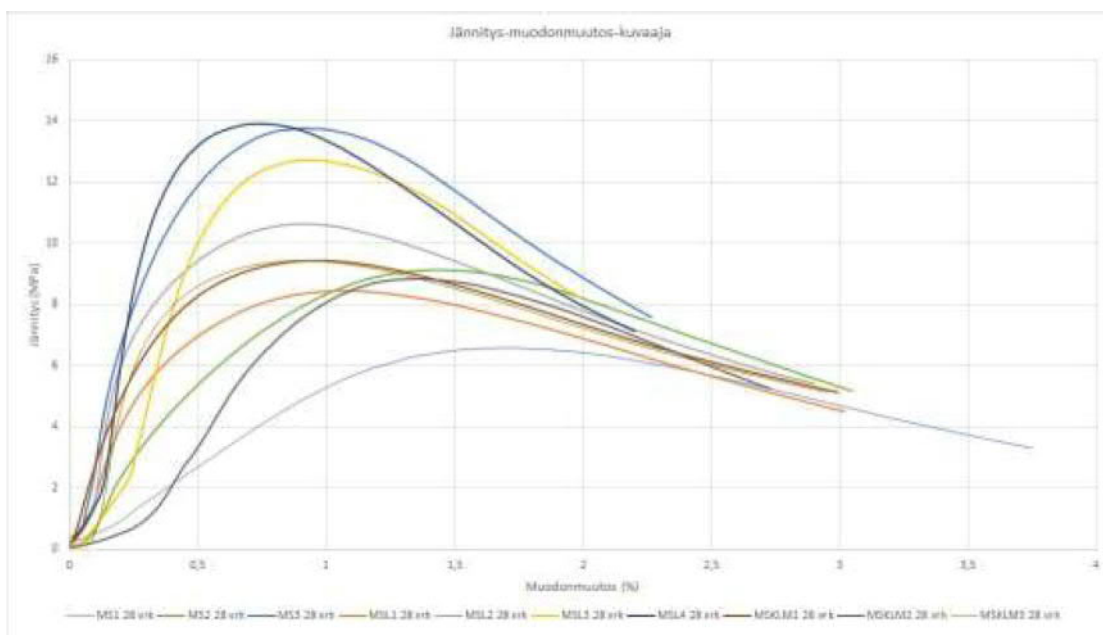
Taulukko 10. Rinnakkaiskoekappaleiden puristuskokeiden tulokset. Suluissa esitetty %-lukema tarkoittaa sulamisveden suolapitoisuutta. Puristuslujuustulokset, jotka täyttivät Päälysrakenteen stabilointi (2007) -ohjeen sementtistabiloinnin sekä Tuhkarakentamisen käsikirjan kerrostabiloinnin laatuvaatimukset on merkitty vihreällä ja Tuhkarakentamisen käsikirjassa esitetyt laatuvaatimukset alittavat kappaleet on merkitty punaisella. Tulokset, joissa ei ole esitetty värejä koskevat suola-pakkaskestävyyskokeita, jonka jälkeiselle lujuuden alenemalle ei ole asetettu laatuvaatimuksia.

Massa	Puristuslujuus 28 vrk [MPa]	Puristuslujuus pakkasrapautumiskestävyys- sekä suola- pakkaskestävyyskokeiden jälkeen [MPa]				
		6-sykliä (7,5 %)	12-sykliä (0 %)	12-sykliä (7,5 %)	12-sykliä (15 %)	24-sykliä (7,5 %)
Vaatus	5-13					
MS1	6,4/6,8	3,2/4,5	6,5/6,0	2,5*	3,9/4,0	1,6/0,4
MS2	9,4/8,9	-	8,8/8,4	3,0/1,6	-	-**
MS3	13,6/14,0	-	13,5/12,9	-	-	-
MSL1	8,4/8,5	6,4/6,6	8,4/8,5	6,3/7,5	6,1/6,5	4,5/5,3
MSL2	10,5/10,8	-	9,6/10,2	7,3/5,8	-	6,2/6,4
MSL3	14,3/15,0	-	14,3/15,0	-	-	-
MSL4	13,1/14,8	-	13,3/13,1	10,7/13,2	-	9,1/9,7
MSKLM1	7,5/7,3	7,0/7,3	7,1/6,8	5,5/5,8	7,1/5,8	3,8/4,3
MSKLM2	9,2/8,8	-	6,8/6,9	6,6/6,4	-	4,0/4,4
MSKLM3	9,7/9,2	-	7,8/7,3	-	-	-

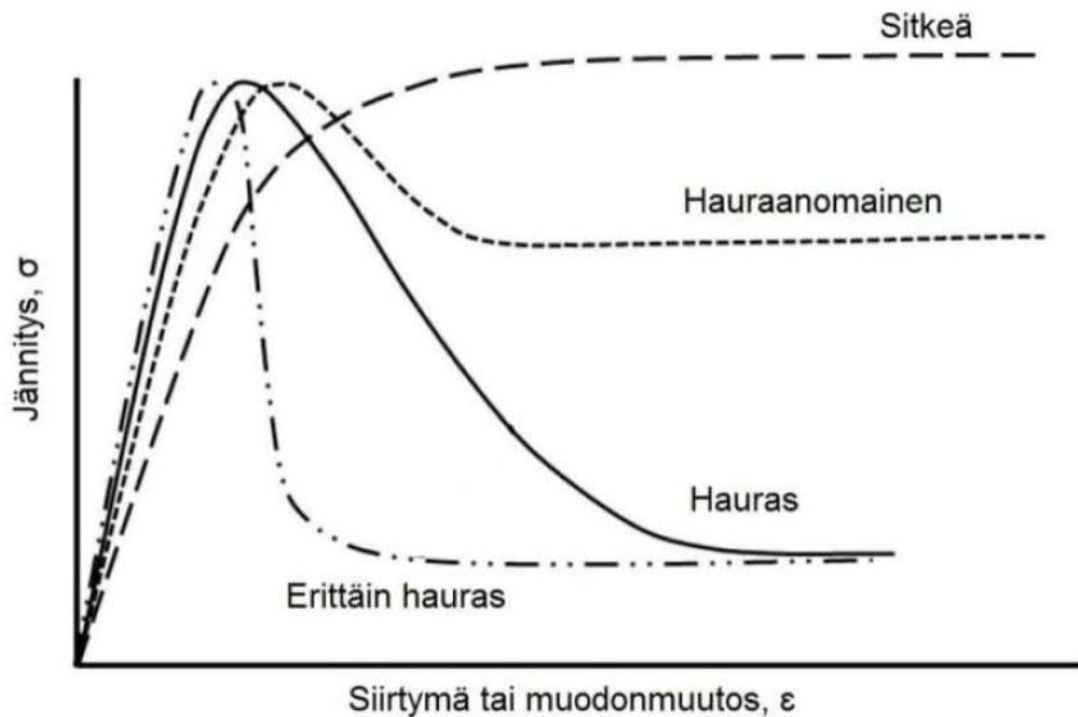
*Rinnakkaiskappale hajosi ennen puristuslujuuskoetta.

** Molemmat koekappaleet hajosivat ennen puristuslujuuskoetta.

Kuvassa 19 on esitetty koekappaleiden 28 vuorokauden puristuslujuuksien jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Jännitys-muodonmuutoskuvaajat mukailevat sitkeän ja hauraan materiaalin jännitys-muodonmuutuskäyttäytymisen periaatekuvan (kuva 20) hauraanomaisista tai haurasta käyrää. Liitteessä 8 on esitetty koekappaleista tehdyt jännitys-muodonmuutoskuvaajat.



Kuva 19. Koekappaleiden 28 vrk jännitys-muodonmuutoskuvaaja.



Kuva 20. Sitkeän ja hauraan materiaalin jännitysmuodonmuutuskäyttäytyminen (Melander 2018).

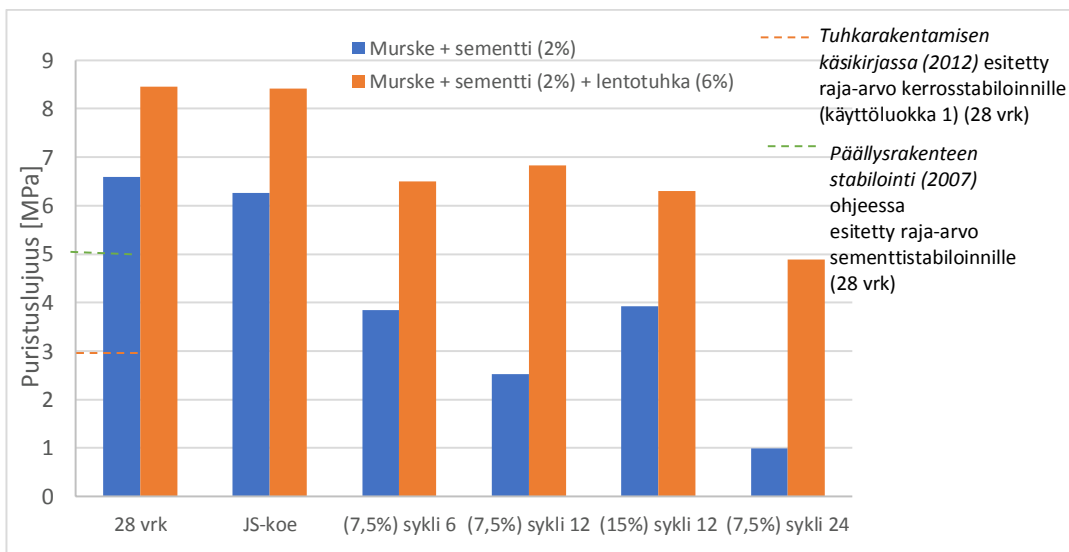
6.3 Suola- ja pakkaskestävyys

Pakkasrapautumiskestävyys (JS)- ja suola-pakkaskestävyyskokeiden lujuuden alenemat on esitetty taulukossa 11. Lujuuden alenemalla tarkoitetaan sitä, kuinka paljon koekappaleen puristuslujuus on alentunut (%) 28 vuorokauden puristuslujuuteen verrattuna. Taulukossa JS-kokeella tarkoitetaan VTT:n testiehtotelman mukaista 12-syklistä pakkasrapautumiskestävyyskoetta, jonka sulamisveteen ei ole lisätty suolaa. Suola-pakkaskestävyyskokeet on tehty syklimäärillä 6, 12, 24 sekä 7,5 % tai 15 % sulamisveden suolapitoisuuksilla. Sideaineseoksille MS1, MSL1 ja MSKLM1 suoritettiin kaikki neljä erilaista suola-pakkaskestävyyskoetta. Muista sideaineseoksista tehtiin valikoivasti suola-pakkaskestävyyskokeita eri syklimäärillä, jotta saataisiin mahdollisimman paljon vertailukelpoista informaatiota kuinka eri sideaineseokset käyttäytyvät suola-pakkaskestävyyskokeissa.

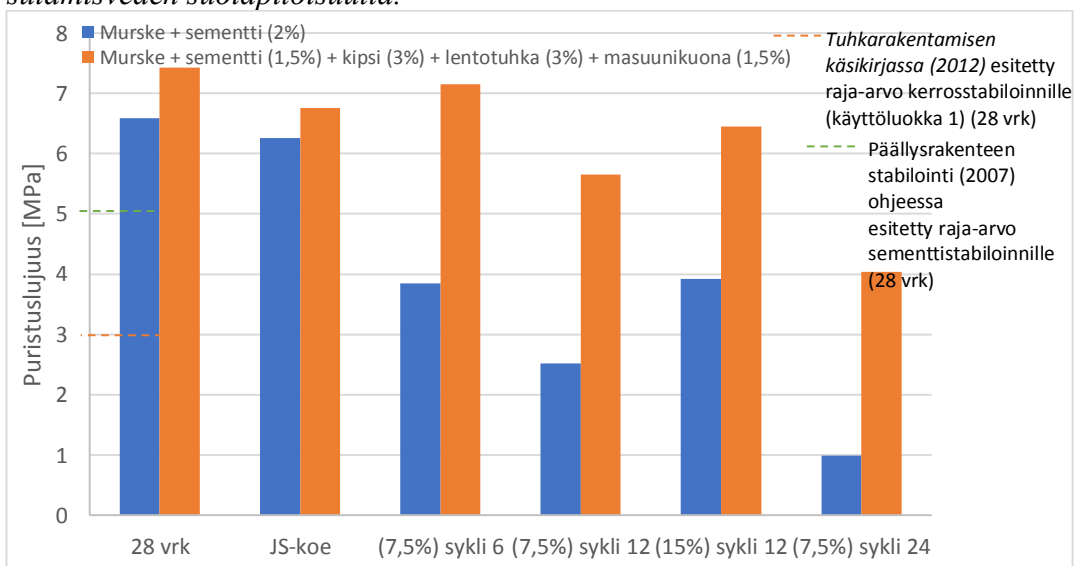
Koekappaleiden MS1, MS2, MSL1, MSKLM1 ja MSKLM2 lujuudet alenivat suola-pakkaskestävyyskokeiden jälkeen mitattujen puristuslujuuksien mukaan tutkituista kappaleista eniten. Referenssimateriaalien (MS1 ja MS2) koekappaleiden lujuudet laskivat kaikissa suola-pakkaskestävyyskokeiden jälkeen tehdyissä puristuslujuuskokeissa. MS1:n rinnakkaiskappale hajosi (kuva 23), mikä aiheuttaa epävarmuutta kyseisen materiaaliseoksen suola-pakkaskestävyydestä. MS2:n molemmat 24-syklin ja 7,5 % suola-pakkaskestävyyskokeen koekappaleet hajosivat ennen puristuslujuuskoetta (liite 7).

Uusiomateriaaleja sisältäneistä sideaineseoksista sementti + lentotuhka ja sementti + kipsi + lentotuhka + masuunikuona (MSL1 ja MSKLM3) lujuuden alenemat suola-

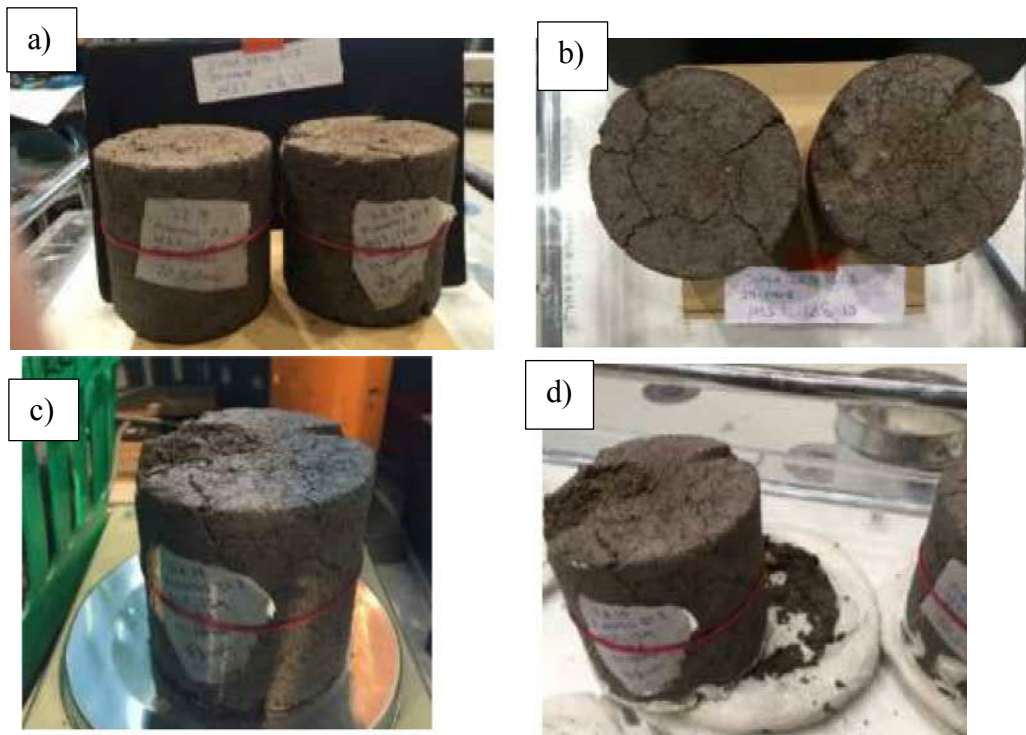
pakkaskestävyyskokeissa olivat melkein samaa suuruusluokkaa. Kuivissa 21 – 22 on esitetty referenssimateriaalin (murske ja sementti 2 %) sekä työssä tutkittujen uusiomateriaalisideaineratkaisujen puristuslujuudet. Kuivissa 21 – 22 on sulamisveden suolapitoisuus ilmaistu prosentteina sulkujen sisällä ennen syklien määrää. Kuivissa on esitetty vihreällä katkoviivalla *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa esitetty puristuslujuuden raja-arvo sementtistabiloinnin 28 vuorokauden lujuudelle sekä oranssilla katkoviivalla *Tuhkarakentamisen käsikirjassa (2012)* esitetty raja-arvo kerrosstabiloinnille (käyttöluokka 1) 28 vuorokauden lujuudelle. *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeessa tai *Tuhkarakentamisen käsikirjassa (2012)* ei ole erikseen asetettu vaatimuksia lujuuden säilymiselle suola-pakkaskestävyyskokeen jälkeen. Referenssimateriaalin puristuslujuustulokset olivat heikommät jokaisen kokeen jälkeen verrattuna murskeen, sementin (2 %) ja lentotuhkan (6 %) sekä murskeen, sementin (1,5 %), kipsin (3 %), lentotuhkan (3 %) ja masuunikuonan (1,5 %) puristuslujuuksiin.



Kuva 21. Murskeen ja sementin (2 %) sekä murskeen, sementin (2 %) ja lentotuhkan (6 %) seosten puristuslujuudet. Sulkujen sisällä oleva prosenttiluku (7,5 % tai 15 %) tarkoittaa sulamisveden suolapitoisuutta.



Kuva 22. Murskeen ja sementin (2 %) sekä murskeen, sementin (1,5 %), kipsin (3 %), lentotuhkan (3 %) ja masuunikuonan (1,5 %) seosten puristuslujuudet. Sulkujen sisällä oleva prosenttiluku (7,5 % tai 15 %) tarkoittaa sulamisveden suolapitoisuutta.



Kuva 23. MS1 koekappale, hajosi 12-syklin ja 7,5 % suola-pakkaskestävyyskokeen jälkeen ennen puristuslujuuden määrittämistä (a) – (d) (valokuvat Kortelainen 2019).

Tutkimuksessa murske- ja sementtiseokset, menettivät suola-pakkaskestävyyskokeiden jälkeen suurimmillaan jopa 85 % lujuudestaan. Lisäksi MS2- koekappaleet hajosivat ennen lujuuden määrittystä 24-syklin ja 7,5 % suola-pakkaskestävyyskokeiden jälkeen (liite 7). Uusiomateriaaleja hyödyntävät sideaineseokset kestivät suola-pakkaskestävyyskokeiden rasitukset referenssimateriaalia (MS1) paremmin.

Taulukko 11. Koekappaleiden puristuslujuuksien suhteellinen alenema JS-kokeiden ja suola-pakkaskestävyyskokeiden jälkeen verrattuna 28 vuorokauden puristuslujuuteen.

Materiaaliseos	Lujuuden alenema (%)				
	JS-koe	6-sykliä NaCl 7,5%, JS-koe	12-sykliä, NaCl 7,5%, JS-koe	24-sykliä, NaCl 7,5%, JS-koe	12-sykliä, NaCl 15%, JS-koe
Murske + sementti 2% (MS1)	5,0	41,6	61,8	85,0	40,5
Murske + sementti 3% (MS2)	6,4	-	74,8	HAJOSI	-
Murske + sementti 5% (MS3)	4,3	-	-	-	-
Murske + sementti 2% + lentotuhka 6% (MSL1)	0,5	23,1	25,2	42,2	18,3
Murske + sementti 3% + lentotuhka 6% (MSL2)	6,9	-	38,7	41,0	-
Murske + sementti 3% + lentotuhka 9% (MSL3)	3,9	-	-	-	-
Murske + sementti 4% + lentotuhka 8% (MSL4)	5,3	-	14,3	32,7	-
Murske + sementti 1,5% + kipsi 3% + lentotuhka 3% + masuunikuona 1,5% (MSKLM1)	9,1	3,8	26,5	45,6	13,3
Murske + sementti 1,5% + kipsi 4,5% + lentotuhka 4,5% + masuunikuona 1,5% (MSKLM2)	25,1	-	27,4	53,1	-
Murske + sementti 2% + kipsi 4% + lentotuhka 4% + masuunikuona 2% (MSKLM3)	21,6	-	-	-	-

6.4 Routivuus

Koekappaleiden routivuus selvitettiin routanousukokeella. Routanousukoe jaetaan kahteen vaiheeseen, joista ensimmäisessä näyte jäätyy ja routaraja liikkuu alaspäin. Toisessa vaiheessa routarajan liike pysähtyy ja se on saavuttanut syvimmän tunkeutumissyvyytensä. Routimiskerroin saadaan toisesta vaiheesta, kun routaraja ei enää liiku ja ollaan saavutettu stabiili tila. (Pesu 2010.) Tässä työssä routanousukoealaitteista asetettiin keräämään tietoa viiden minuutin välein. Taulukossa 12 on esitetty maan routivuusluokitus routimiskertoimeen perustuen.

Taulukko 12. Routivuusluokitus routimiskertoimeen (SP) perustuen (VTT Symposium 94 1989).

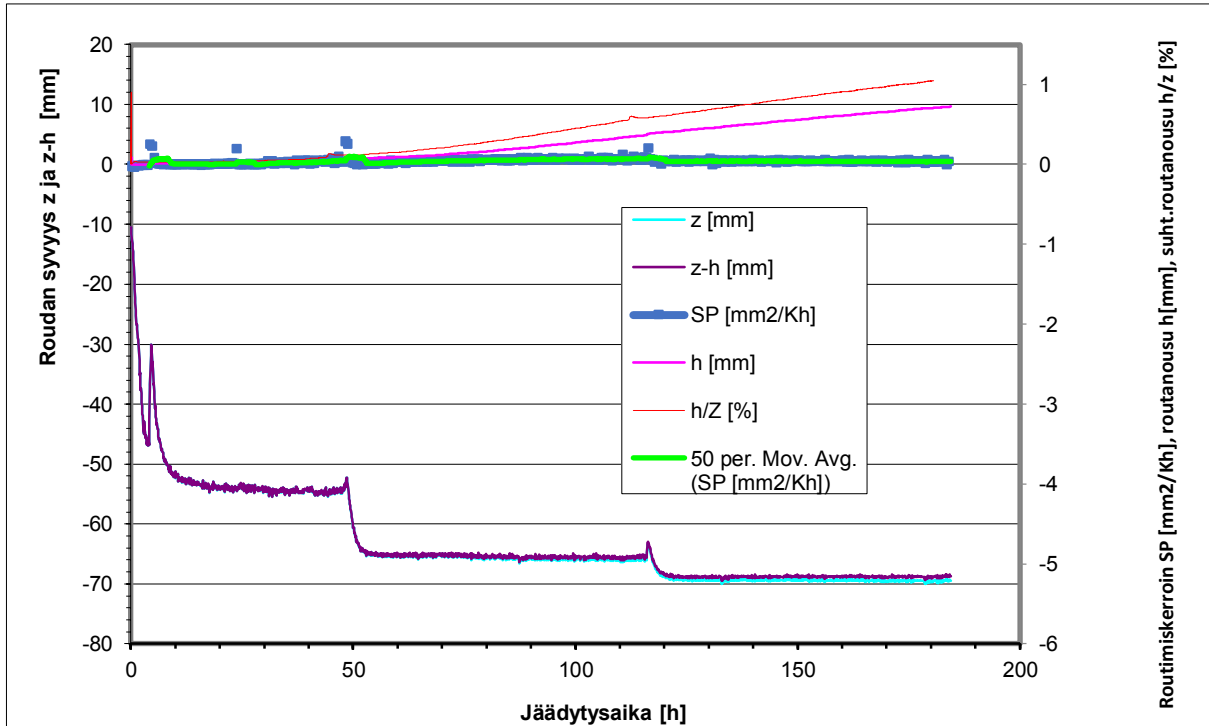
Routivuus	Routaantumiskerroin [mm^2/Kh]
Routimaton	< 0,5
Lievästi routiva	0,5 – 1,5
Routiva	1,5 – 3,0
Voimakkaasti routiva	> 3,0

Kaikissa kokeissa routanousu oli erittäin vähäistä, eikä minkäänlaista jäälinssin muodostumista havaittu näytteissä, kun ne purettiin routanoususellistä kokeen jälkeen. Liitteessä 5 on esitetty routanousukokeiden käsin merkittyjä pöytäkirjoja, kuvia koekappaleista routanousukokeen jälkeen sekä routanousukokeiden tuloskuvaajat. Taulukossa 13 on esitetty koekappaleet, joille routanousukoe suoritettiin ja niiden routimiskertoimet (SP). Kaikissa kokeissa SP -arvot olivat huomattavasti alle $0,5 mm^2/Kh$, joten kaikki tutkitut näytteet ovat routimattomia.

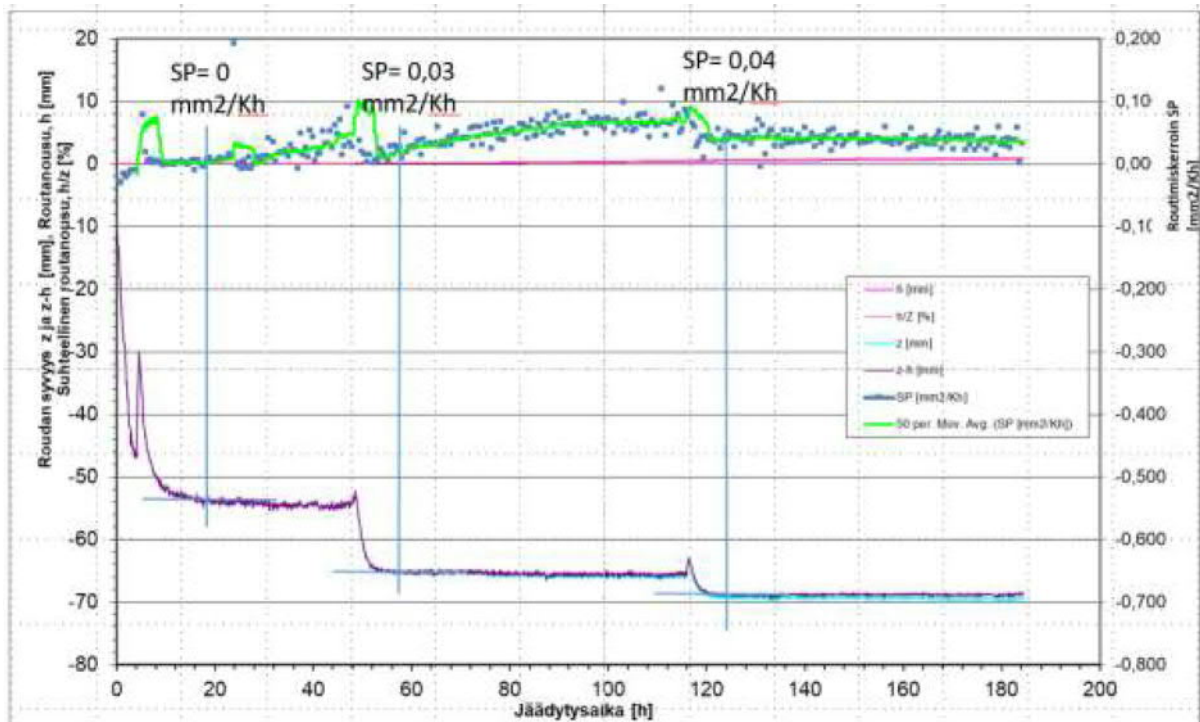
Taulukko 13. Sideaineseokset, joille routanousukoe suoritettiin sekä routimiskerroin (SP).

Tunniste	NaCl	Sideaine	sideaineiden pitoisuus [%]	Routimiskerroin [mm^2/Kh]
MS1_1	-	Sementti	2,0	< 0,5
MSL1_1	-	Sementti + Lentotuhka	2,0 + 6,0	< 0,5
MSKLM1_1	-	Sementti + Kipsi + Lentotuhka + Masuunikuona	1,5 + 3,0 + 3,0 + 1,5	< 0,5
MS1_2	7,5	Sementti	2,0	< 0,5
MSL1_2	7,5	Sementti + Lentotuhka	2,0 + 6,0	< 0,5
MSKLM1_2	7,5	Sementti + Kipsi + Lentotuhka + Masuunikuona	1,5 + 3,0 + 3,0 + 1,5	< 0,5

Kuvissa 24a ja b on esitetty murskeen, sementin, kipsin, lentotuhka ja masuunikuonan (MSKLM1_2) suola-pakkaskestävyyskokeen jälkeen tehdyn kolmen syklin (+1/-3, +2/-6 ja +3/-9°C) kokeen tuloskuvaaja. Kuvan 24b:n akselia on skaalattu, jolloin routimiskertoimien arvot ovat tarkemmin luettavissa. Kuvasta 24b havaitaan, että n. 190 tuntia kestäneen kokeen aikana routanousu jäi alle yhden millimetrin suuruiseksi.



Kuva 24a. Murskeen, sementin, kipsin, lentotuhkan ja masuunikuonan (MSKLM1_2) routanousukokeen tuloskuvaaja sekä routimiskerroin (SP).



Kuva 24b. MSKLM1_2 skaalattu tuloskuvaaja.

6.5 Vedenläpäisevyys

Koekappaleiden vedenläpäisevyytulokset on esitetty taulukossa 14. Taulukossa 15 on esitetty vertailun vuoksi erilaisten uusiomateriaalien ja vertailumateriaalien, kuten lentotuhkan vedenläpäisevyys. Työssä tutkittujen koekappaleiden vedenläpäisevyys oli samaa suuruusluokkaa kuin tiivistetyllä lentotuhkalla. Liitteessä 6 on esitetty koekappaleiden vedenläpäisevyyksokokeiden tulostaulukot.

Taulukko 14. Koekappaleiden vedenläpäisevyytulokset.

Tunniste	Seos	Vedenläpäisevyys ($\frac{m}{s}$)
MS1	Murske + Sementti (2%)	$4,7 \cdot 10^{-8}$
MSL1	Murske + Sementti (2%) + Lentotuhka (6%)	$3,3 \cdot 10^{-7}$
MSKLM1	Murske + Sementti (1,5%) + Kipsi (3%) + Lentotuhka (3%) + Masuunikuona (1,5%)	$2,7 \cdot 10^{-8}$

Taulukko 15. Masuunihiekan, kalliomurskeen, sekoitusjyrsityn materiaalin ja tiivistetyn lentotuhkan vedenläpäisevyys arvoja. (Ramboll 2012; Liikennevirasto 2016; Hölttä 2012; Liikennevirasto 2018c; Rudus 2017)

Sideaine	Vedenläpäisevyys ($\frac{m}{s}$)	Huomautuksia
Masuunihiekka	$0,9 \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$	Hyvin vettä läpäisevä
Kalliomurske	$10^{-3} \dots 10^{-4}$	Hyvin vettä läpäisevä
Sekoitusjyrsitty materiaali, asfalttirouheen määrä 0 %	$6,07 \cdot 10^{-0,4}$	Hyvin vettä läpäisevä
Tiivistetty lentotuhka	$10^{-7} \dots 10^{-8}$	Lähes vettä läpäisemätön

7 Tuloksien analyysi

Kaikki sideaineseokset täyttivät *Päällysrakenteen stabilointi (2007)* -ohjeen asettamat laatuvaatimukset sementtistabiloinnin 28 vuorokauden puristuslujuudelle sekä pakkasrapautumiskestävyydelle. Suurin lujuuden alenema pakkasrapautumiskestävyysskojeissa tapahtui mursketta, sementtiä, kipsiä, lentotuhkaa ja masuunikuonaa sideseoksissa käytetyissä koekappaleissa, joka oli ainut tutkituista materiaalseoksista, mikä ei täyttänyt *Tuhkarakentamisen käsikirjassa (2012)* asetettuja laatuvaatimuksia kerrostabiloinnin (käyttöluokka 1) pakkasrapautumiskestävyydelle. Nämä sideaineseokset menettivät 9,1 - 25,1 % puristuslujuudestaan pakkasrapautumiskestävyysskojeiden jälkeen. Alhaisin lujuuden alenema pakkasrapautumiskestävyysskojeiden jälkeen oli mursketta, sementtiä ja lentotuhkaa sisältäneissä koekappaleissa 0,5 - 6,9 %. Suola-pakkaskestävyysskojeissa suurimmat puristuslujuuden alenemat havaittiin murskeen ja sementin sideaineseoksilla, joiden alkuperäisestä 28 vuorokauden puristuslujuudesta oli hävinnyt jopa 40,5...85,0 %. Murskeen, sementin ja lentotuhkan seoksilla lujuuden alenema oli vain 14,3 - 42,2 %.

Murskeen ja sementin (2 %), murskeen, sementin (2 %) ja lentotuhkan (6 %) ja murskeen, sementin (1,5 %), kipsin (3 %), lentotuhkan (3 %) ja masuunikuonan (1,5 %) koekappaleilla suola-pakkaskestävyysskojeiden jälkeisen lujuuden aleneman havaittiin olevan enemmän riippuvainen jäätymis-sulamissykliä määräästä, kuin kokeessa käytetyn sulamisveden suolapitoisuudesta. Havaintoa voisi selittää Liikenneviraston (2012) julkaisussa esitetty tulos aikaisemmista jäätymis-sulamiskoetutkimuksista, joiden mukaan laimealla (1-3 %) suolaliuoksilla on suurempi vaikutus betonin ja eräiden kiviainesten lujuuden alenemiseen kuin väkevämmillä tai jopa kyllästetyillä suolaliuoksilla.

Pakkasrapautumiskestävyyss- sekä suola-pakkaskestävyysskojeiden jälkeen tehdyissä routanousukojeissa tutkittujen koekappaleiden routimiskerroin SP jäi alle 0,5, jonka mukaan kaikki koekappaleet olivat routimattomia (taulukko 13). Vedenläpäisevyysskojeet suoritettiin murskeen ja sementin (2 %), murskeen, sementin (2 %) ja lentotuhkan (6 %) sekä murskeen, sementin (1,5 %), kipsin (3 %), lentotuhkan (3 %) ja masuunikuonan (1,5 %) seoksille. Murskeen ja sementin (2 %) sekä murskeen, sementin (2 %) ja lentotuhkan (6 %) että murskeen, sementin (1,5 %), kipsin (3 %), lentotuhkan (3 %) ja masuunikuonan (1,5 %) koekappaleet olivat tulosten (taulukko 14) mukaan lähes vettä läpäisemättömiä.

8 Johtopäätökset

Tutkimuksessa havaittiin, että lentotuhkan seostamisen avulla voidaan parantaa hydraulisen stabiloinnin pakkaskestävyyttä. Lentotuhka + sementti (6+2%) -sideaineseoksella (MSL1) stabiloitujen koekappaleiden 28 vuorokauden lujuus oli suurempi ja suhteellinen lujuuden alenema rasituskestävyyskokeiden jälkeen alhaisempi kuin pelkällä sementillä (2%) stabiloitujen koekappaleiden (MS1). Kipsin ja masuunikuonan käyttäminen sementti + lentotuhka sideaineseoksen osakomponentteina on tämän tutkimuksen perusteella mahdollista silloin, kun sideaineseoksen kokonaismäärä on 9 % runkoaineen kuivamassasta (MSKLM1). Muut tutkituista kipsin ja masuunikuonan sideaineratkaisuista (MSKLM2 ja MSKLM3) eivät täyttäneet *Tuhkarakentamisen käsikirjassa (2012)* pakkasrapautumiskestävyyskokeen jälkeiselle lujuudelle asetettuja vaatimuksia. Kaikki kolme sideaineseosta osoittautuivat kuitenkin pelkkää sementtiä paremmaksi sideaineratkaisuksi suola-pakkaskestävyyskokeissa.

Tässä tutkimuksessa havaittiin, että sementtistabiloinnin suola-pakkaskestävyyttä voidaan parantaa seostamalla sideaineseokseen lentotuhkaa, kipsiä, masuunikuonaa tutkimuksessa esitettyjen sideainereseptien mukaisesti. Uusiomateriaalien hyödyntäminen kaupallisen sideaineen lisänä on suositeltavaa, koska sementtistabiloinnin lujuus aleni suola-pakkaskestävyyskokeiden jälkeen tutkituista sideaineseoksista kaikkein eniten. Vaikka lujuuden alenemat olivatkin merkittäviä materiaalisetokset eivät muuttuneet routiviksi tehtyjen routanousukokeiden perusteella.

Suola-pakkaskestävyyskokeiden yhteydessä tutkittiin jäätymis-sulamissyklimäärien vaikutusta koekappaleiden lujuuteen. Tutkimuksessa havaittiin, että koekappaleiden lujuudet alenivat merkittävästi, kun jäätymis-sulamissykliä nostettiin 12:sta syklistä 24:än sykliin. Lisäksi syklimäärät vaikuttivat koekappaleiden lujuuksiin sulamisvedessä käytettyä suolapitoisuutta enemmän.

Tässä tutkimuksessa ei aikataulullisista syistä tehty kapillaarikoetta, vetolujuuskoetta tai imupainekoetta. Kapillaarikoetta avulla voitaisiin selvittää, että pääseekö vedellä kyllästyneestä kantavan kerroksen alapuolisesta rakenteesta nousemaan vettä stabiloituun kerrokseen. Vetolujuuskokeessa määritetään kappaleen kykyä vastustaa vastakkaisiin suuntiin tapahtuvaa vetävää voimaa. Materiaalin imupaineominaisuuksia voidaan testata Tube Suction -kokeella. Väyläviraston julkaisema *Tutkimus tien stabiloidun kerroksen näytteenottomenetelmistä (2019b)* on Tube Suction kokeella mitattu sementillä, masuunikuonalla, kipsillä ja lentotuhkalla stabiloidun tierakenteen dielektrisyysarvoja. Dielektrisyys kuvaa materiaalin volumetristä vesipitoisuutta. Samassa julkaisussa suositellaan lisäksi mittaamaan materiaalin sähkönjohtavuus, joka kuvaa materiaalin osmoottisen imupaineen määrää. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että koekappaleiden lujuudessa tapahtui selkeitä muutoksia eri rasituskokeiden jälkeen. Tämän havainnon perusteella jatkotutkimuksiksi ehdotetut edellä mainitut testit tulisi tehdä ennen ja jälkeen Suomen ilmasto-olosuhteita simuloivia rasituskokeita. Lisäksi jatkotutkimuksia varten olisi syytä tutkia suola-pakkaskestävyyskokeita eri suola ja sykli määrillä sekä tutkia kuinka eri sideainepitoisuuksilla valmistetut koekappaleet reagoivat suola-pakkaskestävyyskokeisiin.

Lähteet

Aalto-yliopisto. 2016. Building Material Technology. Lecture notes prepared by D. Sc Fahim Al-Neshawy. [Viitattu 6.5.2019]

Aluehallintovirasto. 2012. UPM-Kymmene Oyj Kaipolan tehtaan ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, Jämsä, Suomi. [Viitattu 7.5.2019] Saatavilla: http://www.avi.fi/documents/10191/56866/lssavi_paatos_167_2012_1_2012_11_14.pdf

Ehrola E. 1996. Liikenneväylien rakenteet ja materiaalit. Rakennustieto Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-682-338-6

Harju I. 2017. Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulu, Suomi.

Hölttä J. 2012. Sekoitusjyrsinnän soveltuminen alempiasteisen tieverkon parantamistoimenpiteeksi. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi.

Ilmatieteenlaitos. 2019. Vuosisademäärät Helsingissä. Saatavuus: <https://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot> [viitattu 5.6.2019]

Liikennevirasto. 2018a. Tierakenteen suunnittelu. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-632-4. Saatavilla: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf

Liikennevirasto. 2018b. Tietilasto 2017. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-560-0. Saatavilla: <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/tietilasto-2017.pdf>

Liikennevirasto. 2018c. Syvästabiloinnin suunnittelu. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-588-4

Liikennevirasto. 2017a. Maanteiden talvihoito. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-452-8 Saatavilla: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2017-01_maanteiden_talvihoito_web.pdf

Liikennevirasto. 2017b. Perusväylänpito ja liikenneväylien korjausvelkaohjelma 2016 – 2018. Helsinki, Suomi. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lr_2017_perusvaylanpito_korjausvelkaohjelma_web.pdf

Liikennevirasto. 2016. Vaihtoehtoisia maanrakennusmateriaaleja sisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-340-8. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-52_vaihtoehtoisia_maaarakennusmateriaaleja_web.pdf

Liikennevirasto. 2012. Asfalttimassan kestävyys jäätymis-sulamista sekä veden ja kuormien yhteisvaikutusta vastaan. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-255-162-7 Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2012-20_asfalttimassan_kestavyys_web.pdf

Luiro K. & Saarenketo T. 2003. Tiesuolaus voi aiheuttaa ongelmia. Tiennäyttäjät, 2003.

- Melander M. 2018. Kivituhan soveltuminen sidotun kantavan kerroksen runkoaineeksi. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi.
- Mäkelä H. & Höynälä H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa. Tekes Teknologiaakatsaus 9/2000. Helsinki, Suomi. ISBN: 952-9621-97-3.
- Mäkikyrö M. 1995. Tien runkoaineen vaikutus stabilointiin granuloiduilla masuunikuonatuotteilla. Lisensiaatintyö. Oulun yliopisto. Oulu, Suomi.
- Suomen standardisoimisliitto SFS 2012. Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. [Viitattu 6.5.2019] Saatavilla: <https://online.sfs.fi/>
- Pesu J. 2010. Routanousukokeen kehittäminen. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi.
- Pihjalamäki J. 2012. Suulakepuristetun polystyreenilevyn soveltuvuus pehmeikölle perustetun kadun päällysrakenteeseen. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi.
- Rakennustieto Oy 2018. Tuhkien käyttö maanrakentamisessa. Ohjeet infra 062-710191.
- Ramboll Oy. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja. [viitattu 9.1.2019] Saatavissa: https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf
- Rudus. 2017. Betoroc®-murskeohje. Käyttöohje. Helsinki, Suomi. Saatavilla: <https://www.rudus.fi/Download/24032/Betoroc-murske%20ohje.pdf>
- Tarkkio T. 2014. Lentotuhkan pitkäaikaistoimivuus teiden ja kenttien päällysrakenteissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere, Suomi.
- Tekes. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa. Paino-Center Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 952-9621-97-3
- Thom N. 2008. Principles of pavement engineering. Thomas Telford Publishing Ltd 2008. London, United Kingdom. ISBN: 978-0-7277-3480-8
- Tiehallinto. 2007. Päällysrakenteen stabilointi. Edita Prisma Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-951-803-971-9
- Tiehallinto. 2006. Talvihoidon suoritteet ja kustannukset eri tietyypeillä. Edita Prisma Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-803-758-2
- Tiehallinto. 2005a. Heikkokuntoisen päällystetyn alemman tieverkon ylläpito -loppuraportti. Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito -tutkimusohjelma. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-803-572-5
- Tiehallinto. 2004. Tierakenteen suunnittelu. Edita Prisma Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-803-403-6
- Tiehallinto. 2002. Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Edita Prisma Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-726-881-5

Tiehallinto. 2001a. Tien rakennekerrosten materiaalit. Edita Oyj. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-726-821-1

Tiehallinto. 2001b. ICT -koe tien rakennekerrosmateriaalien deformaatioherkkyyden määrittämisestä. Edita Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-726-815-7.

Tiehallinto. 2001c. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994 – 2001 (TPPT). Routanousukoe. Menetelmäkuvaus. Espoo, Suomi.

Tielaitos. 1992. Sementtistabilointiohje. Esan kirjapaino Oy. Lahti, Suomi. ISBN: 951-47-6848-5

University of Illinois. 1993. Material Science and Technology. Prepared by the Department of Material Science and Engineering University of Illinois Urbana-Champaign [Viitattu 6.5.2019]. Saatavilla: <http://matse1.matse.illinois.edu/concrete/prin.html>

VTT Symposium 94. 1989. Frost in Geotechnical Engineering Volume 1. Edited by Hans Rathmayer. Saariselkä, Suomi. ISBN: 951-38-3313-5

VTT (Valtion Tekninen Tutkimuskeskus). 1995. Uusiotuotteiden maarakennuskäytön edellyttämät tutkimukset laboratoriossa ja koerakenteilla. Tutkimusraportti 278. Espoo, Suomi.

Väylä. 2019a. Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteista. Tutkimus. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-678-2. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt_2019-07_kokemuksia_uusiomateriaaleista_web.pdf

Väylä 2019b. Tutkimus tien stabiloidun kerroksen näytteenottomenetelmistä. Tutkimus. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-658-4. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt_2019-01_tutkimus_tien_web.pdf

Liiteluettelo

- Liite 1. Kokeiden pöytäkirjat. 3 sivua.
- Liite 2. Laboratoriotutkimusohjelma. 2 sivua.
- Liite 3. KaM 0/32 ja 0/4 CE-merkki ja suoritustasoilmoitus. 4 sivua.
- Liite 4. KaM 0/32 ja 0/4 rakeisuuskäyrät. 2 sivua.
- Liite 5. Routanousukokeiden pöytäkirjat, tuloskuvaajat ja kuvat koekappaleista. 18 sivua.
- Liite 6. Vedenläpäisevyyskokeiden tulokset. 3 sivua.
- Liite 7. Hajonneiden koekappaleiden kuvat. 6 sivua.
- Liite 8. Jännitys-muodonmuutoskuvaaja. 10 sivua.

Runkoaine		Sideaine	Koekappaleen kuivamassa [g]	Optimivesisipit oisuus [%]	Halkaisija [mm]										
KaM 0/32 katkaistu (20mm) + kivituhka 0/4 (40:60)		Sementti	1726,6	6,5	100										
Valmistus	Tunniste	Nro	Sideaine [%] (p-% murskeen kuivamassast a)	Sideaineiden kokonaispitois uus [%]	Korkeus [mm]	Murskeen massa näytteessä [g]	Sementin massa näytteessä [g]	Veden massa näytteessä [g]	Kokonaismassa [g]	Tilavuus [cm ³]	Koe	Lujuus [MPa]	Puristus		
18.12.2018	MS1	1	2	2,0%	105,0	1692,1	34,5	112,2	1838,8	824,8	JS koe 12-sykliä (0%)	6,5	28.1.2019		
		2	2	2,0%	106,6	1692,1	34,5	112,2	1838,8	836,9	JS koe 12-sykliä (0%)	6,0			
19.12.2018			4	2	2,0%	105,6	1692,1	34,5	112,2	1838,8	829,1	28 vrk	6,4	16.1.2019	
		5	2	2,0%	105,3	1692,1	34,5	112,2	1838,8	826,9	28vrk	6,8			
7.2.2019			8	2	2,0%	107,3	1692,1	34,5	112,2	1838,8	842,5	JS koe 12-sykliä (7,5%)	2,5	19.3.2019	
			9	2	2,0%							JS koe 12-sykliä (7,5%)			
			10	2	2,0%	104,8	1692,1	34,5	112,2	1838,8	822,8	Rikkoutui			
			11	2	2,0%	106,0	1692,1	34,5	112,2	1838,8	832,8	JS koe 12-sykliä (15%)	3,9		
			12	2	2,0%	103,4	1692,1	34,5	112,2	1838,8	811,9	JS koe 24-sykliä (7,5%)	1,6		
			13	2	2,0%	105,7	1692,1	34,5	112,2	1838,8	830,2	JS koe 24-sykliä (7,5%)	0,4		
11.2.2019			15	2	2,0%	103,0	1692,1	34,5	112,2	1838,8	809,0	JS koe 6-sykliä (7,5%)	4,5	18.3.2019	
			16	2	2,0%	103,0	1692,1	34,5	112,2	1838,8	809,0	JS koe 6-sykliä (7,5%)	3,2		
17.12.2018		MS2	1	3	3,0%	107,4	1674,8	51,8	112,2	1838,8	843,8	JS koe 12-sykliä (0%)	8,8	28.1.2019	
			2	3	3,0%	104,8	1674,8	51,8	112,2	1838,8	822,8	JS koe 12-sykliä (0%)	8,4		
19.12.2018				4	3	3,0%	104,6	1674,8	51,8	112,2	1838,8	821,8	28 vrk	9,4	16.1.2019
				5	3	3,0%	104,6	1674,8	51,8	112,2	1838,8	821,5	28 vrk	8,9	
			6	3	3,0%	107,8	1674,8	51,8	112,2	1838,8	0,0	JS koe 12-sykliä (7,5%)	3,0		
11.2.2019			7	3	3,0%	109,3	1674,8	51,8	112,2	1838,8	0,0	JS koe 12-sykliä (7,5%)	1,6	25.3.2019	
			8	3	3,0%							JS koe 24-sykliä (7,5%)			
			9	3	3,0%							JS koe 24-sykliä (7,5%)			
17.12.2018	MS3		1	5	5,0%	105,8	1640,3	86,3	112,2	1838,8	830,9	JS koe 12-sykliä (0%)	13,5	28.1.2019	
		2	5	5,0%	104,8	1640,3	86,3	112,2	1838,8	823,3	JS koe 12-sykliä (0%)	12,9			
19.12.2018		4	5	5,0%	108,1	1640,3	86,3	112,2	1838,8	848,7	28 vrk	13,6	16.1.2019		
	5	5	5,0%	105,5	1640,3	86,3	112,2	1838,8	828,2	28 vrk	14,0				

Runkoaine		Sideaine	Kokkappaleen kuivamassa [g]	Optimiviesipitoisuus [%]	Halkaisija [mm]												
KaM 0/32 katkaistu (20mm) + kivituhka 0/4 (40:60)		Sementti + Lentotuhka	1621,1	8,05	100												
Valmistus	Tunniste	Nro	Sideaine [%] (p-% murskeen kuivamassasta)	Sideaineiden kokonaispitoisuus [%]	Korkeus [mm]	Murskeen massa näytteessä [g]	Sementin massa näytteessä [g]	Lentotuhkan massa näytteessä [g]	Veden massa näytteessä [g]	Kokonaismassa [g]	Tilavuus [cm ³]	Koe	Lujuus [MPa]	Puristus			
17.12.2018	MSL1	1	2+6	8 %	106,4	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	938,7	JS koe 12-syklillä (0%)	8,4	28.1.2019			
		2	2+6	8 %	105,6	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	932,3	JS koe 12-syklillä (0%)	8,5				
		4	2+6	8 %	106,1	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	936,6	28 vrk	8,5		16.1.2019		
19.12.2018	MSL1	5	2+6	8 %	106,2	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	937,5	28vrk	8,4				
		8	2+6	8 %	103,1	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	909,6	JS koe 12-syklillä (7.5%)	6,3				
		9	2+6	8 %	102,7	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	906,7	JS koe 12-syklillä (7.5%)	7,5				
		10	2+6	8 %	105,3	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	929,5	JS koe 12-syklillä (15%)	6,1			19.3.2019	
		11	2+6	8 %	105,6	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	931,7	JS koe 12-syklillä (15%)	6,5				
		12	2+6	8 %	102,6	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	905,9	JS koe 24-syklillä (7.5%)	4,5			1.4.2019	
11.2.2019	MSL1	13	2+6	8 %	101,6	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	896,7	JS koe 24-syklillä (7.5%)	5,3				
		15	2+6	8 %	103,0	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	909,1	JS koe 6-syklillä (7.5%)	6,6			18.3.2019	
		16	2+6	8 %	103,0	1491,4	32,4	97,3	130,5	1751,6	909,1	JS koe 6-syklillä (7.5%)	6,4				
17.12.2018	MSL2	1	3+6	9 %	108,8	1475,2	48,6	97,2	130,5	1751,5	960,1	JS koe 12-syklillä (0%)	9,6	28.1.2019			
		2	3+6	9 %	109,8	1475,2	48,6	97,2	130,5	1751,5	969,1	JS koe 12-syklillä (0%)	10,2				
		4	3+6	9 %	105,6	1475,2	48,6	97,2	130,5	1751,5	931,8	28 vrk	10,8		16.1.2019		
19.12.2018	MSL2	5	3+6	9 %	106,4	1475,2	48,6	97,2	130,5	1751,5	939,5	28 vrk	10,5				
		6	3+6	9 %	105,1	1475,2	48,6	97,2	130,5	1751,5	927,7	JS koe 12-syklillä (7.5%)	7,3			25.3.2019	
		7	3+6	9 %	107,7	1475,2	48,6	97,2	130,5	1751,5	951,0	JS koe 12-syklillä (7.5%)	5,8				
11.2.2019	MSL2	8	3+6	9 %	101,4	1475,2	48,6	97,2	130,5	1751,5	894,9	JS koe 24-syklillä (7.5%)	6,2			5.4.2019	
		9	3+6	9 %	101,9	1475,2	48,6	97,2	137,8	1758,8	899,4	JS koe 24-syklillä (7.5%)	6,4				
		1	3+9	12 %	107,8	1426,5	48,6	145,9	130,5	1751,5	951,4	JS koe 12-syklillä (0%)	14,3			28.1.2019	
17.12.2018	MSL3	2	3+9	12 %	106,4	1426,5	48,6	145,9	130,5	1751,5	939,1	JS koe 12-syklillä (0%)	15,0				
		4	3+9	12 %	106,4	1426,5	48,6	145,9	130,5	1751,5	939,5	28 vrk	15,2			16.1.2019	
		5	3+9	12 %	109,1	1426,5	48,6	145,9	130,5	1751,5	962,5	28 vrk	11,9				
28.12.2018	MSL4	1	4+8	12 %	103,2	1426,5	64,8	129,7	130,5	1751,5	910,9	JS koe 12-syklillä (0%)	13,3			6.2.2019	
3		4+8	12 %	106,0	1426,5	64,8	129,7	130,5	1751,5	935,7	JS koe 12-syklillä (0%)	13,1					
4		4+8	12 %	105,8	1426,5	64,8	129,7	130,5	1751,5	933,6	28 vrk	13,1			24.1.2019		
27.12.2018	MSL4	5	4+8	12 %	106,3	1426,5	64,8	129,7	130,5	1751,5	938,2	28 vrk	14,8				
		6	4+8	12 %	105,1	1426,5	64,8	129,7	130,5	1751,5	927,8	JS koe 12-syklillä (7.5%)	10,7			25.3.2019	
		7	4+8	12 %	105,2	1426,5	64,8	129,7	130,5	1751,5	928,4	JS koe 24-syklillä (7.5%)	13,2				
12.2.2019	MSL4	8	4+8	12 %	101,4	1426,5	64,8	129,7	130,5	1751,5	895,1	JS koe 24-syklillä (7.5%)	9,1			5.4.2019	
		9	4+8	12 %	101,4	1426,5	64,8	129,7	130,5	1751,5	894,6	JS koe 24-syklillä (7.5%)	9,7				

Runkoaine		Sideaine	Koekappaleen lujuusmassa [g]	Optimivisipitoisuus [%]	Halkaisija [mm]														
KaM 0/32 katkaisu (20mm) + kivutuhka 0/4 (40-60)		Sementti + Lentotuhka + Masaunkuona + Kipsi	1633,5	8,25	100														
Valmistus	Tunniste	Nro	Sideaine [%] (p-% murskeen lujuusmassasta)	Sideaineiden kokonaispitoisuus [%]	Korkuus [mm]	Murskeen massa näytteessä [g]	Sementin massa näytteessä [g]	Lentotuhkan massa näytteessä [g]	Masaunkuonan massa näytteessä [g]	Kipsin massa näytteessä [g]	Veden massa näytteessä [g]	Kokonaismassa [g]	Tilavuus [cm ³]	Koe	Lujus [MPa]	Puristus			
28.12.2018	MSKLM1	1	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	105,2	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	826,1	JS koe 12-syklillä (0%)	7,1	6.2.2019			
		2	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	103,1	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	809,6	JS koe 12-syklillä (0%)	6,8				
27.12.2018			4	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	105,7	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	830,4	2brvk	7,5	24.1.2019		
			5	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	106,8	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	839,0	2brvk	7,3			
			8	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	104,3	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	819,1	JS koe 12-syklillä (7,5%)	5,5			
8.2.2019			9	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	104,1	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	817,5	JS koe 12-syklillä (7,5%)	5,8	20.3.2019		
			10	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	105,2	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	826,9	JS koe 12-syklillä (15%)	7,1			
			11	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	105,2	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	826,2	JS koe 12-syklillä (15%)	5,8			
			12	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	102,7	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	806,9	JS koe 24-syklillä (7,5%)	3,8	1.4.2019		
			18	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	102,0	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	801,3	JS koe 24-syklillä (7,5%)	4,3			
			19	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	103,0	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	809,0	JS koe 6-syklillä (7,5%)	7,3	18.3.2019		
12.2.2019			17	1,5 + 3 + 1,5 + 3	9%	103,0	1468,3	24,2	48,4	24,2	48,4	133,0	1746,5	809,0	JS koe 6-syklillä (7,5%)	7,0			
28.12.2018	MSKLM2	1	1,5 + 4,5 + 1,5 + 4,5	9%	106,0	1419,9	24,2	72,6	24,2	72,6	133,0	1746,5	832,4	JS koe 12-syklillä (0%)	6,8	6.2.2019			
		2	1,5 + 4,5 + 1,5 + 4,5	12%	104,0	1419,9	24,2	72,6	24,2	72,6	133,0	1746,5	816,8	JS koe 12-syklillä (0%)	6,9				
27.12.2018			4	1,5 + 4,5 + 1,5 + 4,5	12%	104,3	1419,9	24,2	72,6	24,2	72,6	133,0	1746,5	818,9	2brvk	9,2	24.1.2019		
			5	1,5 + 4,5 + 1,5 + 4,5	12%	104,3	1419,9	24,2	72,6	24,2	72,6	133,0	1746,5	818,9	2brvk	8,8			
			6	1,5 + 4,5 + 1,5 + 4,5	12%	105,6	1419,9	24,2	72,6	24,2	72,6	133,0	1746,5	829,4	JS koe 12-syklillä (7,5%)	6,6	25.3.2019		
12.2.2019			7	1,5 + 4,5 + 1,5 + 4,5	12%	106,3	1419,9	24,2	72,6	24,2	72,6	133,0	1746,5	834,6	JS koe 12-syklillä (7,5%)	6,4			
			8	1,5 + 4,5 + 1,5 + 4,5	12%	102,0	1419,9	24,2	72,6	24,2	72,6	133,0	1746,5	801,2	JS koe 24-syklillä (7,5%)	4,0	5.4.2019		
			9	1,5 + 4,5 + 1,5 + 4,5	12%	101,9	1419,9	24,2	72,6	24,2	72,6	133,0	1746,5	800,2	JS koe 24-syklillä (7,5%)	4,4			
28.12.2018		MSKLM3	1	2 + 4 + 2 + 4	12%	103,1	1419,9	32,3	64,5	32,3	64,5	133,0	1746,5	809,9	JS koe 12-syklillä (0%)	7,8	6.2.2019		
			2	2 + 4 + 2 + 4	12%	103,3	1419,9	32,3	64,5	32,3	64,5	133,0	1746,5	811,6	JS koe 12-syklillä (0%)	7,3			
27.12.2018				4	2 + 4 + 2 + 4	12%	107,2	1419,9	32,3	64,5	32,3	64,5	133,0	1746,5	841,6	2brvk	9,7	24.1.2019	
				5	2 + 4 + 2 + 4	12%	106,3	1419,9	32,3	64,5	32,3	64,5	133,0	1746,5	835,2	2brvk	9,2		

Vaihe 1.	Laboratoriotutkimussuunnitelma	Rinnakkaisten koekappaleiden lukumäärät esitetty taulukossa						
		Kokeet						
Tunniste	Sideaineet	Sideaine [%] (p-% murskeen kuivamassasta)	Sideaineiden kokonaispitoisuus [%]	Proctor-koee (ICT max kuivairtoiteisuus)	Tiivistyvyykskoesarja	Puristuskoee	J-S koee	Routakoee
MS1	Plusementti	2	2,0 %			2	2	1
MS2	Plusementti	3	3,0 %	2	2	2	2	
MS3	Plusementti	5	5,0 %			2	2	
MSL1	Plusementti + lentotuhka	2+6	8,0 %			2	2	1
MSL2	Plusementti + lentotuhka	3+6	9,0 %			2	2	
MSL3	Plusementti + lentotuhka	3+9	12,0 %	2	2	2	2	
MSL4	Plusementti + lentotuhka	4+8	12,0 %			2	2	
MSKLM1	sementti + kipsi + lentotuhka + kuona	1,5+3+3+1,5	9,0 %			2	2	1
MSKLM2	sementti + kipsi + lentotuhka + kuona	1,5+4,5+4,5+1,5	12,0 %	2	2	2	2	
MSKLM3	sementti + kipsi+ lentotuhka + kuona	2,0+4,0+4,0+2,0	12,0 %			2	2	



Ly 2163026-3
DESTIA Oy
Heidehofintie 2
PL 206
01301 VANTAA

11865/3762/4/2014
14

SFS-EN 13242

Tie- ja vesirakentamisessa ja tierakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset
Koskenkylä, Loviisa KaM 0/32 mm
Sitomattomat kantavan kerroksen kiviainekset, Kalliokiviainekset

Raekoko	Nimike	0/32 mm
Rakeisuus	Luokka	G _A 85
Väliseulan raja-arvot ja sallitut poikkeamat tyyppikäyrästä	Luokka	G _{TC} 20
Raemuoto	Luokka	FI ₃₅
Kiintotiheys	Ilmoitettu arvo	NPD
Puhtaus		
Hienoaineksen määrä	Luokka	f ₅
Murtopintaisen rakeiden osuus	Luokka	NPD
Iskunkestävyys	Luokka	LA ₂₀
Vedenimeytyminen	Ilmoitettu arvo	WA ₂₄₁
Jäädytys-sulatuskestävyys		hyväksytty, WA ₂₄₁
Koostumus/määrä		hyväksytty, kalimaasälpä 35 %, kvartsi 27 %, plagioklaasi 20 %, biotiitti 12 %, saussuriitti 4 %, opaakki 2 %
Happoliukoiset sulfaatit	Luokka	AS _{NR}
Kokonaisriikki	Luokka	S _{NR}
Vaaralliset aineet		
Radioaktiivinen säteily	ilmoitettu arvo	I ₁ =0,67 I ₂ =0,27 I ₃ =0,10

Lisätiedot CE-merkintään:

Koskenkylä, Loviisa KaM 0/32 mm

Sitomattomat kantavan kerroksen kiviainekset, kalliokiviainekset

Keskiarvokäyrä:

Seula, mm	Läpäisy %
45	100
31,5	96
22,4	83
16	70
11,2	58
8	49
5,6	40
4	33
2	22
1	15
0,5	11
0,25	8
0,125	6
0,063	4,5



416

Ly 2163026-3
DESTIA Oy
Neilikkatie 17
01301 VANTAA

11865/3727/6/2017
17

0416-CPD-5154-03

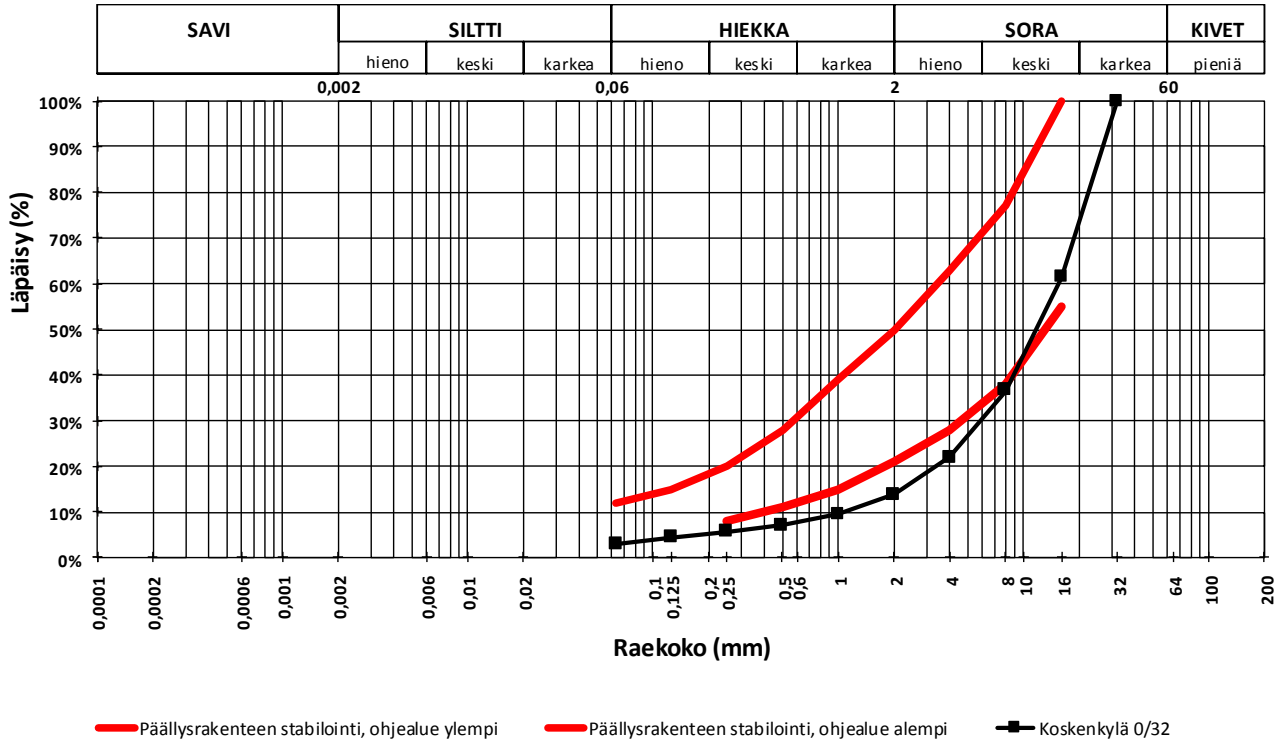
SFS-EN 13043
Kiviainekset asfalttimassoissa
Koskenkylä, Loviisa KaM 0/4 mm
Kalliokiviainekset

Raekoko	Nimike	0/4 mm
Rakeisuus	Luokka	G _F 85
Tyypirakeisuuden poikkeama	Luokka	G _{TC} 10
Raemuoto	Luokka	NPD
Kiintotiheys	Ilmoitettu arvo	2,60...2,80 Mg/m ³
Puhtaus		
Hienoaineksen määrä	Luokka	f ₁₆
Hienoaineksen laatu	Luokka	MB _F NT
Murtopintaisen rakeiden osuus	Luokka	C _{NR}
Nastarengaskulutuskestävyys	Luokka	NPD
Vedenimeytyminen	Ilmoitettu arvo	0,4
Jäädytys-sulatuskestävyys		hyväksytty, WA ₂₄ 1
Koostumus/määrä		hyväksytty, plagioklaasi 50 %, kvartsi 40 %, biotiitti 8 %, kloriitti 1 %, muut 1 %
Vaaralliset aineet		
Radioaktiivinen säteily	ilmoitettu arvo	I ₁ =0,67, I ₂ =0,27, I ₃ =0,10

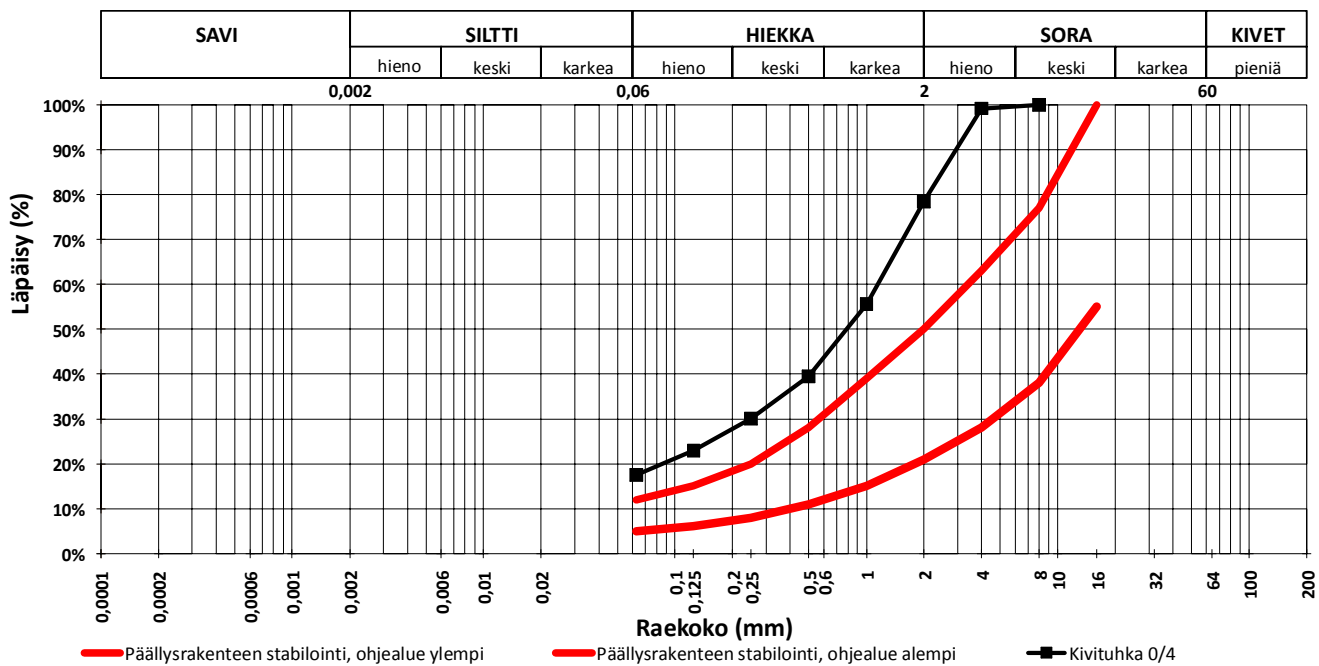
Lisätiedot:**Koskenkylä KaM 0/4, 6/2017****Keskiarvokäyrä:**

Seula, mm	Läpäisy %
5,6	100
4	97
2	71
1	48
0,5	34
0,25	25
0,125	18
0,063	12,0

Koskenkylä 0/32

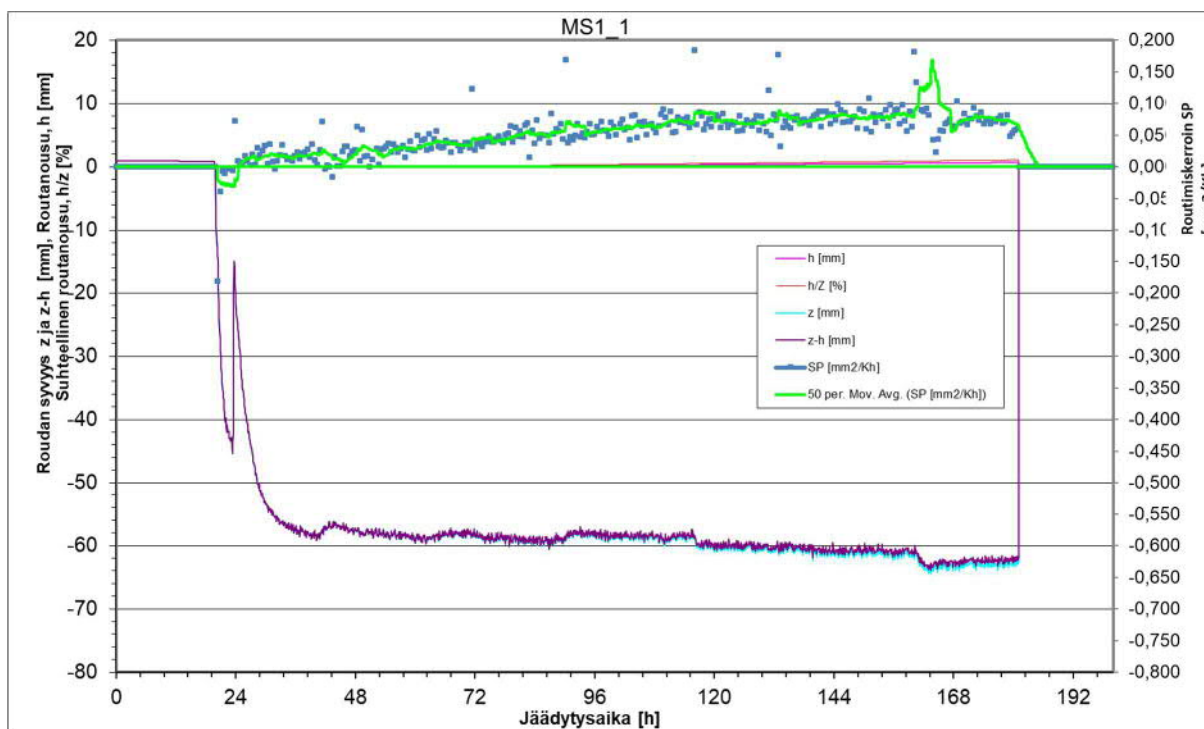


Kivituhka 0/4



Koe	Diplomityö, Kortelainen													Huomautus	
Näyte	MS1			[°C]											
Kokeen aloitus	29.1.2019													Routanousu	
Cycle (5 min)	Date	Kansi	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Pohja	Digitaalinen	Manuaalinen				
228	30.1.2019	0,51	1,24	1,3	1,33	1,41	1,38	1,33	1,03	-15,4	6,61	Kyllästyminen			
237	30.1.2019	0,52	1,32	1,43	1,4	1,48	1,49	1,39	1,01	-16,2	6,68	Kyllästys lopetettu, paino otettu pois			
1098	2.2.2019	-4,3	-1,2	-0,8	-0,4	0,02	0,46	0,79	0,98	-16,1	6,81				
2238	6.2.2019	-4,3	-1,3	-0,8	-0,5	0	0,38	0,77	0,96	-15,6	7,31	Koe lopetettu			

Koekappale	MS1_1		
Sykli	1.	2.	3.
Syklin kesto (h)	0...181		
SP (mm^2/Kh)	0,03...0,08		
Kokonaisroutanousu	0,66 mm		



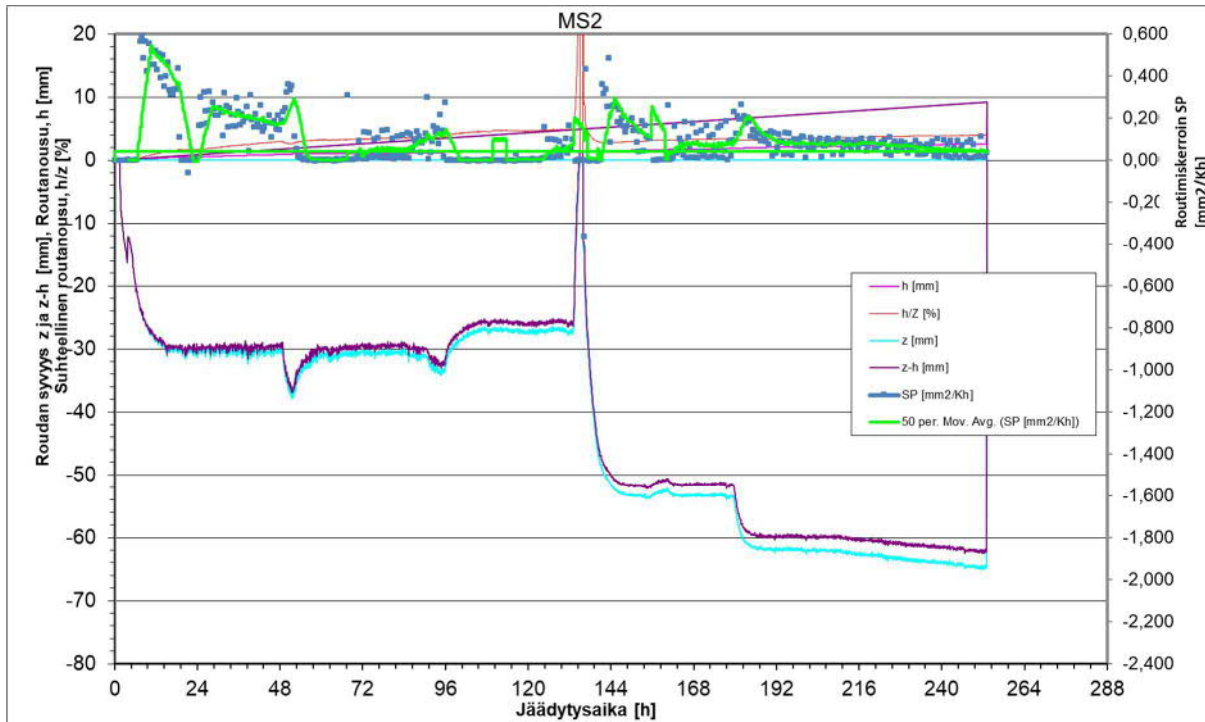
6.2.2019

MS1_1



Koe	Diplomityö, Kortelainen			Sykliset routanousukokeet									Huomautus
Näyte	MS2												
Kokeen aloitus	27.3.2019												
				[°C]							Routanousu		
Cycle (5 min)	Date	Kansi	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Pohja	Digitaalinen	Manuaalinen		
253	29.3.2019	-2,4	-0,6	0	0,36	1,01	1,4	1,66	1,33	-17,7	9,93	Ensimmäinen sykli (-3/+1)	
584	30.3.2019	-2,4	-0,5	0,01	0,35	1,03	1,41	1,65	1,33	-17,3	10,46		
1919	4.4.2019	-4,8	-2,1	-1,2	-0,4	0,55	1,33	1,93	2,43	-16,5	11,28	Toinen sykli (-6/+2)	
3137	8.4.2019	-7,5	-3,8	-2,4	-1,4	-0,1	0,92	1,86	3,1	-15,6	13,2	Kolmas sykli (-9/+3)	

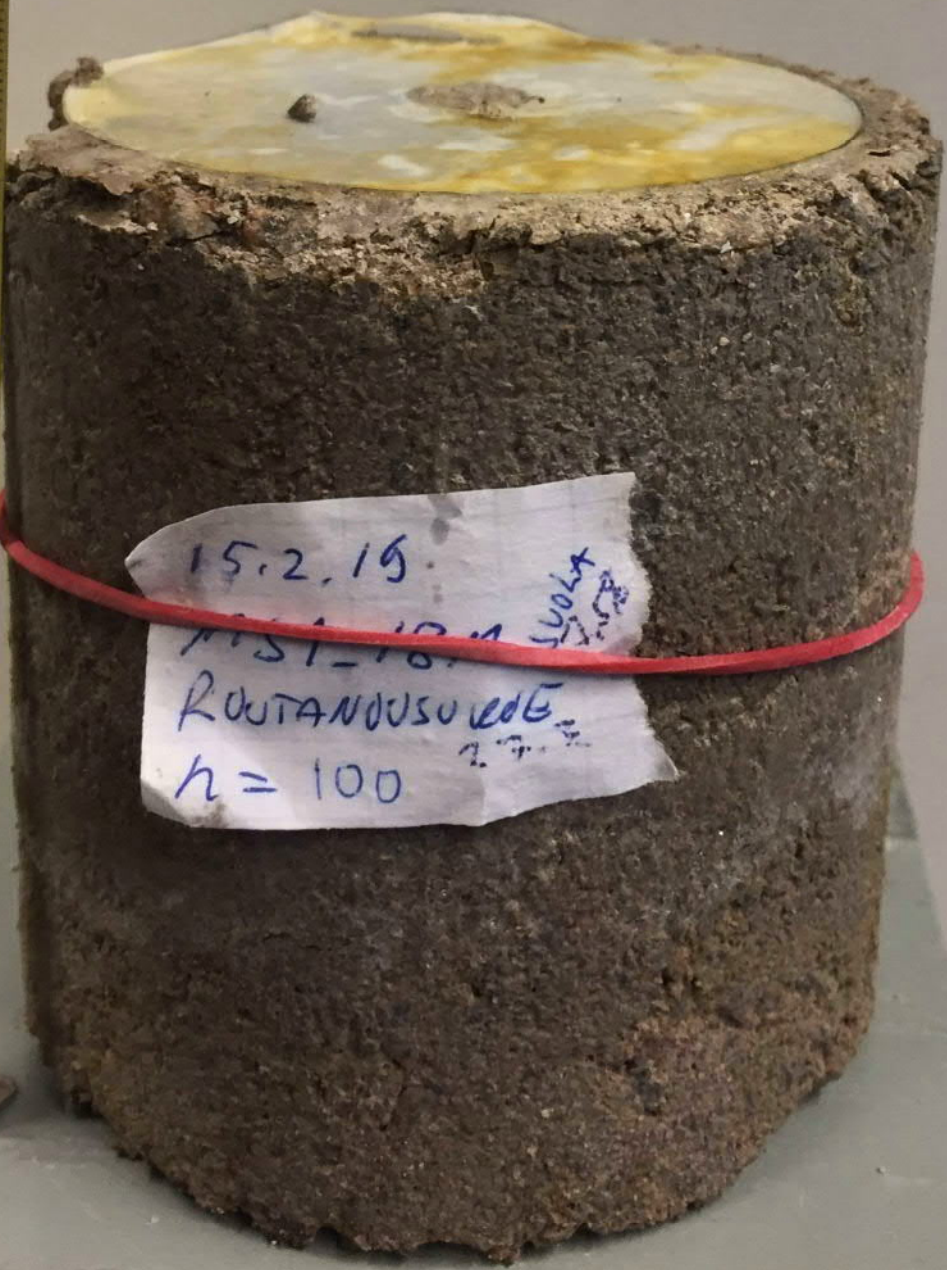
Koekappale	MS1_2		
Sykli	1.	2.	3.
Syklin kesto (h)	5 vrk	2 vrk	3vrk
SP (mm^2/Kh)	0,25	<0,3	<0,2
Kokonaisroutanousu	2,55 mm		
HUOM	noin 130 tunnin kohdalla näyte sulanut		



8.4.2019

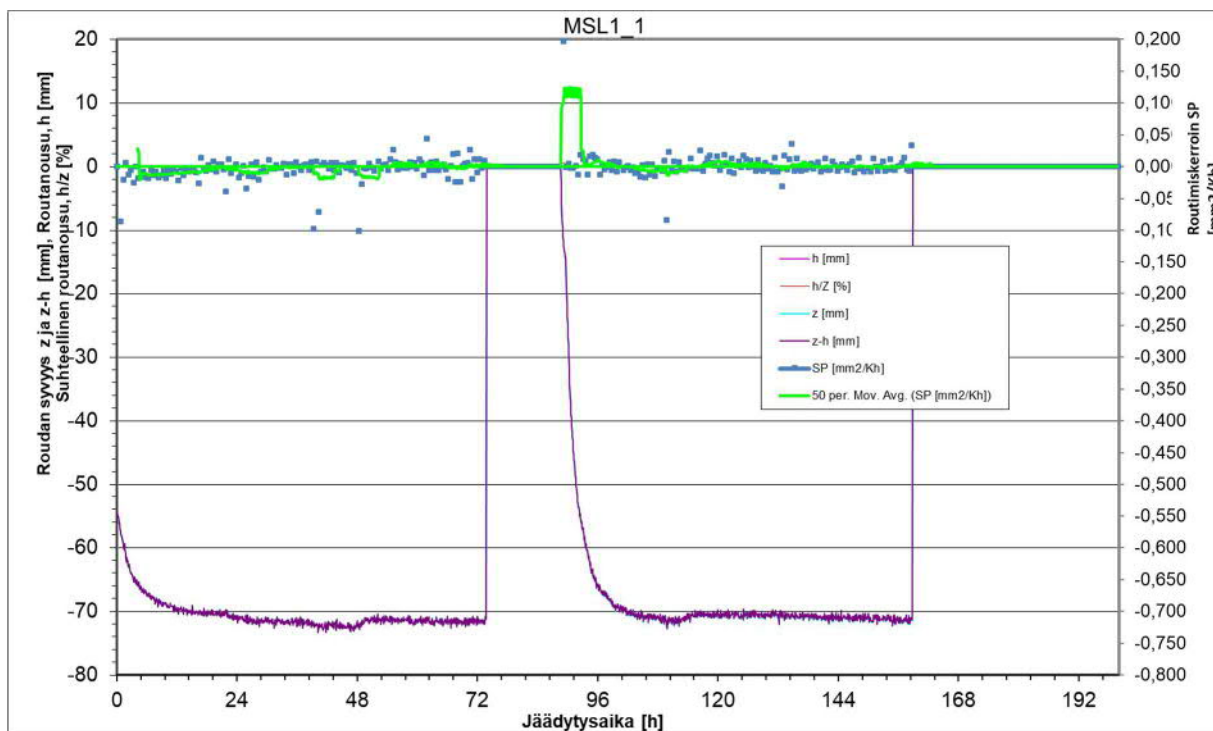
MS1_2

15.2.19
MS1-18.4
ROUTANOUSUODE
n = 100
SUOLA



Koe	Diplomityö, Kortelainen		Paino oli jäänyt kylästyksen jälkeen paikoilleen. Aloitimme kokeen alusta 12.2.2019										Huomautus
Näyte	MSL1												
Kokeen aloitus	6.2.2019												
			[°C]							Routanousu			
Cycle (5 min)	Date	Kansi	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Pohja		Digitaalinen	Manuaalinen	
1081	12.2.2019	-3,8	-1,5	-0,9	-0,5	0	0,38	0,63	0,98		-16	6,02	Kylästyksen lopetettu, paino otettu pois
1149	12.2.2019	-3,38	-1,6	-1,1	-0,7	-0,3	0,11	0,45	0,97		-16	6,04	
1960	15.2.2019	-3,8	-1,6	-1,1	-0,7	-0,3	0,09	0,46	0,99		-16	6,07	koe lopetettu

Koekappale	MSL1_1		
Sykli	1.	2.	3.
Syklin kesto (h)	89...159		
SP (mm^2/Kh)	0		
Kokonaisroutanousu	0,05 mm		
HUOM	Ensimmäinen koe t=0...74 tehtiin 10kg-paino kehossa, jolloin jännitys n. 15 kPa, sen jälkeen kuormitus poistettiin ja uusintakoe (t=89h...159h) tehtiin minijännityksellä 2,4 kPa.		



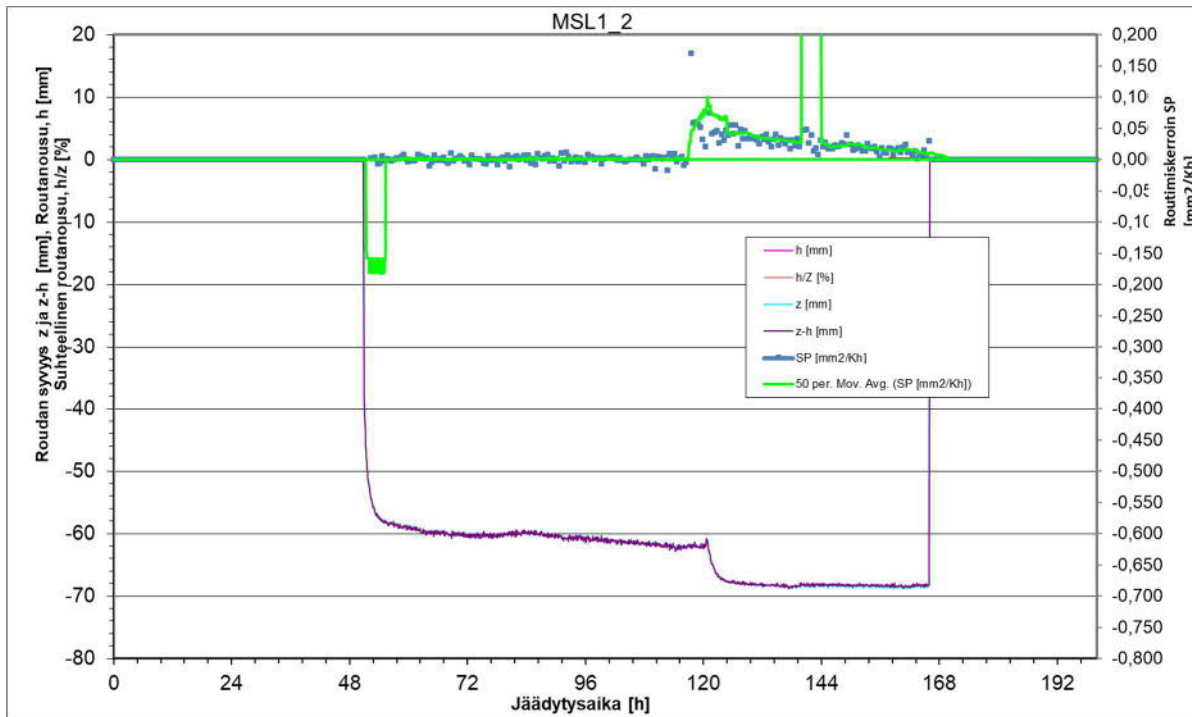
15.2.19

MSL1_1



Koe	Diplomityö, Kortelainen			Sykliset routanousukokeet								Huomautus	
Näyte	MSL2												
Kokeen aloitus	8.4.2019												
				[°C]							Routanousu		
Cycle (5 min)	Date	Kansi	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Pohja	Digitaalinen	Manuaalinen		
610	12.4.2019	0,82	-0,6	0,1	0,11	0,52	0,85	1,03	1,15	-15,7	8,03	Ensimmäinen sykli (-3/+1)	
1434	15.4.2019	-2	-2,6	-1,6	-0,9	0	0,6	1,25	2,08	-15,7	8,13		
2045	17.4.2019	-5,3	-4,3	-2,9	-1,8	-0,6	0,47	1,54	306	-13,6	3,95	Toinen sykli (-6/+2), häikkää manuaalisessa mittarissa, koe lopetettu	
Kolmatta sykliä ei toteutunut, routanousukoneessa häikkää													

Koekappale	MSL1_2		
Sykli	1.	2.	3.
Syklin kesto (h)	50,8...120,47	120,47...165,91	
SP (mm^2/Kh)	0	0	
Kokonaisroutanousu	0,09 mm		



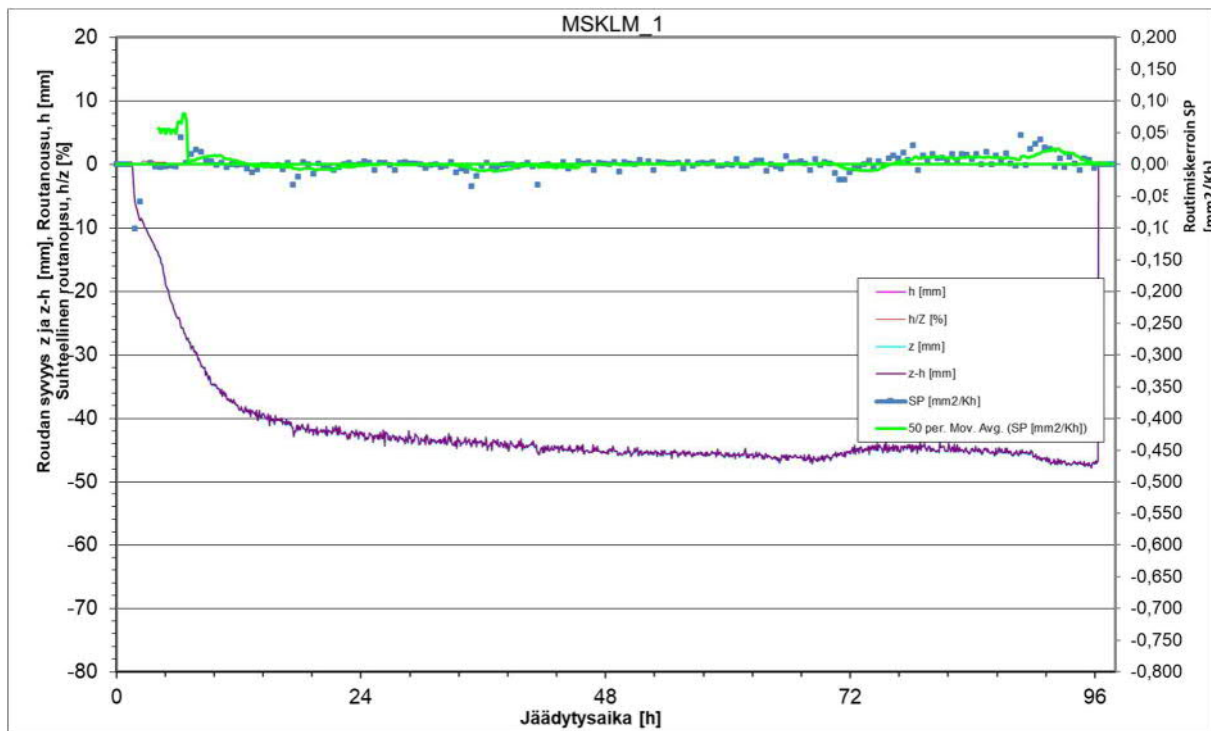
17.4.19

MSL1_2



Koe	Diplomityö, Kortelainen												Huomautus	
Näyte	MSKLM1													
Kokeen aloitus	22.3.2019													
			[°C]										Routanousu	
Cycle (5 min)	Date	Kansi	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Pohja		1,07	Digitaalinen	Manuaalinen	
73	22.3.2019	-2,1	-0,4	0,29	0,64	1,12	1,4	1,47	1,07		1,07	-15,5	7,25	Kyllästys lopetettu, paino otettu pois
852	25.3.2019	-2,1	-1	-0,3	0	0,53	0,9	1,09	1,05		1,05	-15,5	7,25	
1170	26.3.2019	-2,1	-1	-0,4	-0,1	0,5	0,87	1,06	1,05		1,05	-15,5	7,25	koe lopetettu

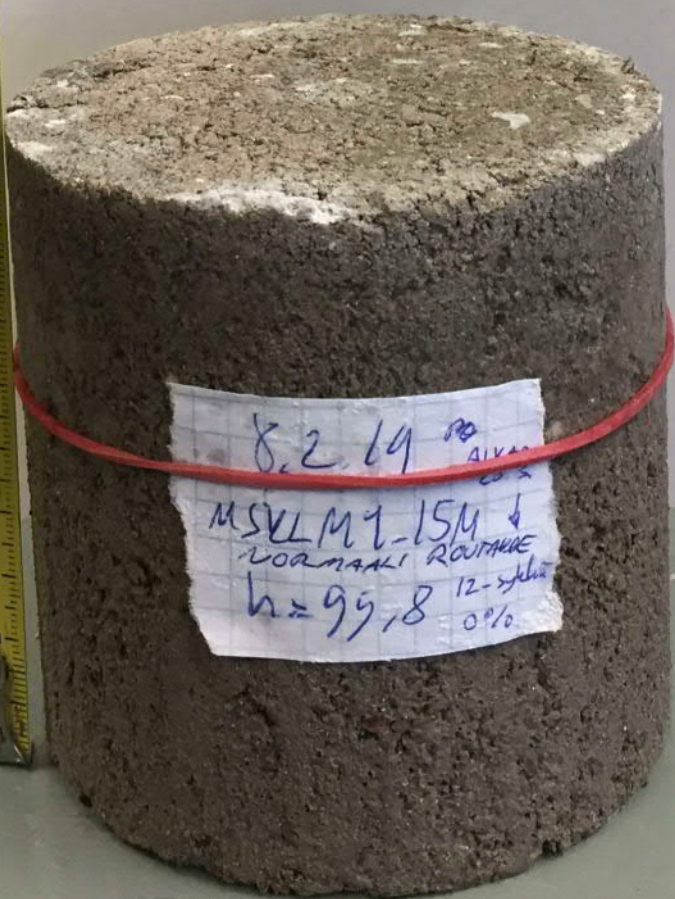
Koekappale	MSKLM1_1		
Sykli	1.	2.	3.
Syklin kesto (h)	96		
SP (mm^2/Kh)	0		
Kokonaisroutanousu	0,05 mm		



26.3.19

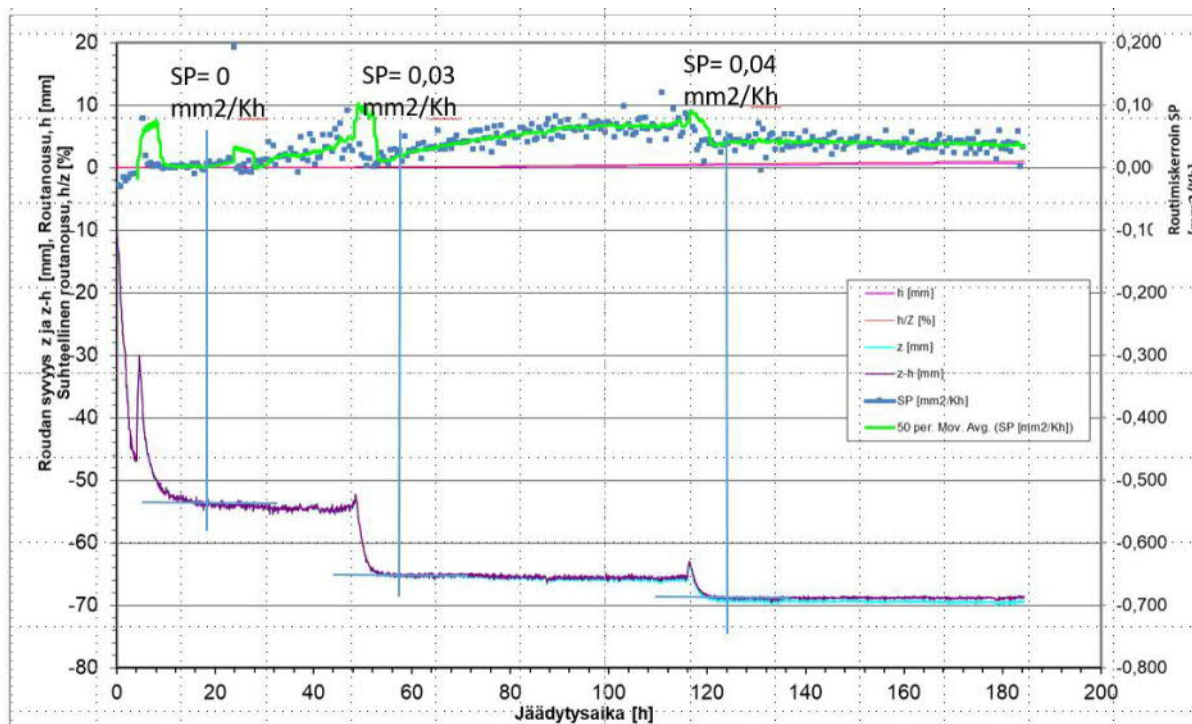
MSKLM1_1

8.2.19¹⁰ AIVAS
MSKLM1-15M &
LOOMAKI ROUTAUKSE
h=99,8 12-sykeä
0%



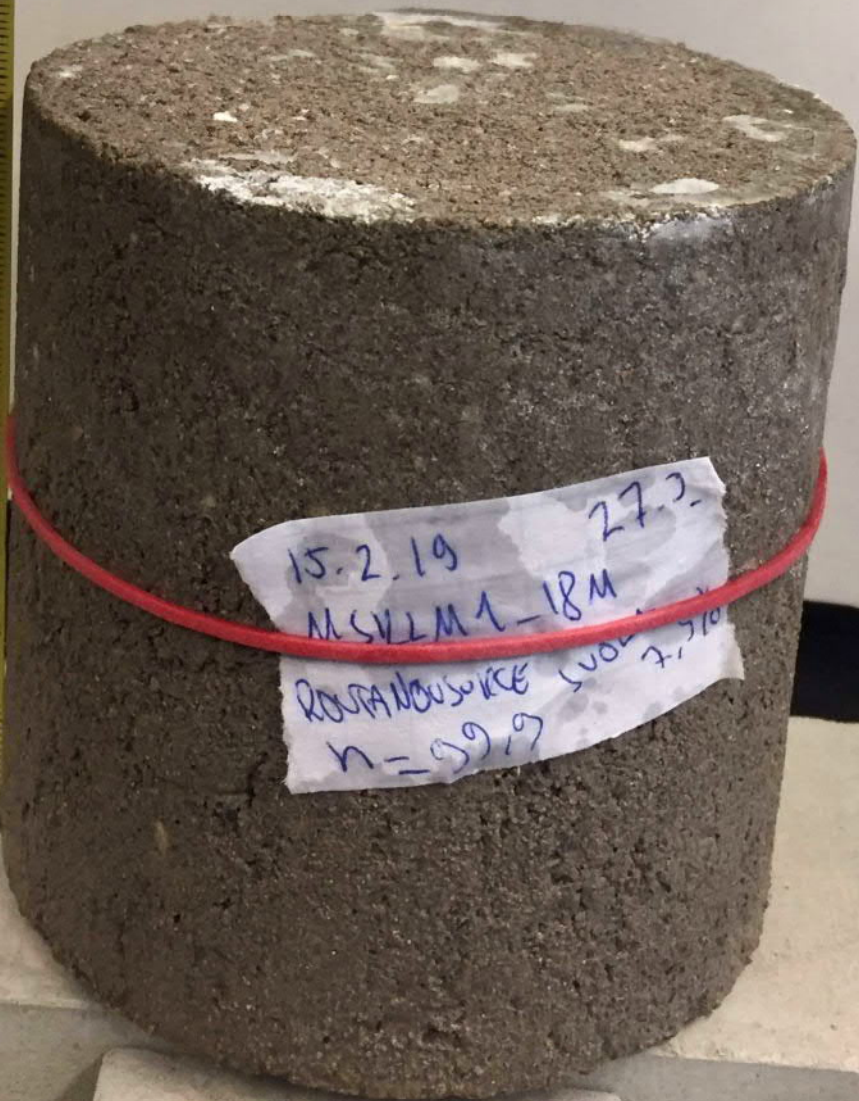
Koe	Diplomityö, Kortelainen		Sykliset routanousukokeet										Huomaus	
Näyte	MSKLM2													
Kokeen aloitus	24.4.2019													
		[°C]										Routanousu		
Cycle (5 min)	Date	Kansi	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Pohja		Digitaalinen	Manuaalinen		
281	25.4.2019	6,49	-1,2	-0,2	-0,2	0,15	0,47	0,79	0,92		4,58	6,11	Ensimmäinen sykli (-3/+1)	
1395	29.4.2019	2,57	-3	-1,7	-1	-0,2	0,43	1,17	1,88		4,91	6,41	Toinen sykli (-6/+2)	
2282	2.5.2019	-6,7	-4,8	-3,3	-2	-0,6	0,43	1,61	3,03		5,29	7,81	Kolmas sykli (-9/+3), koe lopetettu	

Koekappale	MSKLM1_2		
Sykli	1.	2.	3.
Syklin kesto (h)	0...50	50...120	120...190
SP (mm^2/Kh)	0	0,03	0,04
Kokonaisroutanousu	>0,1 mm		

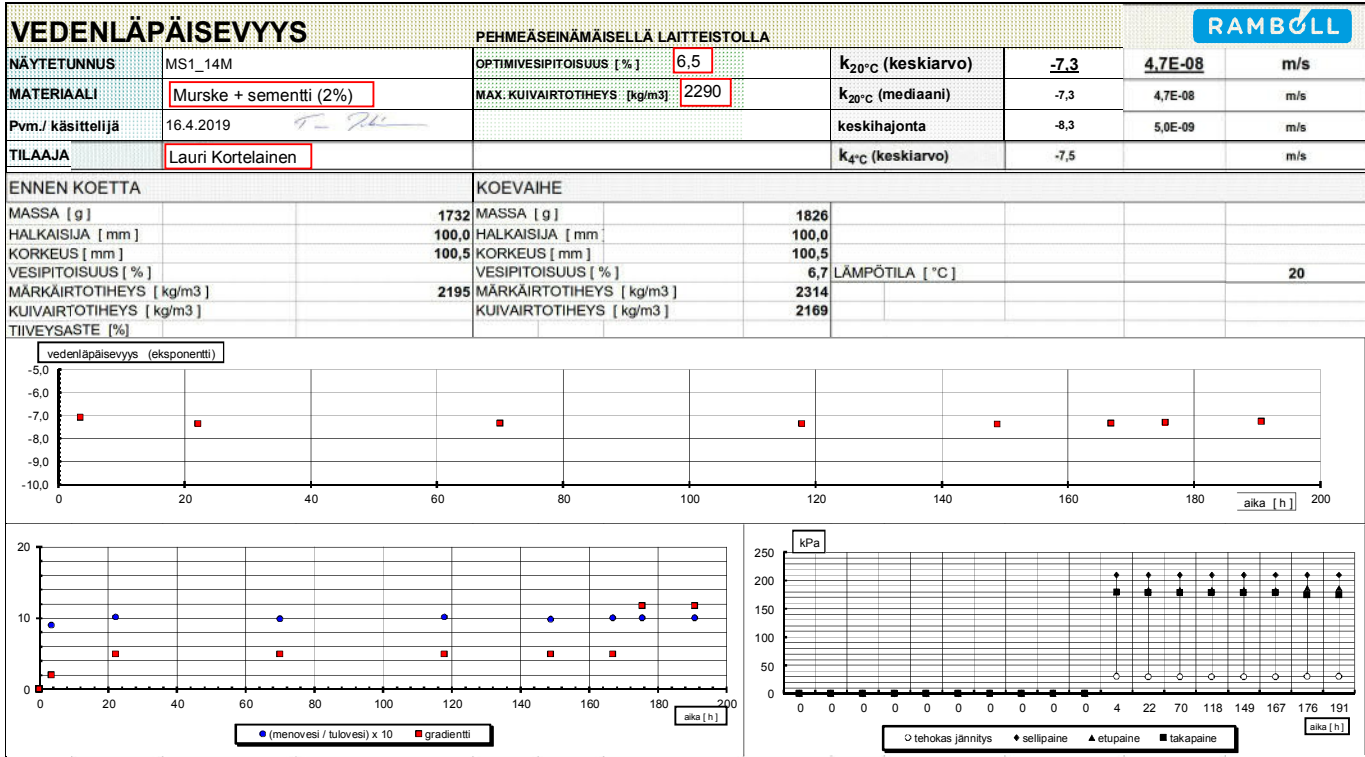


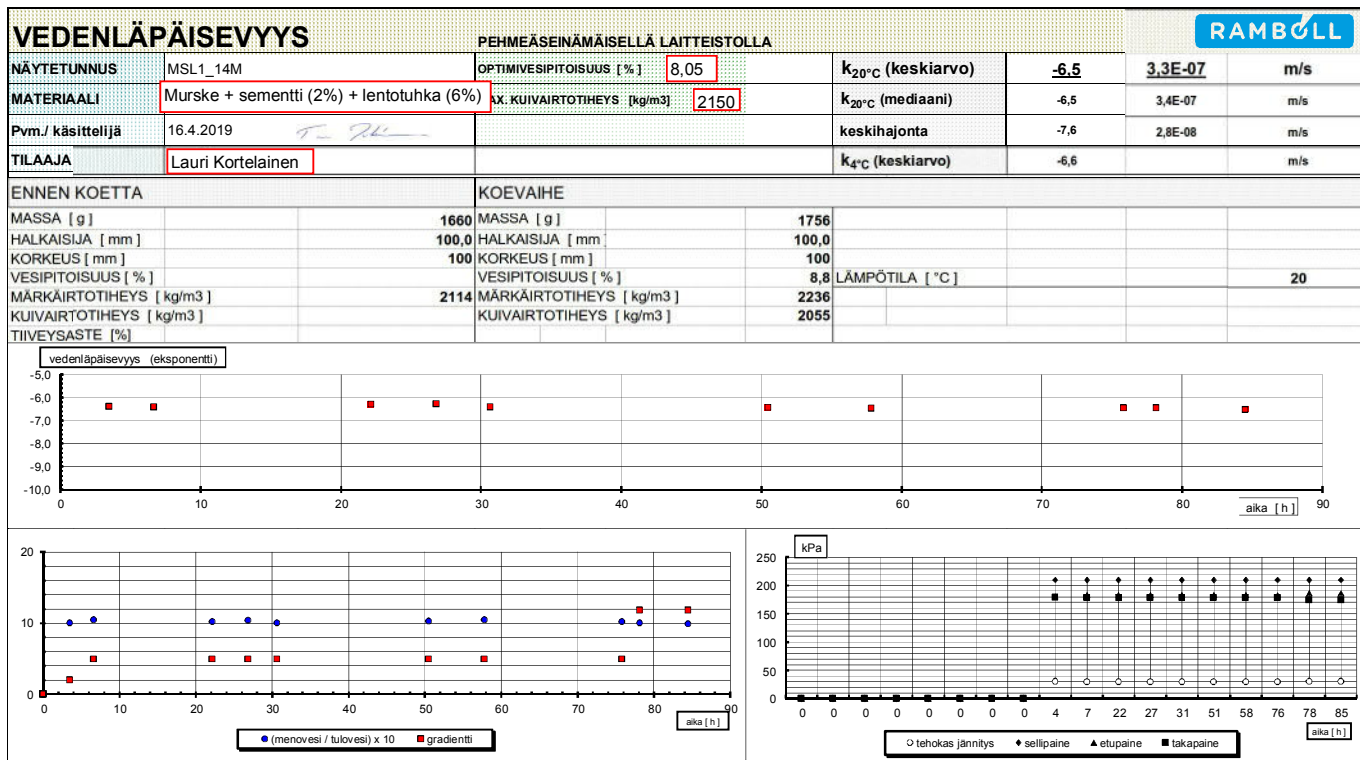
25.2019

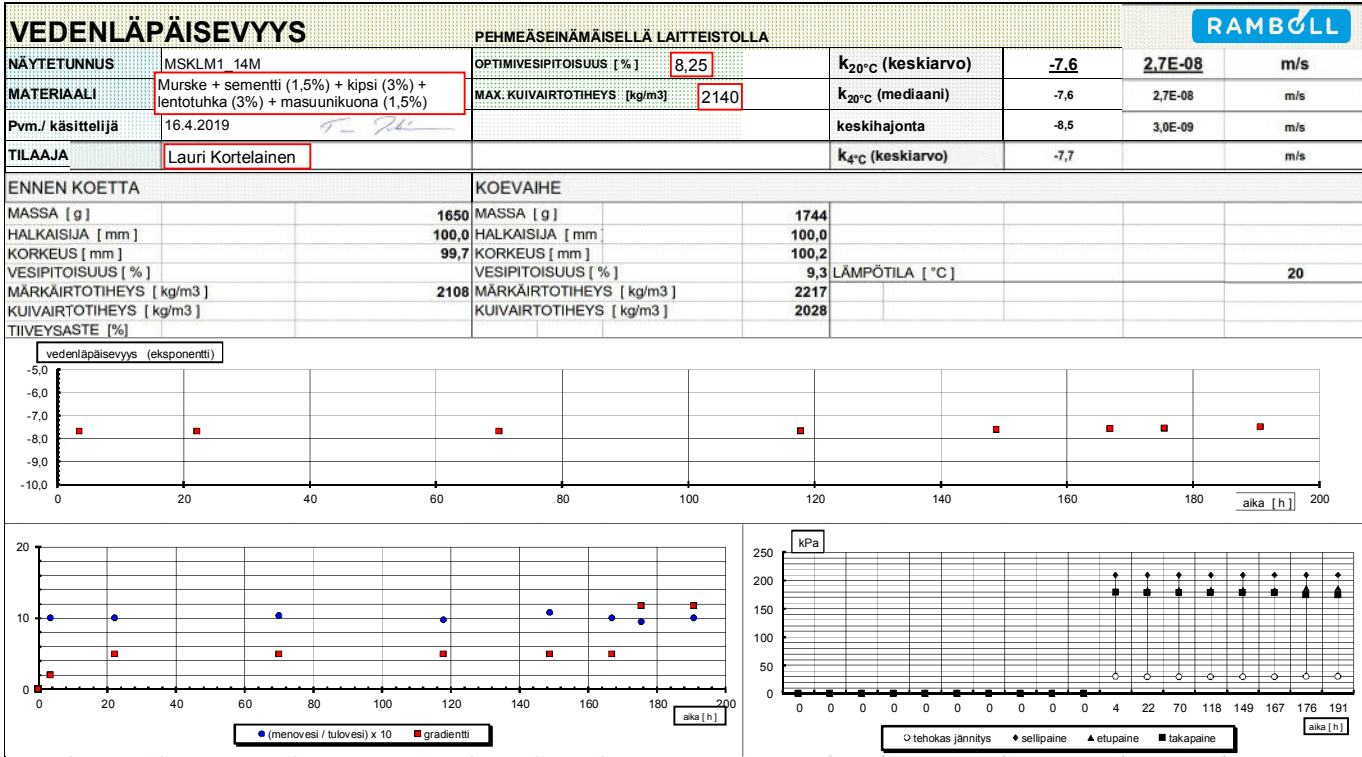
MSKLM1_2



15.2.19 27.2.
MSKLM1-18M
ROUNANOUSKKE SUO 7.710
n=99,9







Murske + sementti (2%)
12-sykliä ja sulamisveden
suolapitoisuus 7,5 %

Liite 7. Hajonneiden koekappaleiden kuvat

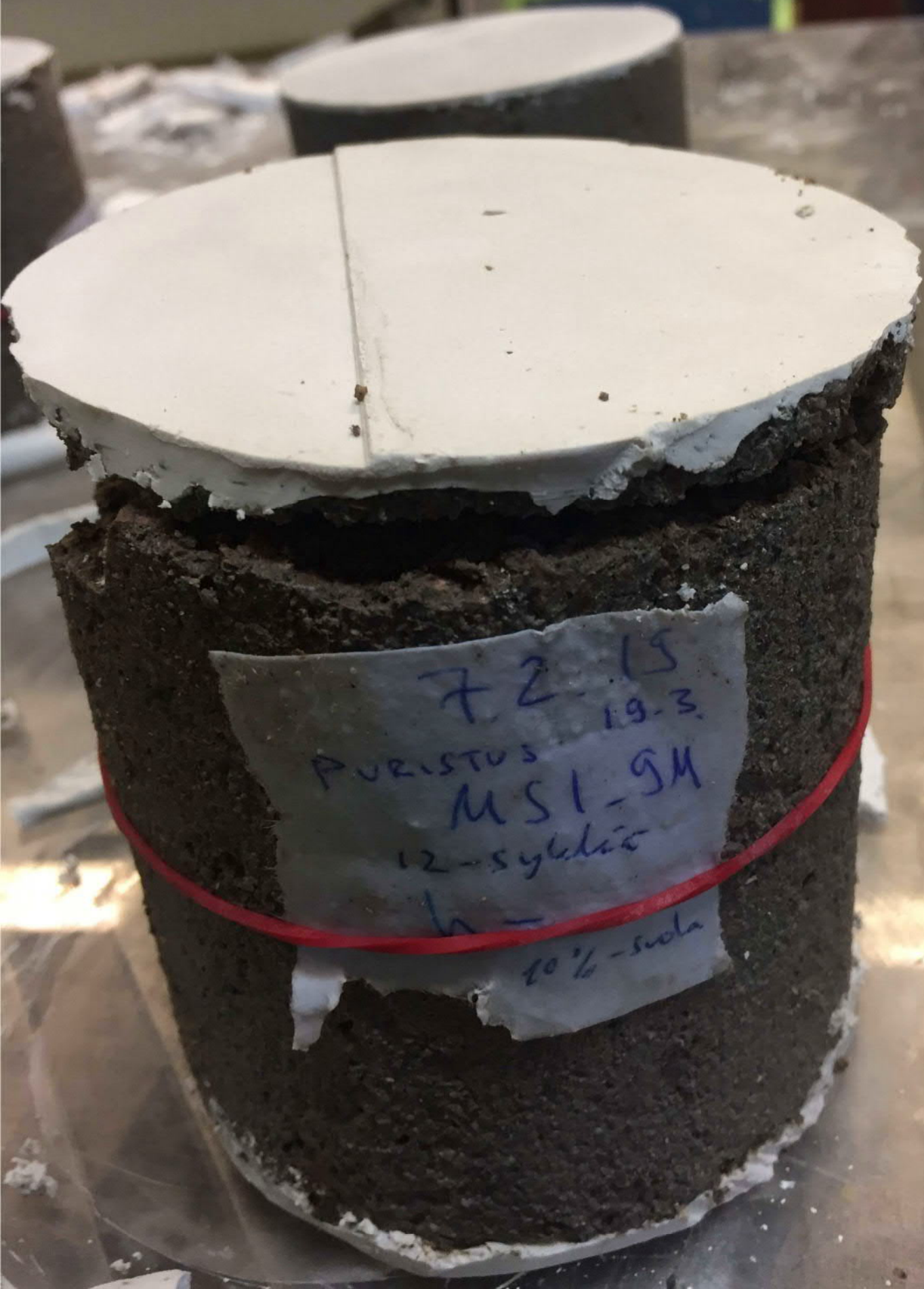
Liite 7 (1/6)



Suola 7,5% 19.3.19
MS1_8 & 9

Murske + sementti (2%)
12-sykliä ja sulamisveden
suolapitoisuus 7,5 %

Liite 7 (2/6)



72-15
19-3
PURISTUS
MSI-9M
12-sykliä
h-
10%-suola

Murske + sementti (2%)
12-sykliä ja sulamisveden
suolapitoisuus 7,5 %

Liite 7 (3/6)



Murske + sementti (2%)
12-sykliä ja sulamisveden
suolapitoisuus 7,5 %

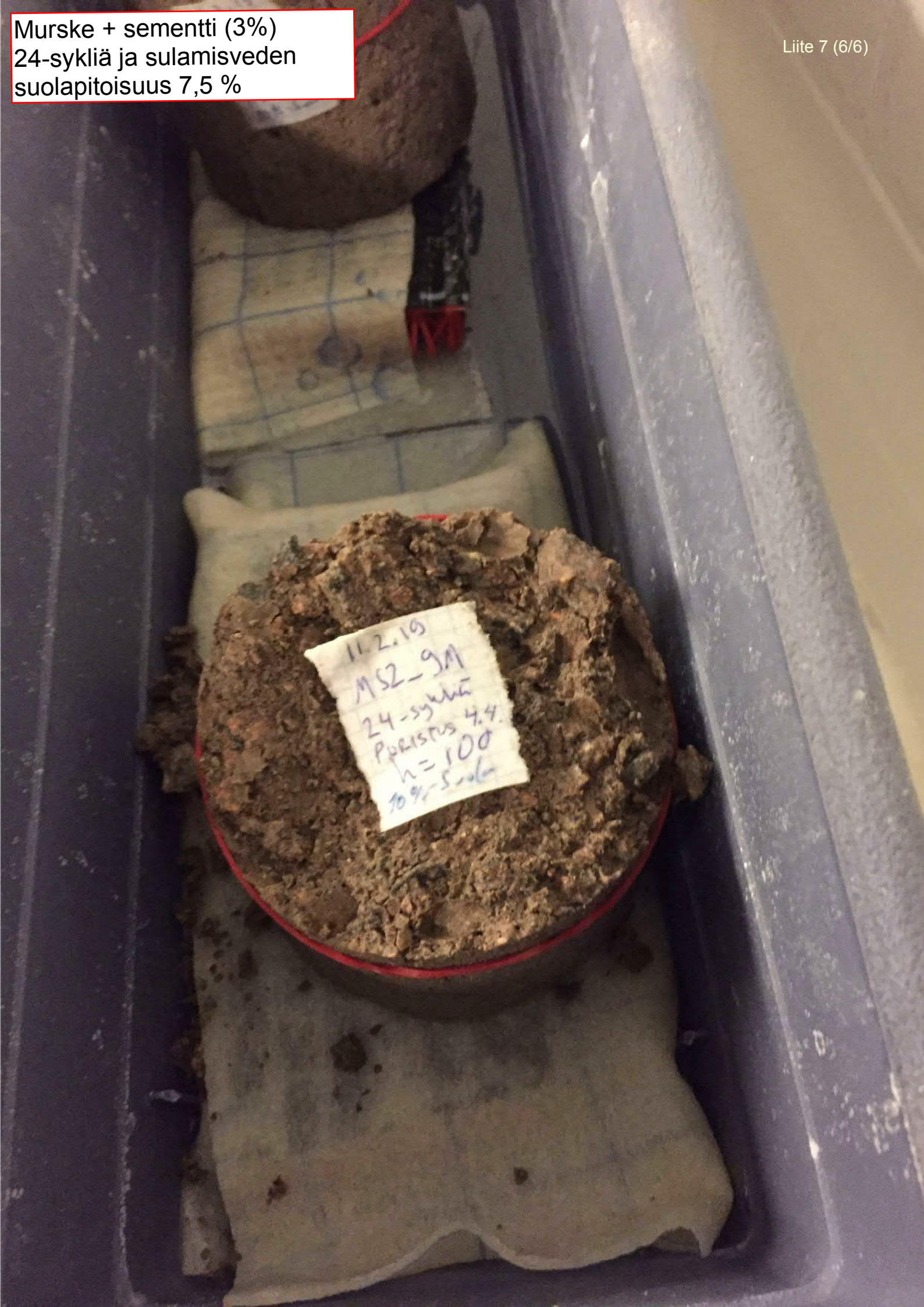


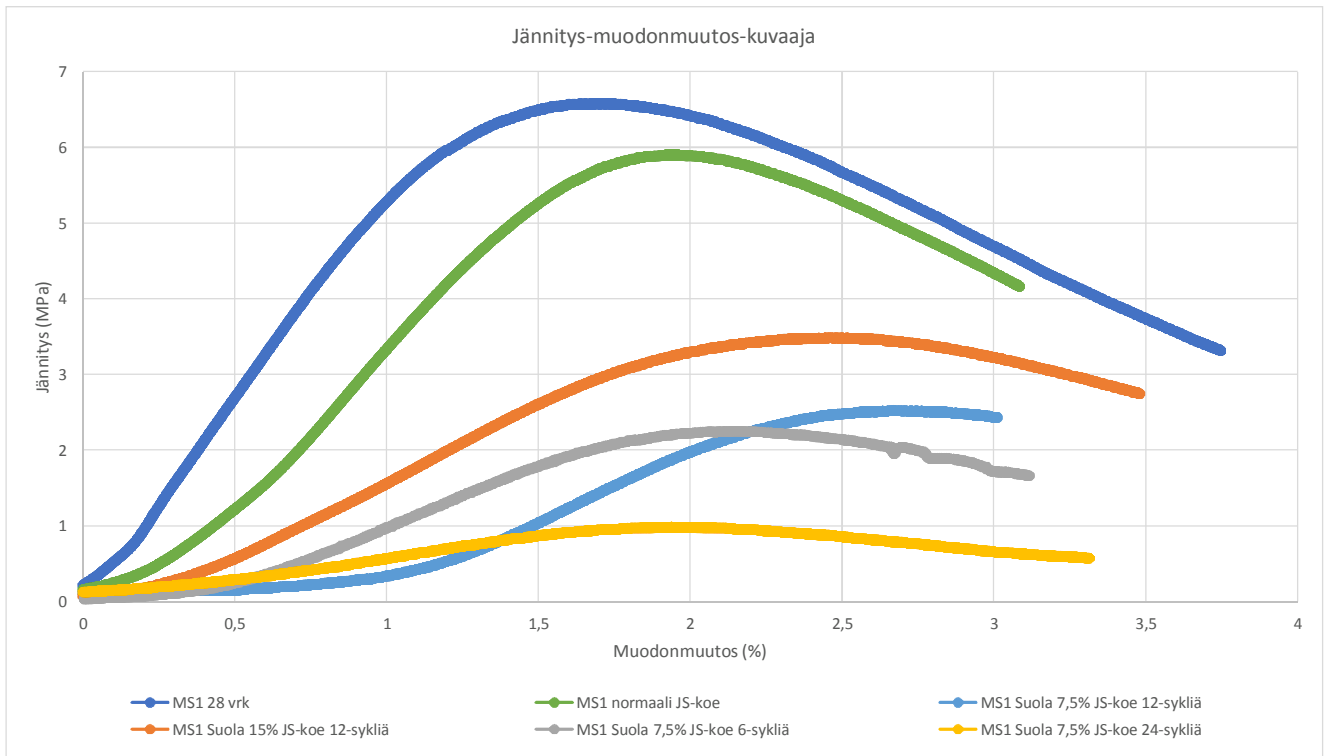
Murske + sementti (3%)
24-sykliä ja sulamisveden
suolapitoisuus 7,5 %

11.2.19
MS2_8M
24-sykliä
porisuus 44
n = 100
10%-Sola

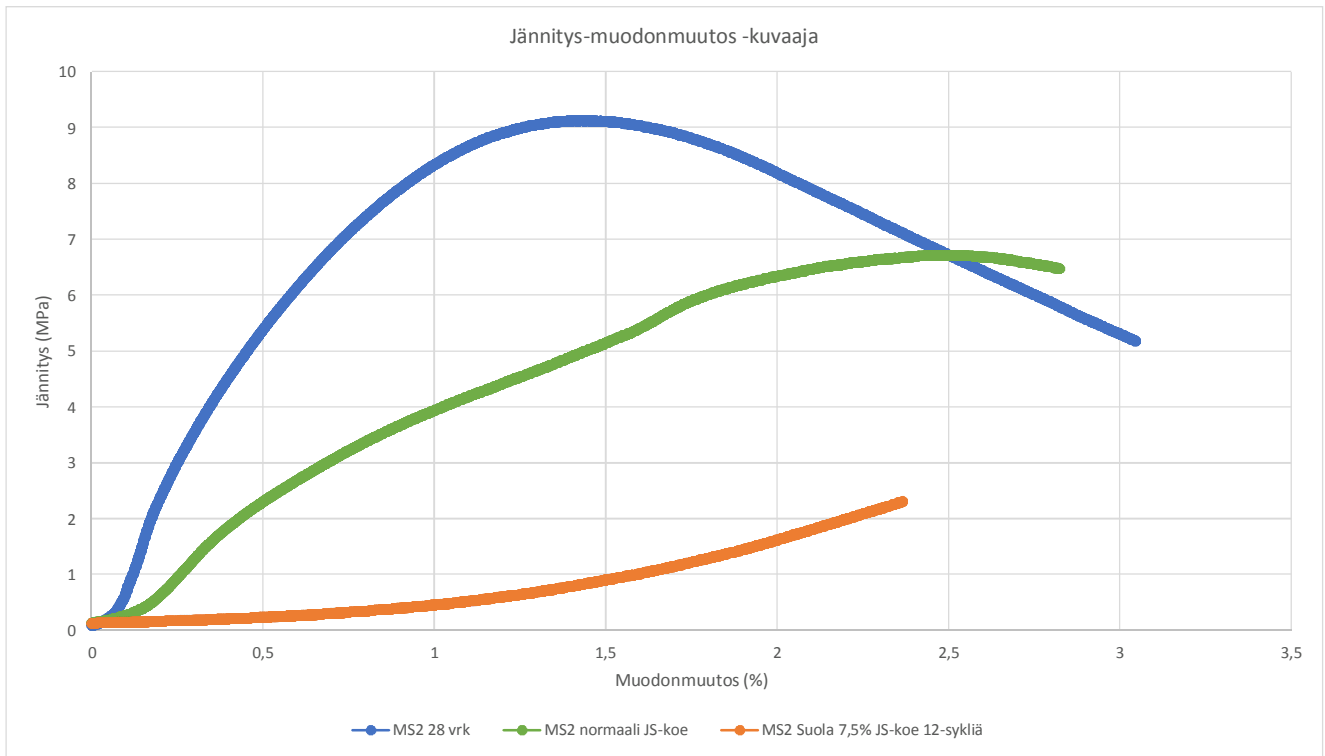
Murske + sementti (3%)
24-sykliä ja sulamisveden
suolapitoisuus 7,5 %

11.2.19
MS2-9A
24-sykliä
Ppistös 4,4.
h = 100
70% S-ala

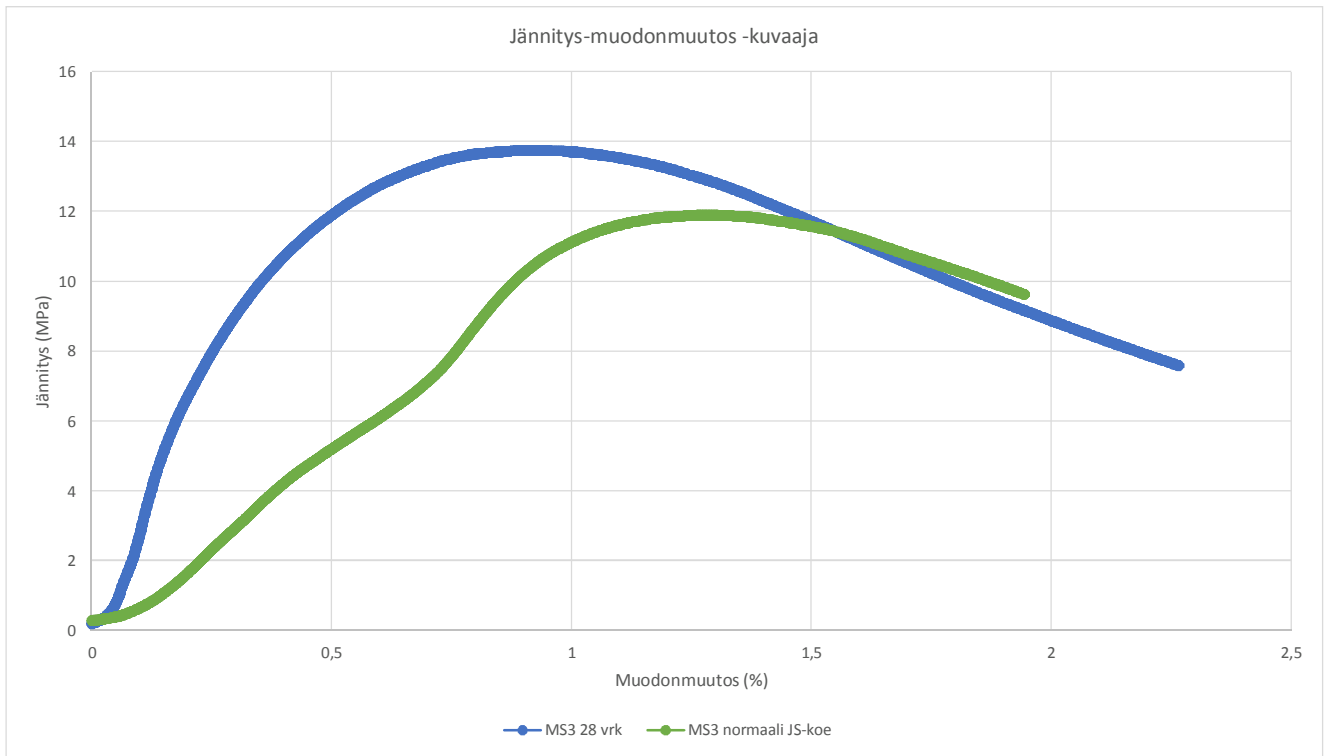




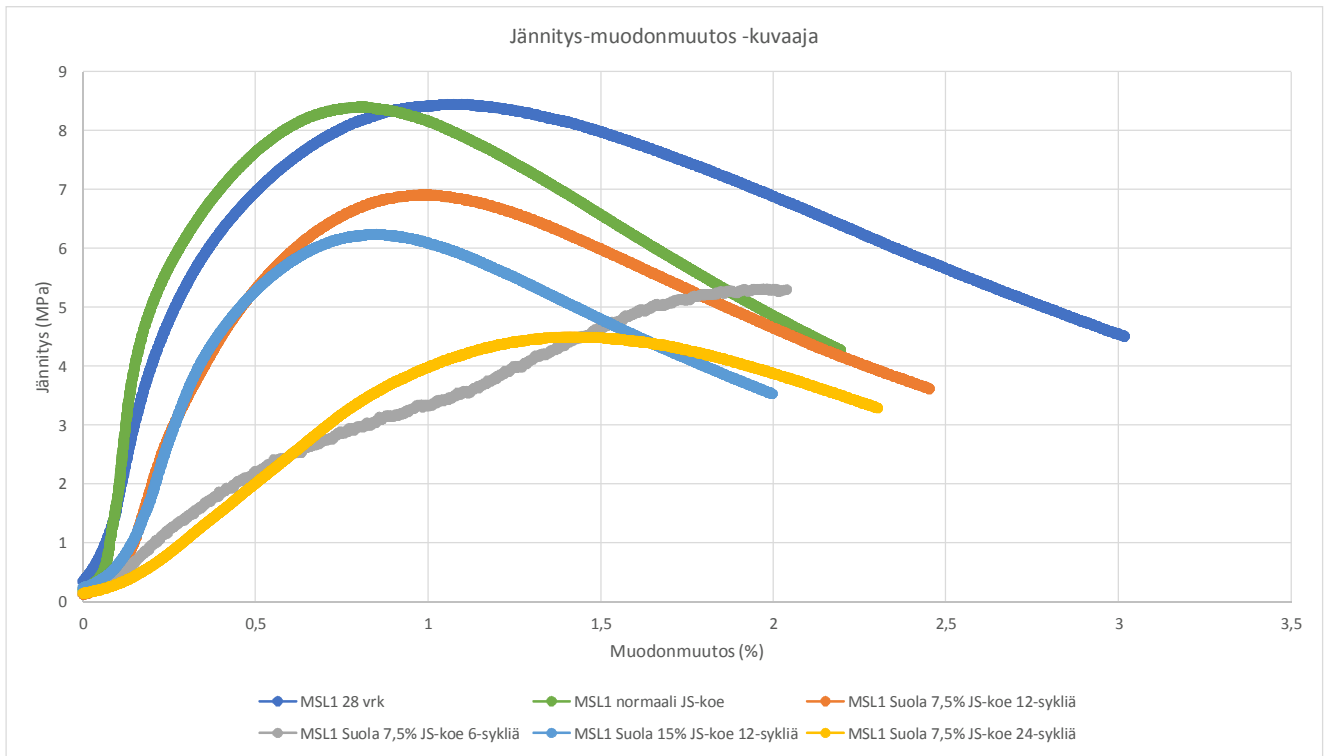
MURSKKE + SEMENTTI (2%)



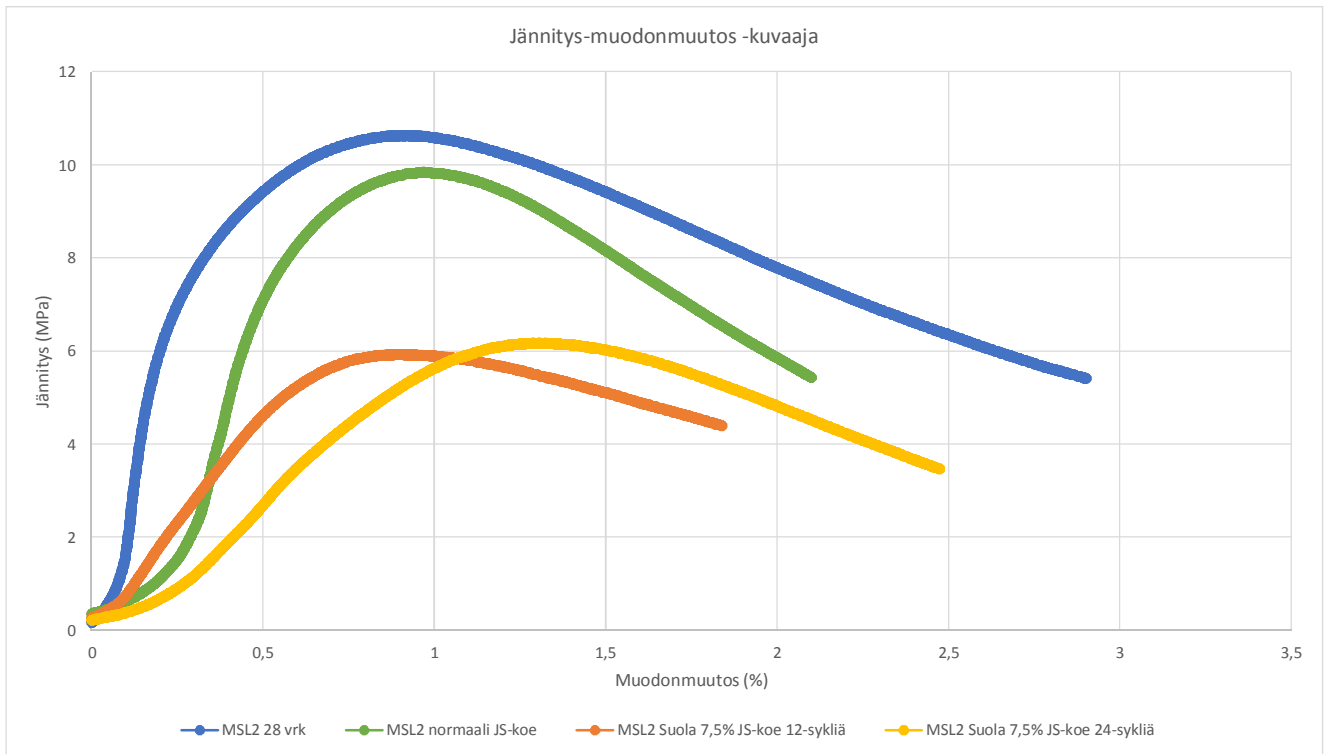
MURSKE + SEMENTTI (3%)



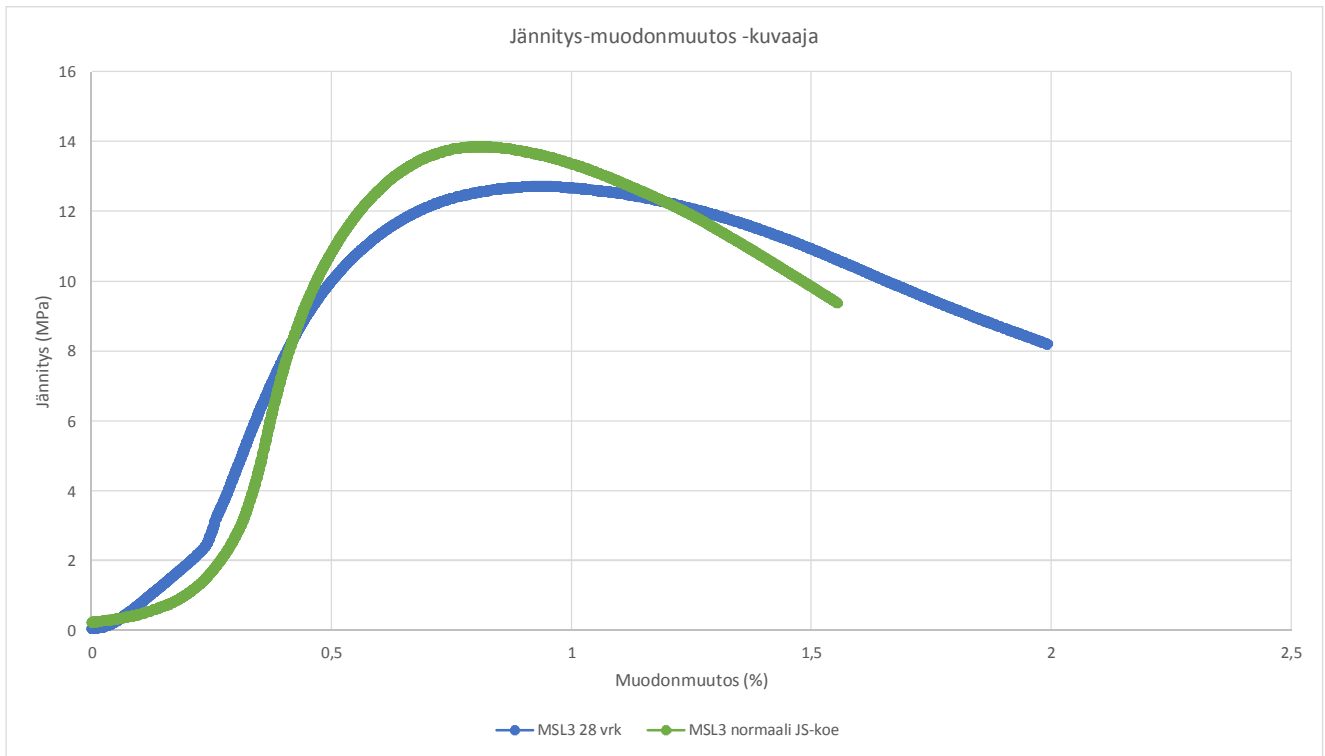
MURSKE + SEMENTTI (5%)



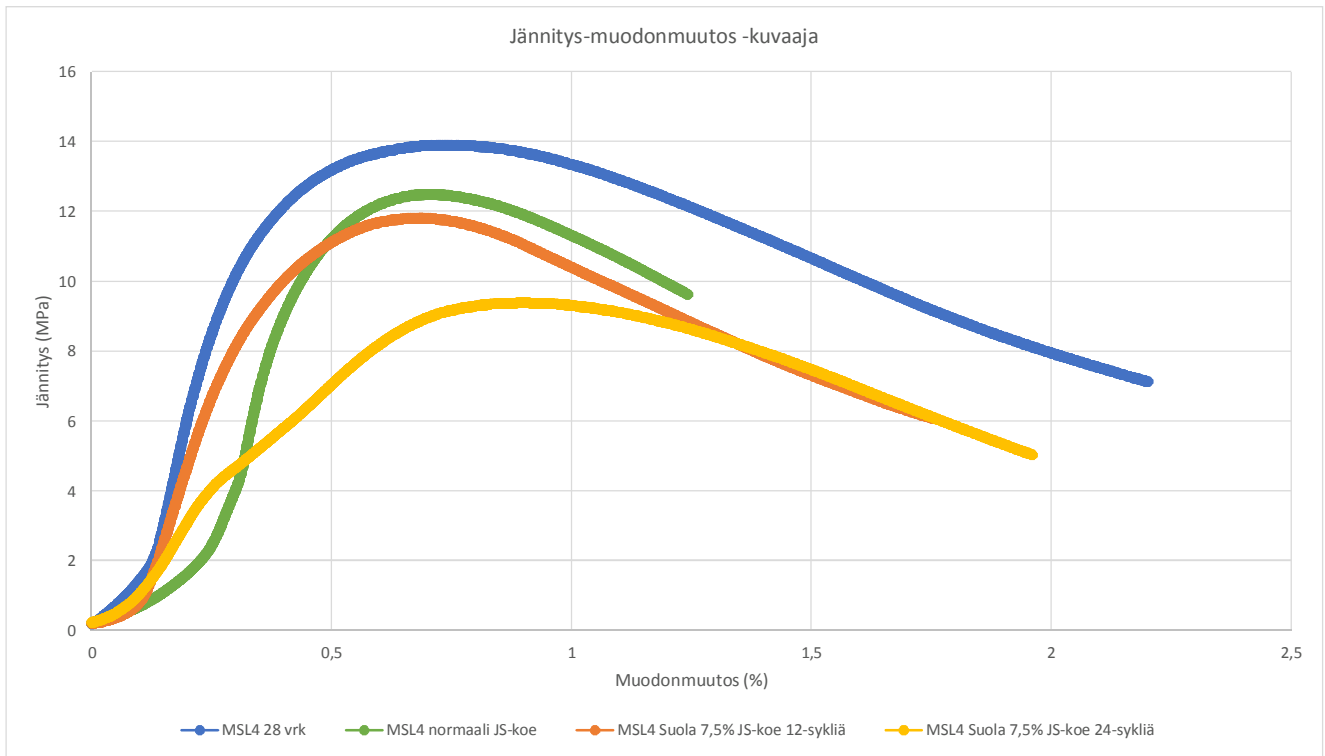
MURSKKE + SEMENTTI (2%) + LENTOTUHKA (6%)



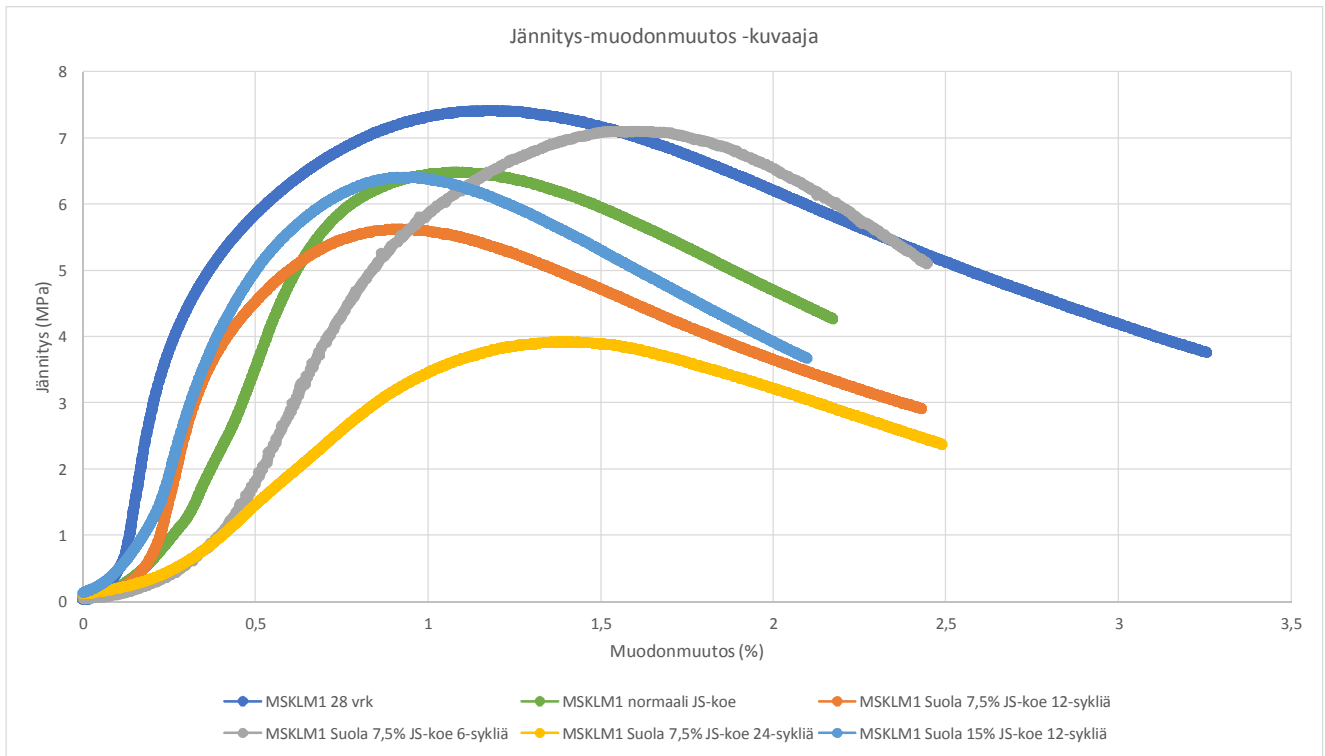
MURSKE + SEMENTTI (3%) + LENTOTUHKA (6%)



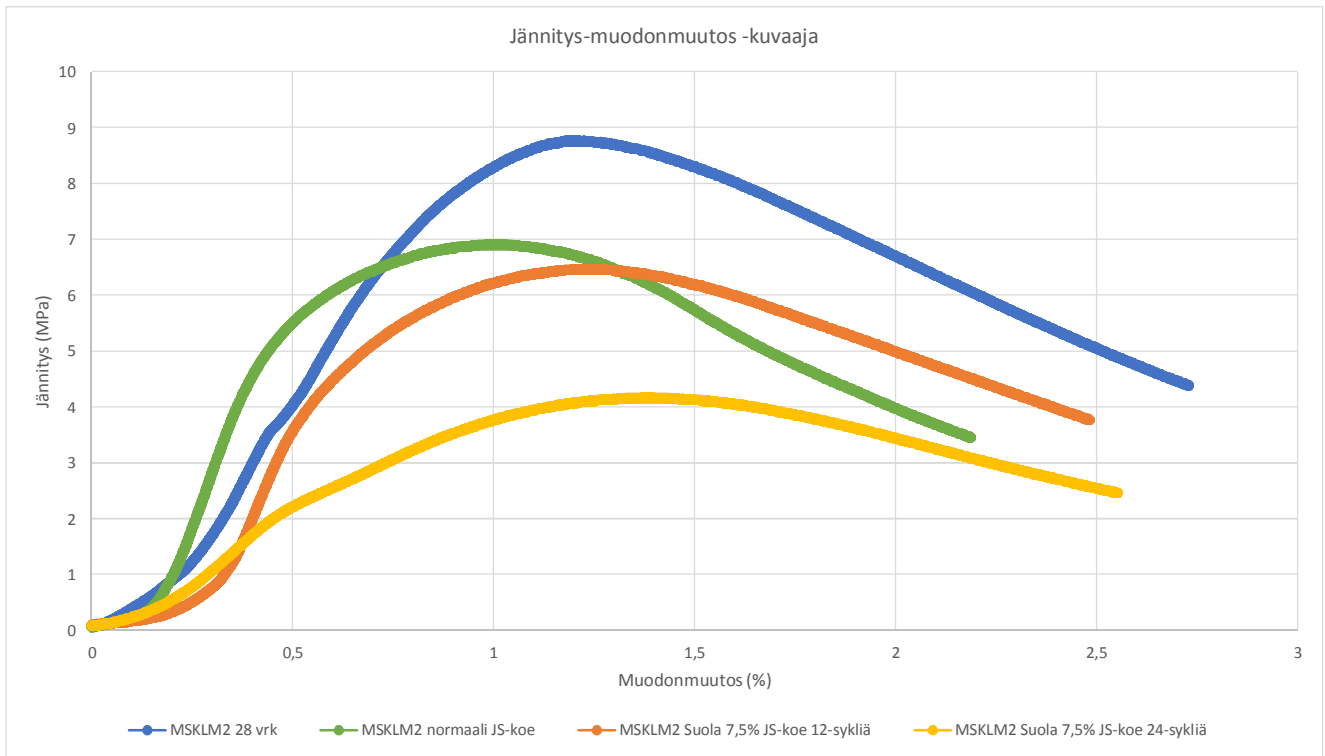
MURSKE + SEMENTTI (3%) + LENTOTUHKA (9%)



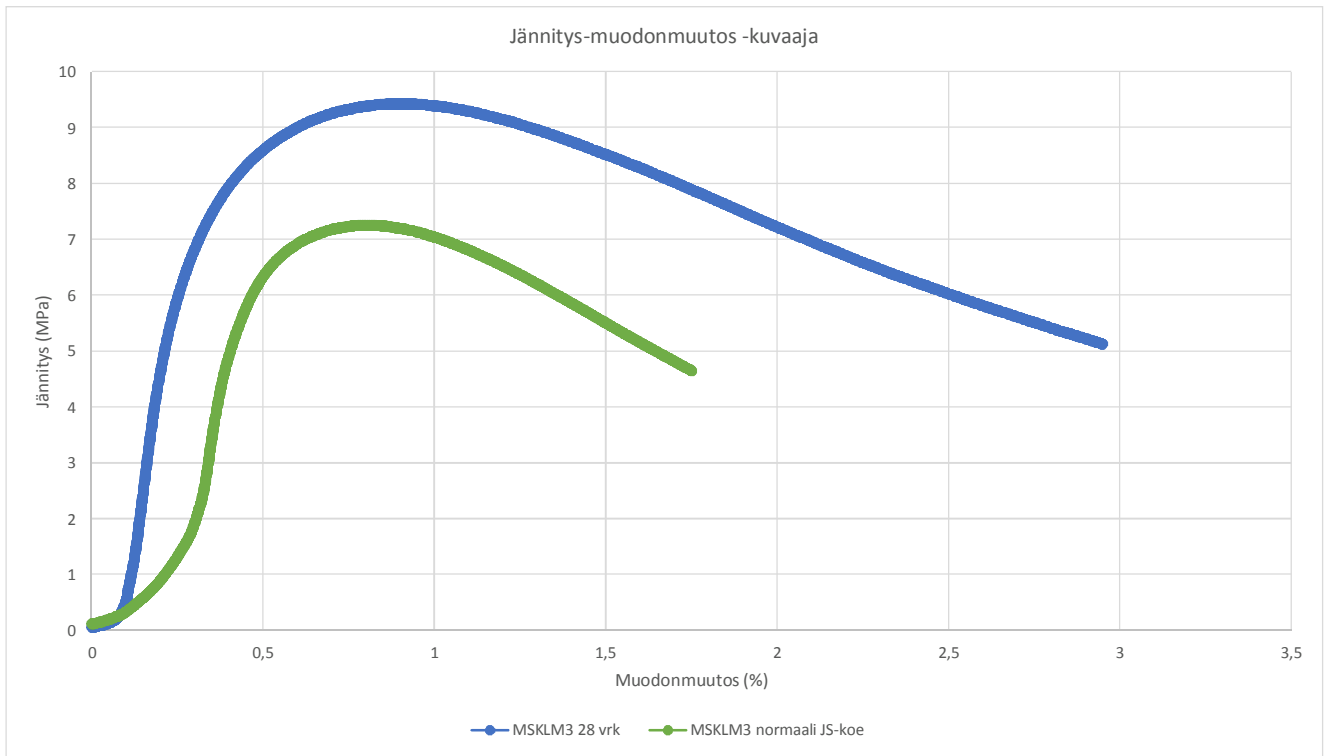
MURSKKE + SEMENTTI (4%) + LENTOTUHKA (8%)



MURSKE + SEMENTTI (1,5%) + KIPSI (3%) + LENTOTUHKA (3%) + MASUUNIKUONA (1,5%)



MURSKE + SEMENTTI (1,5%) + KIPSI (4,5%) + LENTOTUHKA (4,5%) + MASUUNIKUONA (1,5%)



MURSKE + SEMENTTI (2%) + KIPSI (4%) + LENTOTUHKA (4%) + MASUUNIKUONA (2%)