



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**VOIMALAITOSTUHKIEN KÄYTTÖ SASSIN
PIENLENTOPAIKAN LIIKENNEALUEEN
PÄÄLLYSRAKENTEISSA**

Antti Laurila

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Huhtikuu 2018



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**VOIMALAITOSTUHKIEN KÄYTTÖ SASSIN
PIENLENTOPAIKAN LIIKENNEALUEEN
PÄÄLLYSRAKENTEISSA**

Antti Laurila

Ohjaajat: Kauko Kujala, Heini Postila, Marjo Koivulahti, Janne Sikiö

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Huhtikuu 2018

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma		Pääaineintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Laurila, Antti		Työn ohjaaja yliopistolla Kujala, K. Professori Postila, H. Tutkijatohtori	
Työn nimi Voimalaitostuhkien käyttö Sassin pienlentopaikan liikennealueen päällysrakenteissa			
Opintosuunta Vesi- ja yhdyskuntatekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Huhtikuu 2018	Sivumäärä 80 s., 2 liitettä
Tiivistelmä			
<p>Diplomityö käsittelee tuhkamateriaalien hyötykäyttömahdollisuuksia päällysrakenteissa pienkoneille tarkoitetun lentopaikan liikennealueella. Työn aihe liittyy lentopaikkasuunnitelmiin Mänttä-Vilppulan kaupungissa, Sassin alueella, jolla on nykyisellään sorapintainen kiitotie, joka on ollut harrasteilmailukäytössä. Alueelle on tarkoitus rakentaa uudet asfalttipäällysteiset kiito- ja rullaustiet sekä asema-alue, joiden päällysrakenteissa on tarkoitus käyttää läheisen Mäntän Energian voimalaitoksen tuhkia. Tuhkien avulla pyritään saavuttamaan kustannussäästöjä sekä edistämään kiertotaloutta. Tuhkamateriaalien toimivuutta teiden ja alueiden päällysrakenteissa on testattu Suomessa lukuisissa kohteissa ja tuhkien ominaisuuksien on havaittu lisäävän rakenteen kantavuus- ja eristävyysominaisuuksia sekä kestävän hyvin Suomen ilmasto-olosuhteissa toistuvan jäätymisen ja sulamisen vaikutuksia. Tuhkien käyttöä lentopaikoilla ei ole kuitenkaan aiemmin Suomessa selvitetty.</p> <p>Työn keskeisenä tavoitteena on ottaa selvää, millaisia mekaanisia tai ympäristötekijöistä johtuvia rasituksia lentopaikkojen päällysrakenteen tulee kestää. Työssä pyritään selvittämään aiheuttaako lentopaikoille asetetut vaatimukset ehtoja tai rajoituksia tuhkarakenteiden käytölle. Työssä tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuusselvitystä ja tutkimusosassa käsitellään tuhkillle ja niistä tehdyille koekappaleille tehtyjen laboratoriotulosten tuloksia. Laboratoriotulosten avulla määritetään tuhkien käyttöluokittelun perusteella Sassin lentopaikalle soveltuvat tuhkat ja päällysrakennepperiaatteet. Työn tarkoitus on siten osaltaan palvella Mänttä-Vilppulan lentopaikkahankkeen kustannuslaskentaa ja kaavoitusta.</p> <p>Työssä selvitetyn perusteella voidaan todeta, että pienlentokoneille tarkoitetuille lentopaikoille tai suuremmillekaan lentopaikoille ei ole laadittu ohjeistusta suunnittelun tai rakenteen mitoituksen avuksi, eikä yksiselitteisiä kriteerejä kantavuudelle tai routanousulle ole esitetty. Tämä aiheuttaa myös lentopaikan tuhkarakenteiden mitoitukselle haasteensa. Toisaalta Mänttä-Vilppulaan suunnitellun lentopaikan liikenteen määrän ja kuormittavuuden perusteella pienlentopaikat ovat verrattavissa lähinnä vähäliikenteiseen katuun. Tällöin ne eivät myöskään vaadi merkittävästi tierakenteiden suunnittelusta poikkeavia mitoituskäytäntöjä. Kantavuusmitoituksessa kriittisimpiä vaatimuksia aiheuttavat huoltoajoneuvot, ja tästä syystä mahdollisten rakennevaihtoehtojen mitoituksessa päädyttiin käyttämään Suomen tierakenteenkin mitoituksessa yleisesti käytettyä Odemarkin menetelmää. Routamitoitus tehdään työssä myöskin tiesuunnitteluohjeilla. Sallittu laskennallinen routanousu rajoitettiin etenkin kiitotierakenteissa pieneksi suurien rullaus nopeuksien ja lentoturvallisuuden vuoksi. Routamitoituksen suhteen lentopaikan kiitotieosuudella tuleekin noudattaa lähinnä moottoritiehen verrattavia vaatimuksia. Tässä mielessä tuhkamateriaalit soveltuvat hyvin lentopaikalle, sillä tuhkan eristävyysominaisuudet ovat luonnonmateriaaleihin nähden merkittävästi suurempia.</p> <p>Työn laboratoriotutkimusten perusteella Mäntän voimalaitoksen lentotuhkista voidaan rakentaa lentopaikalle teknisesti toimivat rakenteet massiivituhkaa ja/tai kerrosstabilointia käyttäen. Massiivituhka toimii hyvänä eristemateriaalina ja kerrosstabilointia on syytä harkita kantavuuden parantamiseksi. Massiivilentotuhkan käytössä tulee huomioida kuitenkin lentotuhkalla todettu korkea kapillaarisuus ja herkkyys kapillaariveden vaikutuksille sekä mahdolliset kasvarastoinnin aiheuttamat ominaisuuksien muutokset.</p> <p>Diplomityön tuloksia voidaan jatkossa hyödyntää Mänttä-Vilppulan lentopaikan rakennussuunnittelussa tai muilla pienlentopaikoilla harkittaessa tuhkien käyttöä uuden lentopaikan rakentamisessa tai vanhan rakenteen parantamisessa. Huomattavaa on, että tuhkamateriaalit ja niiden käyttöedellytykset tulee tutkia aina kohde- ja materiaaliikohtaisesti, sillä eri voimalaitosten tuhkien ominaisuudet vaihtelevat keskenään merkittävästi.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT

FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Environmental Engineering Degree Programme		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Laurila, Antti		Thesis Supervisor Kujala, K. Professor Postila, H. Postdoctoral Researcher	
Title of Thesis Use of power plant ashes in the pavements of traffic area in Sassi small aerodrome			
Major Subject Water resource and Civil Engineering	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date April 2018	Number of Pages 80 s., 2 appendix
Abstract <p>In the Master's Thesis is studied the utilization of ashes in the pavement of small aerodrome. The subject of the thesis is related to aerodrome planning in city of Mänttä-Vilppula in Sassi area. In the area is now gravel-surfaced runway that has been in use of the recreational aviation. The purpose is to build asphalt-coated runway, taxiway and apron whose pavement is used ash materials from the nearby Mäntän Energia power plant. In this way aims to get cost savings and promote the circular economy. In Finland, the ashes have been used in road structures in recent decades and properties of ashes have often improved the properties of road structure. However, using of ashes has not been studied in the aerodromes in Finland.</p> <p>The important purpose of the thesis is to define the requirements for pavement of aerodrome and find out, what kind of mechanistic and environmental loads the structure must withstand. This is important thing that affect the using of ashes in the pavement. In the thesis, the research methods are used literature review and in the research part is analyzed the results of the laboratory tests of ashes and test pieces made from them. Based on the results the use categories of ashes and their utilization possibilities are determined.</p> <p>Based on this study can be said that in Finland haven't any design manual for designing the pavement of light loaded aerodrome which could be apply in the designing. For aviation area haven't design criteria for example the target bearing capacity or allowed frost action values like in the Finnish road designing manuals. But on the other hand, based on the traffic volume and loading the light loaded aerodromes can typically compare to low-traffic streets and the highest loads are caused by the service vehicles. In this case, designing doesn't require any special practices either. However, the allowed frost action must be limited very low especially in the runway section because of safety and high taxing speed. Typically, the ashes are better insulating material than the natural mineral aggregates and in that regard, they are ideal materials for aerodromes. In this thesis the bearing capacity designing of pavement is done using the Odemark's method and the frost designing also using typical road design method.</p> <p>Based on the laboratory test, pavements of aerodrome can be used the fly ashes from Mäntän Energia power plant. The fly ashes can be used as a massive fly ash to decrease the frost action and/or as a binder in layer stabilization of base course to improve the bearing capacity of pavement. However, in the use of massive fly ash should be taken into account the high capillary rises in fly ash and possible effects of storing on properties of fly ash.</p> <p>Results of Master's thesis can be utilized construction planning of Mänttä-Vilppula aerodrome and in other small aerodromes when the use of ashes is considered in construction of new aerodrome or repairing of old pavements. Properties of ashes variate very much and so the properties of them must be studied by material- and target-specific laboratory tests and studies.</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Diplomityö tuhkien hyötykäyttömahdollisuuksista Sassin pienlentopaikan päällysrakenteissa on tehty Ramboll Finland Oy:ssä, Oulun toimistolla, lokakuun 2017 ja huhtikuun 2018 välisenä aikana. Työ tehtiin Rambollin omarahoitteisena selvityksenä. Työn valvojana on toiminut professori Kauko Kujala Oulun yliopistosta. Ohjaajina ovat toimineet tutkijatohtori Heini Postila Oulun yliopistosta sekä DI Marjo Koivulahti ja DI Janne Sikiö Ramboll Finland Oy:stä.

Kiitän kaikkia ohjaajia ja valvojaa tähän työhön annetusta ohjauksesta, materiaaleista ja käytetystä ajasta. Ohjaajien lisäksi kiitän Ari Mäkistä ja muuta Rambollin Luopiosten toimipisteen väkeä laboratoriotöiden tuloksista ja niihin liittyvästä ohjauksesta sekä Trafin ylitarkastaja Heikki Silpolaa ilmailun säädöksiä ja määräyksiä koskevista kommentteista. Kiitokset lausun myös perheelleni ja erityisesti vaimolleni Elisabetille kärsivällisyydestä ja kaikesta annetusta tuesta opintojen ja diplomityön aikana.

Oulussa, 29.3.2018

Antti Laurila

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

TERMIT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	8
1.1 Työn tausta	8
1.2 Työn tavoitteet, hypoteesit ja rajausta	9
2 LENTOPAIKAN ERITYISPIIRTEET	11
2.1 Ilmailualan määräykset ja ohjaus	11
2.2 Lentopaikan alueet ja rakenneperiaatteet	12
2.3 Lentopaikan päällysrakenteen suunnittelu ja mitoitus	15
2.4 Lentoliikenteen aiheuttamat mekaaniset kuormat ja kantavuusvaatimukset	18
2.5 Lentopaikan liikennealueen routanousuvaatimukset	21
3 SASSIN LENTOPAIKAN KUVAUS JA SUUNNITTELUPERUSTEET	23
3.1 Nykytila	23
3.2 Suunnitelmat	23
3.3 Lentopaikan päällysrakenteen suunnittelu- ja mitoitusperusteet	25
4 TUHKAMATERIAALIT PÄÄLLYSRAKENTEISSA	28
4.1 Aiempi tieto tuhkan käytöstä	28
4.2 Lainsäädäntö	29
4.3 Tuhkien tyypilliset ominaisuudet ja rajoitukset	30
4.4 Ympäristöominaisuudet	31
4.5 Lentotuhkien lujuus- ja routivuusominaisuudet	32
4.6 Pohjatuhkien lujuus- ja routivuusominaisuudet	33
4.7 Tuhkamateriaalien käyttö ja rajoitukset	34
5 TUTKITTAVAT MATERIAALIT JA KOEMENETELMÄT	38
5.1 Tutkittavat materiaalit	38
5.2 Materiaalien perusominaisuuksien määrittäminen	38
5.3 Koekappaletutkimukset rakenteita varten	41
5.3.1 Koekappaletutkimusten menetelmäkuvaukset	42
5.3.2 Massiivituhkakoekappaleet ja niille suoritettavat testit	46
5.3.3 Kerrosstabiloinnin koekappaleet ja niille suoritettavat testit	48

6 TUTKIMUSTULOKSET	50
6.1 Tuhkamateriaalien perusominaisuudet.....	50
6.2 Tuhkakoekappaleiden ominaisuudet.....	51
6.2.1 Massiivilentotuhkakoekappaleet.....	51
6.2.2 Pohjatuhkakoekappaleet	55
6.2.3 Kerrosstabiloinnin koekappaleet	56
6.3 Ympäristökelpoisuus.....	58
7 SASSIN LENTOPAIKAN TUHKARAKENTEIDEN MITOITTAMINEN JA VAIHTOEHTOVERTAILU	59
7.1 Rakenteiden mitoitus ja mitoitusperusteet	59
7.1.1 Kantavuus	60
7.1.2 Routanousu	61
7.2 Vaihtoehtoja kiitotierakenteelle	62
7.3 Vaihtoehtoja rullaustierakenteelle.....	65
7.4 Vastaavat perinteiset päällysrakennevaihtoehdot	67
8 RAKENTAMINEN	69
8.1 Muodostuvien soveltuvien tuhkien määrä	69
8.2 Varastointi ja logistiikka	69
8.3 Rakentamisen laadunvalvonta.....	70
9 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	71
10 YHTEENVETO	73
LÄHTEET.....	75
LIITTEET	81

LIITTEET:

Liite 1. Puristuslujuustestien tulostuslomakkeet

Liite 2. Rakennemitoitustaulukot

TERMIT JA LYHENTEET

ACN	Ilma-aluksen luokitusluku (Aircraft classification number), jolla ilmaistaan ilma-aluksen suhteellinen kuormitusvaikutus päällysrakenteeseen tietyllä pohjamaaluokalla.
CBR	Californian Bearing Ratio, Tarkoitetaan materiaalin suhteellista kantavuusarvoa, joka määritetään CBR -kokeella. Kokeessa verrataan testattavan materiaalin kantavuutta standardoituun 100% CBR-arvoa vastaavaan materiaaliin.
FAA	Federal Aviation Administration, Yhdysvaltojen liittovaltion ilmailuhallinto
ICAO	International Civil Aviation Organization, kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö
JS -koe	Jäädytys-sulatuskoe
Kiitotie	Maalentopaikalle määritetty suorakaiteen muotoinen alue, joka on kunnostettu ilma-alusten laskua ja lentoonlähtöä varten.
Kiitoalue	Lentopaikan alue, jonka sisällä kiitotie ja mahdollinen pysäytystie ovat ja jonka tarkoitus on vähentää vaurioriskiä ilma-aluksen suistuessa kiitotieltä sekä suojata kiitoalueen yläpuolella lentävää ilma-alusta sen lentoonlähden ja laskun aikana.
Lentoasema	Lentopaikka, jossa lentotiedotuspalvelu, hälytyspalvelu, ilmaliikenteen neuvontapalvelu ja lennonjohtopalvelu on pysyvästi järjestetty.

Lentopaikka	Tarkoittaa määrättyä maa- tai vesialuetta, joka on kokonaan tai osittain järjestetty ilma-alusten saapumista, lähtemistä ja maassa tai vedessä liikkumista varten.
Liikennealue	Ilma-alusten lentoonlähtöön, laskuun ja rullaukseen tarkoitettu lentopaikan osa lukuun ottamatta asematasoja.
LT	Lentotuhka, savukaasujen mukana polttoprosessista poistuva hienorakeinen tuhka.
PCN	Päällysrakenteen luokitusluku (Pavement Classification Number), jolla ilmaistaan päällysrakenteen kantavuus, kun rasisuskertojen määrää ei ole rajoitettu.
PlusSe	Plussementti, kaupallinen normaalisti kovettuva portlandseossementti
PPL-lupakirja	Privat Pilot Licence, Yksityislentäjän lupakirja.
PT	Pohjatuhka, Polttoprosessissa arina- ja pölypolttokattiloissa syntyvä karkea tuhka.
SPo	Segregaatiopotentiaali [mm^2/Kh]

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Uusiomateriaalien käyttö maarakentamisessa on lisääntynyt tämän vuosituhannen ja varsinkin viime vuosien aikana merkittävästi (Inkeröinen ym. 2010). Useilla uusiomateriaaleilla, kuten tuhkillä, on tie- ja aluekohteissa todettu olevan muun muassa merkittäviä lujuus- ja eristävyysominaisuuksia, joiden avulla rakennekerroksia voidaan ohentaa ja silti saavutetaan esimerkiksi pidempi käyttöikä (Lahtinen 2010). Tämän diplomityön tarkastelukohteena ovat lentopaikat ovat usein laajoja alueita, joiden rakentaminen ja kunnostus kuluttavat perinteisesti melko suuren määrän neitseellisiä luonnonkiviaineita.

Suomessa on 2000 -luvulla rakennettu kolme siviili-ilmailun pienlentopaikkaa; vuonna 2001 Huittisten Vampulaan, 2010 Ähtäriin (Lentopaikat.fi 2017) sekä viimeisimpänä vielä keskeneräinen lentopaikka Pyhtäälle (Tahkokorpi 2017). Lentopaikkojen infrastruktuurin rakentamista ohjaavat yleispiirteisesti Euroopan komission asetukset ja valvomattomilla lentopaikoilla joiltakin osin Suomen kansalliset ilmailumääräykset. Nämä pohjautuvat kansainvälisen siviili-ilmailuliiton määräyksiin ja ohjeisiin. Lentopaikka -käsite on laaja, joten lentopaikkojen joukkoon mahtuu vaihtelevan kokoisia ja vaativuudeltaan erilaisia ilmailutoiminnalle varattuja alueita (RIL 2006). Muun infrarakentamisen tavoin lentopaikka-alueet voisivat kuitenkin mahdollisuuden uusiomateriaalien hyötykäytölle ja kiertotalouden edistämiseksi uusien lentopaikkojen rakentamisessa sekä päällysrakenteiden parantamisessa.

Jotta tuhkamateriaaleja voidaan käyttää korvaamaan kiviaineita, tulee niiden teknisten ominaisuuksien, maarakentamiskelpoisuuden ja tasalaatuisuuden osalta kuitenkin soveltua kohteeseen ja niihin rakennekerroksiin, joissa tuhkia on suunniteltu käytettävän. Näitä ominaisuuksia tulee tarkastella kohdekohtaisesti niin, että tekniset ja toiminnalliset vaatimukset täyttyvät. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017) Lentopaikkoihin kohdennettua tuhkarakenteiden käytön tarkastelua ei ole aiemmin Suomessa tehty tai raportoitu edes yleispiirteisesti.

1.2 Työn tavoitteet, hypoteesit ja rajaus

Diplomityössä käsitellään voimalaitoksen polttoprosesseissa syntyneiden bioperäisten lento- ja pohjatuhkien soveltuvuutta lentopaikan liikennealueen rakenteisiin. Työn pohjautuu lentopaikkasuunnitelmiin Mänttä-Vilppulan kaupungissa, Sassin alueella, jolla on nykyisellään sorapintainen kiitotie, joka on ollut harrasteilmailukäytössä. Alueelle on tarkoitus rakentaa uudet asfalttipäällysteiset kiito- ja rullaustiet sekä asema-alue, joiden päällysrakenteissa on tarkoitus käyttää läheisen Mäntän Energian voimalaitoksen tuhkia. Näiden avulla pyritään saavuttamaan kustannussäästöjä sekä edistämään kiertotaloutta. Selvityksen tarkoituksena on palvella osaltaan alueelle tehtävää asemakaavasunnittelua ja kustannuslaskentaa.

Työssä on kaksi keskeistä osaa. Aluksi työssä selvitetään, minkälaisia vaatimuksia on asetettu kevyille yleisilmailukoneille tarkoitettun lentopaikan liikennealueen rakenteille. Liikennealueeksi luetaan lentopaikan kiito- ja rullaustiet. Toisessa osassa pyritään selvittämään vaatimusten perusteella, voidaanko tuhkamateriaaleilla saavuttaa lentopaikalla asetetut kantavuus- ja routanousuvaatimukset, sekä millä edellytyksillä nämä ominaisuudet voidaan saavuttaa. Lentopaikan vaatimusten osalta selvitystä tehdään kirjallisuusselvityksenä ja tuhkamateriaalien osalta analysoimalla Mäntän Energian voimalaitoksen tuhkien laboratoriotuloksia. Laboratoriokokeisiin perustuen määritetään tuhkien käyttöluokat, ja niiden perusteella määritetään mahdollisia käyttökohteita päällysrakenteessa.

Hypoteesina on, että tuhkat ovat soveltuvia lentopaikkojen rakennemateriaaliksi samoin kuin tierakentamiseenkin, ja voivat korvata osittain perinteisiä luonnonmateriaaleja. Hypoteesina esitetään myös, että tuhkillä voidaan saavuttaa luonnonmateriaaleihin verrattuna ohuempia rakennekerroksia. Kriittisimmäksi tekijäksi tämän kokoluokan kentällä arvioidaan routanousu- ja tasaisuusvaatimusten täyttyminen.

Diplomityö on rajattu käsittelemään tuhkamateriaalien käyttöä ainoastaan lentopaikan liikennealueella eli kiitotien ja siihen yhtyvien rullausteiden rakenteissa. Työssä käsitellään tarkemmin ainoastaan kevyehköille yleisilmailukoneille tarkoitettujen lentopaikkojen rakennetta. Tuhkille ja tuhkarakenteille tehdään työssä teknistä tarkastelua. Tarkastelua taloudellisesta näkökulmasta ei tehdä, vaikka sen vaikutus rakenne- ja materiaaliratkaisuihin onkin keskeinen. Mäntän Energian voimalaitoksen

tuhkille tehtyjen laboratoriotulosten perusteella määritetään tuhkien käyttöluokat sekä määritetään kantavuus- ja routamitoitukseen perustuen alustavat rakennevaihtoehdot. Tuhkien ympäristökelpoisuustestien tuloksia tai rakentamista palvelevia laboratoriotutkimuksia ei ole mahdollista tutkia tässä työssä. Työssä ei ole myöskään tutkittu tuhkien soveltuvuutta kentille, joilla käytetään esimerkiksi sulanapitokemikaaleja. Koska tuhkarakenteista pidetään niiden lujittumisominaisuuksista huolimatta joustavina, keskitetään tutkimus teorian ja mitoituksen osalta pääasiassa joustaviin päällysrakenteisiin.

2 LENTOPAIKAN ERITYISPIIRTEET

Lentopaikka on yleisnimitys ilma-alusten laskeutumiseen, lentoonlähtöön ja pysäköimiseen tarkoitettulle paikalle. Se on terminä usein käytettyä yleiskielistä ja epävirallista, lentokenttä -termiä täsmällisempi. Lentopaikka – termiä voidaan käyttää niin suuren luokan vilkkaista lentoasemista kuin harrasteilmailun kevytlentopaikoistakin. Lentoasema – nimitys ei itsessään rajaa lentopaikan kokoa mutta lentoaseman määritelmän mukaisia pysyviä ilmailuliikenteen palveluja on yleensä vain kaupallisen liikenteen lentopaikoilla. (RIL 2006) Liikenneväylien luokittelussa lentopaikat kuuluvat erityisliikennealueisiin, joiden liikennekuormituksen määrä ja/tai laatu poikkeavat usein tie- ja katuviivasta. Suuremmilla lentopaikoilla liikenne vastaa lähinnä esimerkiksi teollisuusalueiden tai satamien liikennettä, jossa voi olla erityisen raskaista koneita mutta toisaalta liikenneyksiköiden määrä on vähäinen verrattuna teihin ja katuihin. (Ehrola 1996)

Tässä työssä syytä tehdä jako valvomattomien lentopaikkojen ja Liikenteen turvallisuusviraston sertifioidun lentoasemien välillä. Jako on tässä työssä merkittävä, koska tämä vaikuttaa myös osaltaan lentoliikenteen luonteeseen ja lentopaikalle asetettuihin vaatimuksiin. Tässä työssä tarkastelu keskitetäänkin pääasiassa kevyehköille yleisilmailukoneille tarkoitettuihin pienenttiin, jotka tavanomaisesti ovat valvomattomia.

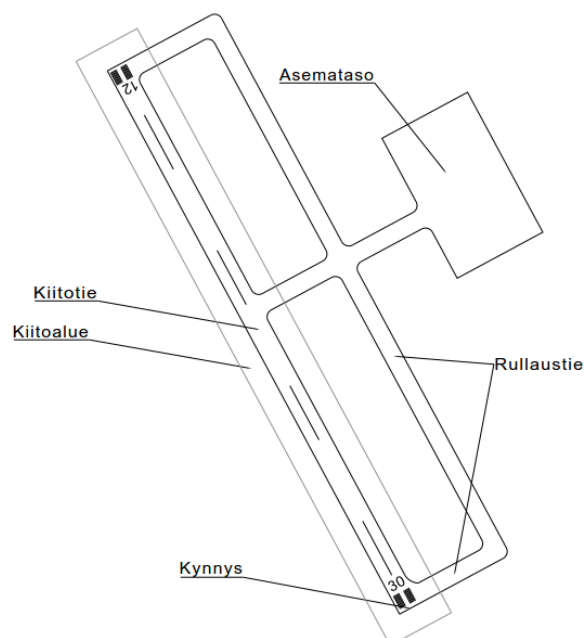
2.1 Ilmailualan määräykset ja ohjaus

Lentoliikenne on hyvin kansainvälinen toimiala. Ilmailualalla merkittävin kansainvälinen yhteistyöjärjestö on YK:n erityisjärjestönä toimiva Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO (International Civil Aviation Organization). Järjestön perustaminen on tehty kansainvälisellä Chicagon sopimuksella vuonna 1944. Tärkeimmät jäsenvaltioita ohjaavat kansainväliset määräykset ja suositukset on esitetty sopimuksen liitteissä (Annex), joista infrastruktuurin kannalta tärkein on ”Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation (2013)”. Liitteitä uudistetaan alan kehityksen mukaan. (RIL 2006) Laajemmin päällysrakennetta koskevaa ohjeistusta on esitetty dokumentissa Doc 9157 Aerodrome Design Manual, Part 3 Pavements. ICAO:n vaatimukset lentoasemien osalta on pantu täytäntöön Suomessakin lainvoimaisen yleiseurooppalaisen ilmailumääräyksen kautta (Commission Regulation (EU) No 139/2014) (Silpola 2017).

Useissa valtioissa on laadittu kansallisia standardeja ja suosituksia täydentämään ICAO:n dokumentteja. Näitä ovat julkaisseet esimerkiksi Yhdysvalloissa liittovaltion ilmailuhallinto FAA. (Kazda et al. 2015) Suomessa noudatetaan yleiseurooppalaisia EU-säädöksiä tai niiden puuttuessa maan kansallisia Liikenteen turvallisuusviraston määräyksiä, jotka perustuvat ICAO:n Annexeihin. (RIL 2006) Lentoasemia koskeva säädöspohja on EU asetuksessa No 139/2014. Liikenteen turvallisuusviraston kansallista määräystä AGA M1-1 (Aerodrome and Ground Aids) sovelletaan kuitenkin valvomattomiin siviili-ilmailun lentopaikkoihin (Trafi 2013). AGA M3 -sarjan ilmailumääräyksiä sovellettiin aiemmin lentoasemiin mutta vuoden 2018 alussa mm. kenttäalueen suunnittelua koskenut määräys M3-5 kumottiin. Jatkossa lentoaseman kenttäalueen suunnittelua ohjaa edellä mainittu EU -asetus. (Trafi 2018)

2.2 Lentopaikan alueet ja rakenneperiaatteet

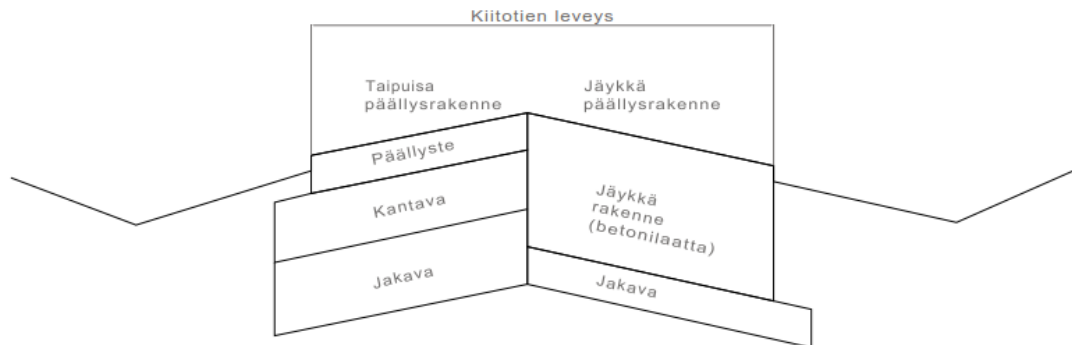
Lentopaikan eri alueiden, kuten suoja-alueiden tarve ja koko määritellään paikalla tapahtuvan lentotoiminnan mukaan (Trafi 2013). Pääpiirteissään lentopaikka sisältää kuitenkin kiitotien, kiitoalueen, rullaustiet sekä asematason (kuva 1).



Kuva 1. Lentopaikan periaatepiirustus (mukaillen Trafi 2013).

Liikenneväylien rakenneperiaatteet

Yleisesti ottaen liikenneväylien päällysrakenteen tehtävä on jakaa päällysteen pintaan kohdistuvat kuormat pohjamaalle niin, että sen kantavuusrajat eivät ylity. Lentopaikan päällysrakenteissa puhutaan tierakentamisen tapaan pääasiassa kahdesta päärakennetyypistä, taipuisasta ja jäykästä päällysrakenteesta (kuva 2).

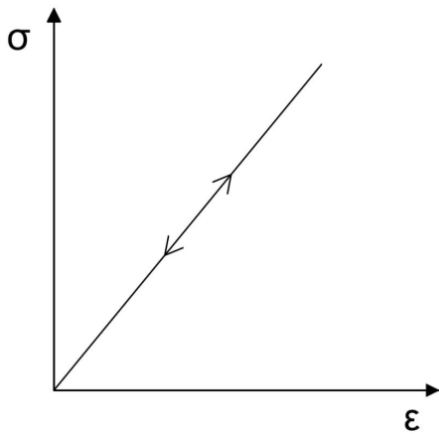


Kuva 2. Periaatteellinen päällysrakenteen leikkaus pienkoneille tarkoitetuilla kiito- ja rullausteilla (mukaillen FAA 2009)

Taipuisa ja jäykkä rakenne kuvastavat sitä, miten kyseiset päällysrakenteet toimivat kuormituksen alla. Jäykässä päällysrakenteessa usein esimerkiksi betonilaatta toimii sekä kulutuskerroksena että kantavan kerroksena. Joustava päällysrakenne koostuu kerroksista, joista ylimmät kerrokset ovat bitumilla sidottuja ja alemmat kerrokset tavanomaisesti sitomattomia. (ICAO 1983) Jäykkä rakenne toimii laattamaisesti, jakaen kuormituksista tulevat pystyjännitykset laajemmalle alueelle kuin joustavan päällysrakenteen sitomattomat kerrokset (ICAO 1983 ja Belt ym. 2002). Jäykän rakenteen alapinnassa toisaalta syntyy vetojännityksiä, jotka ovat sitä suurempia mitä jäykempi on rakenne. Päällysrakenteen toiminnan kannalta jäykän, sidotun kerroksen jäykkyyden tulisikin olla sopiva suhteessa alapuolisen kerroksen lujuuteen. Tästä syystä tavanomaisessa kerroksellisessa päällysrakenteessa lujuusominaisuudet kasvavatkin yleensä alimmista kerroksista kohti ylimpiä. Suomessa jäykän rakenteen käyttö on ongelmallista päällysrakenteissa, koska ne sietävät huonosti esimerkiksi routanousua (Ehrola 1996).

Rakenteiden jäykkyydestä

Tarkasteltaessa tarkemmin maarakenteiden ja -materiaalien käyttäytymistä kuormituksen alla, puhutaan erilaisista materiaalimalleista. Materiaalimalleihin liittyy keskeisesti moduuli -termi. Moduulilla kuvataan jännityksen- ja muodonmuutoksen välistä suhdetta, ja siten sillä ilmaistaan materiaalin jäykkyyttä. (Alkio ym. 2001) Lineaarisesti kimmoisille materiaaleille ja epälineaarisesti käyttäytyvät materiaaleille sovelletaan erilaisia malleja, koska ne käyttäytyvät toisistaan poikkeavilla tavoilla. Kimmoisuus tarkoittaa sitä, että kuormituksen alla muodonmuutos pysyy vakiona ja kuormituksen poistuessa se palautuu kokonaan ennalleen. Lineaarisesti kimmoisen materiaalin jännityksen ja muodonmuutoksen suhde on lineaarinen (kuva 3). (Ehrola 1996)



Kuva 3. Lineaarikimmoinen kuormitusmuodonmuutosvaste (Lätti 2015).

Lineaarikimmoinen käyttäytymistä kuvaa Hooken laki, joka voidaan esittää yhtälön 1 muodossa.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

missä

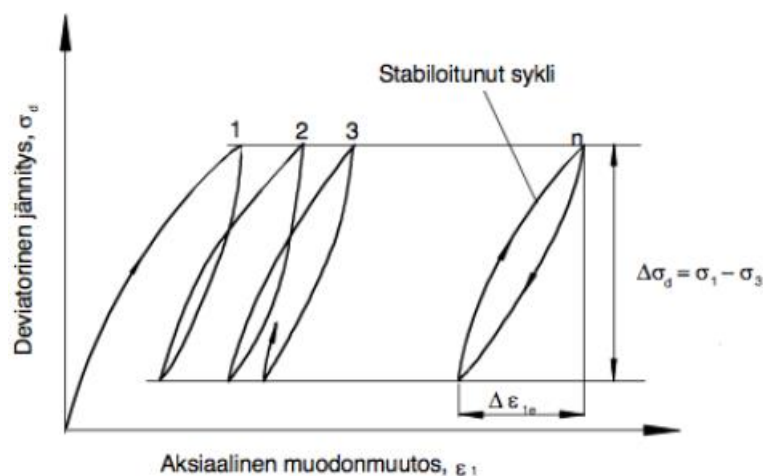
ε on suhteellinen muodonmuutos

σ jännitys

E kimmomoduuli

Yhtälössä esiintyvä kimmomoduuli E kuvaa kimmoisesti käytettävien materiaalien jännityksen ja muodonmuutoksen välistä suhdetta. Kimmomoduuli kuvaa varsin hyvin

etenkin homogeenisten ja isotrooppisten materiaalien, kuten metallien muodonmuutuskäyttäytymistä (Alkio ym. 2001). Matemaattisen tarkastelun helpottamiseksi myös maamateriaalien oletetaan käyttäytyvän lineaarikimmoisesti eli palautuvasti, mutta todellisuudessa niiden käyttäytyminen on aina osittain myös epälineaarista. (Ehrola 1996) Maamateriaaleissa kuormitus aiheuttaa aina osittain elastisen eli palautuvan sekä osittain plastisen eli pysyvän muodonmuutoksen. Todellista väylärakenteen toimintaa kuormituksen alla kuvaa paremmin elasto-plastinen teoria. (Alkio ym. 2001) Toistuvien kuormitusten alla palautumattomien muodonmuutosten osuus tierakenteessa kuitenkin pienenee (kuva 4; Ehrola 1996).



Kuva 4. Sitomattomien materiaalien jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen toistuvien kuormitusten alla (Oulun yliopisto 2016).

2.3 Lentopaikan päällysrakenteen suunnittelu ja mitoitus

Yleisesti ottaen liikenneväylien päällysrakenteiden suunnittelulla pyritään siihen, että väylän pinta voisi olla, ja pysyä, sille asetetun palvelutason vaatimassa kunnossa koko suunnitellun ajanjakson (Ehrola 1996). Lentopaikoilla päällysrakenteiden mitoitusikä on joustavilla päällysrakenteilla yleensä 20 vuotta ja jäykillä 30 vuotta (RIL 2006). Lentopaikan päällysrakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa keskeisimmät tekijät ovat lentoturvallisuuteen merkittävästi vaikuttavat liikennealueiden tasaisuus sekä kantavuus. Tasaisuudella tavoitellaan, että painumat ja routanousu pysyvät sallittavissa rajoissa koko suunnitellun käyttöiän. Kantavuuden tulisi puolestaan olla sellainen, että se kestää kentällä liikennöimään tarkoitettujen ilma-alusten laskeutumisen, lento-onlähdon ja rullauksen (EASA 2017).

Suomessa siviili-ilmailuun tarkoitettujen valvomattomien lentopaikkojen osalta ei ole olemassa yksityiskohtaisia suunnitteluohjeita päällysrakenteen suunnitteluun (Silpola 2017). Suomen olosuhteissa merkittävä päällysrakenteen suunnitteluun vaikuttava tekijä on routiminen, joka tulee usein rakenteen kokonaispaksuutta määrääväksi tekijäksi silloin, kun kenttä sijoittuu routivalle pohjamaalle (RIL 2006). Suomessa on käytetty rakenteiden rakennemitoituksessa usein esimerkiksi tiesuunnittelun mitoitusohjeita ja laskentaohjelmistoja (Silpola 2017), joita on käsitelty Tiehallinnon ohjeessa ”Tierakenteen suunnittelu (2004)”. Tässä kappaleessa käsitellään kuitenkin lyhyesti nimenomaan lentopaikkojen suunnittelussa käytettyjä mitoituslähtökohtia ja menetelmiä.

Sertifioitavilla lentoasemilla päällysrakenteen kantavuusmitoituksen lähtökohtana ja mitoittavana tekijänä ovat niiden ilma-alusten ominaisuudet ja käyttömäärät, joiden ajatellaan lentopaikkaa käyttävän. Näiden tietojen tulee siten olla suunnittelun lähtötietona. Lentoasemien osalta ICAO on standardoinut kansainvälisen ACN-PCN – menetelmän, jolla tulee ilmoittaa lentoaseman kiitotien, rullausteiden ja asematasojen kantavuustiedot. Menetelmässä päällysrakenteen tyyppi ja kantavuus määritellään ilma-aluksen luokitusluvun (ACN) ja päällysrakenteen luokitusluvun (PCN) avulla. Nämä tiedot tulee ilmoittaa lentopaikkaa koskevissa tiedoissa kansallisessa ilmailukäsikirjassa (AIP, Aeronautical Information Publication). (ICAO 2013, Silpola 2017) Tämän kansainvälisesti yhtenäinen menetelmä on kehitetty, jotta voidaan välttää lentoliikennealueiden päällysrakenteiden ylikuormitusta ja liian nopeaa rakenteen väsymistä ja vaurioitumista. (Obeidat 2006)

Kansainvälisesti lentokenttien päällysrakenteen mitoitusmenetelmiä on kehitetty useita, ja ne perustuvat erilaisiin teorioihin. Monissa valtioissa on käytössä omia, hieman toisistaan poikkeavia menetelmiä. (RIL 2006) Edelleenkin käytössä olevat menetelmät perustuvat suurelta osin kokeellisiin ja kokemusperäisiin menetelmiin. Yadav et al. (2012) tutkimuksen perusteella ilma-alusten kokojen ja massojen suurennuttua viime vuosikymmeninä tarvittaisiin uusia analyyttisempia arviointi- ja mitoitusmenetelmiä päällysrakenteen kantavuuden määrittämiseen. Varsinkin raskaampien konetyyppien vuoksi ollaankin vähitellen siirrytty joustavien päällysrakenteiden osalta ns. CBR - menetelmistä (Californian Bearing Ratio) monikerroksisiin lineaarielastisiin malleihin, jotka mahdollistavat rakenteen analyyttisemmän tarkastelun (International Airport Review 2017).

Maarakenteiden jäykkyyden määrittämiseen on yleisesti esimerkiksi Yhdysvaltalaisissa ja ICAO:n ohjeistuksessa käytetty CBR -koetta ja -lukuja, joilla määritellään materiaalin suhteellinen kantavuus. Suomessa väylärakenteiden mitoituksessa käytetään nykyisellään kuitenkin pääasiassa materiaalien jäykkyydsmoduuliarvoja, joka määritetään esimerkiksi kolmiaksiaalikoikkeella (Ehrola 1996).

ACN-PCN -menetelmään perustuva mitoitus

Yksi Suomessa käytössä ollut menetelmä perustuu mainittuun ACN-PCN -menetelmään ja sen pohjana oleviin teorioihin. ACN-PCN – menetelmä perustuu joustavan päällysrakenteen tapauksessa ns. parannettuun CBR –menetelmään, jonka teoreettisena pohjana on kuormien jakautuminen Boussinesqin teorian mukaan. Jäykillä päällysrakenteilla menetelmä perustuu Westergaardin teoriaan. (RIL 2006)

ACN-PCN –menetelmään perustuvan taipuisan päällysrakenteen mitoituksen lähtökohdat ja vaiheet (RIL 2006):

1. Pohjamaan kantavuuden selvittäminen (CBR)
2. Konetyyppien ja liikennemäärän arviointi
 - Pienillä lentopaikoilla, joilla liikennöi vain harvoja eri konetyyppejä:
 - Mitoittava lentokone ja sen arvioitu operaatiomäärä mitoitusiän aikana
 - Suurilla vilkasliikenteisillä kentillä:
 - Mitoituskoneen operaatiomäärä mitoitusikänsä aikana, joka on määritetty useiden eri konetyyppien arvioidun operaatiomäärän perusteella painottaen kunkin kuormitusvaikutusta
3. Päällysrakenteen paksuuden määrittäminen
 - a. Määrittämällä mitoituskoneen kenttämateriaalin käyrästöstä rakenteen kokonaispaksuus ja jokaisen osakerroksen osalta erikseen, kun tiedetään lähinnä olevan kerroksen CBR -arvo
 - b. Määrittämällä yleisemmästä käyrästöstä päällysrakenteen kokonaispaksuus sekä sidottujen ja kantavan kerroksen yhteispaksuus, Lähtötiedoiksi tarvitaan tällöin liikennetiheys, laskutelinetyyppi mitoituskoneelle sekä ACN –luku

Yhdysvaltojen ilmailuhallinnon menetelmä

Kansainvälisesti lentokenttien päällysrakenteen suunnittelun kehitys ja testaus on keskittynyt suurelta osin Yhdysvaltoihin. Yhdysvaltojen liittovaltion ilmailuhallinto FAA on kehittänyt oman suunnitteluohjeistuksen sekä FAARFIELD -suunnitteluohjelmiston (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design) lentokentän päällysrakenteen suunnittelua varten. Nykyisellään USA:ssa päällysrakenteen mitoitus joustavan päällysrakenteen osalta perustuu elastiseen kerrosteoriaan. Yhdysvaltojen menetelmissä pohjamaan ja kerrosten jäykkyysominaisuudet ilmaistaan kuitenkin tavanomaisesti CBR-arvoina. Laskentaohjelmistossa voidaan kuitenkin materiaalien jäykkyys ilmaista myös E-moduuli arvona. (FAA 2016)

Nykyisellä FAARFIELD -mitoitusohjelmalla voidaan mitoittaa päällysrakenteet yhtä lailla pienkoneiden kuin suurten koneiden liikennöimille kentille. Laskentaohjelmisto huomioi laskennassa myös muut ajoneuvot kuin lentokoneet. (FAA 2016) Tämä on tärkeää lentopaikoilla, joilla ilma-alukset kuormittavat päällysrakennetta vähemmän kuin esimerkiksi huolto- ja sammutusajoneuvot.

2.4 Lentoliikenteen aiheuttamat mekaaniset kuormat ja kantavuusvaatimukset

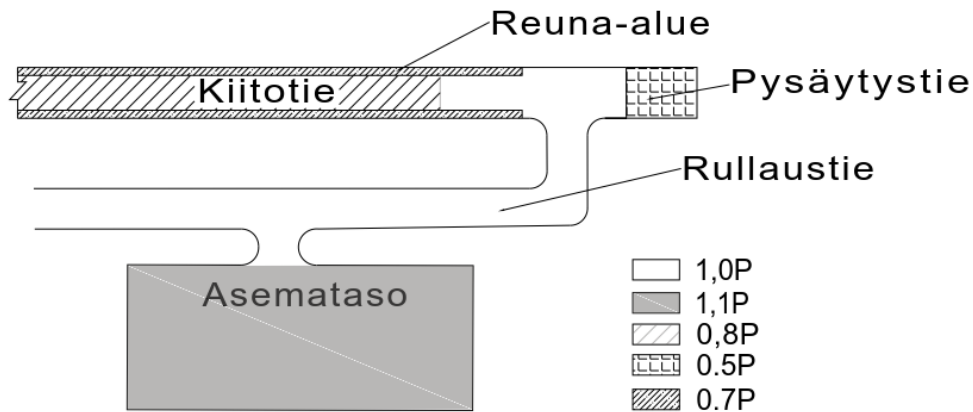
Mekaaniset kuormat

Ilma-alusten massat välittyvät päällysrakenteeseen eri tyyppisten laskutelineiden ja renkaiden kautta. Päällysrakenteeseen välittyvien kuormitusten jakaantumiseen vaikuttaa merkittävästi laskutelineiden tyyppi, niiden renkaiden lukumäärä ja koko sekä renkaiden välinen etäisyys ja rengaspaine. (ICAO 1983) Aiemmin useimpien ilma-aluksien laskutelineet olivat yksinkertaisia, joissa kummankin puolen kannattimilla oli yksi rengas tai rengaspari. Ilmailuteollisuuden kehittyessä ja ilma-alusten massojen kasvaessa on laskutelineiden tyyppeihin tullut suurta vaihtelua. Suuremmat koneet vaativat usein laskutelineisiin suuremman määrän pyöriä, jotta päällysrakenteen kuormitukset jakaantuvat tasaisemmin. (Shafabakhsh 2014)

Lentopaikan eri osissa kuormitustyyppi ja väsymisolosuhteet voivat vaihdella merkittävästi. Lentokoneen laskeutuessa pyritään kone tuomaan maahan mahdollisimman alhaisella pystysuuntaisella nopeudella siten, että myös

vaakasuuntainen nopeus maanpinnan suhteen on mahdollisimman alhainen (Kermode 2006). Laskeutumisalueen päällysteeseen laskeutumishetkellä aiheutuva taipuman arvioiminen ja analysointi on osoittautunut hankalaksi ongelmaksi, mutta tätä varten on pyritty kehittämään analyyttisiä laskennallisia malleja (Yadav et al. 2012). Laskeutumisen aiheuttamaa kuormitusta ei yleensä ottaen ole kuitenkaan pidetty kriittisimpänä kuormana lentopaikalla. Laskeutumisessa, lentokoneen koskettaessa ensimmäisen kerran kiitotietä nopeus on suurimmillaan ja kuormitus on hetkellistä, dynaamista kuormitusta. Suuri osa ilma-aluksen painosta on tällöin vielä nosteen vaikutuksesta siipien varassa, josta se vähitellen siirtyy kiitotien päällysrakenteeseen. Laskeutumisessa ilma-alukset ovat myös useimmiten keveimmillään, johtuen vähäisestä polttoainemäärästä. (Obeidat 2006; ICAO 1983) Laskeutumisen aiheuttaman päällysrakenteen taipuman analysoimisen merkitys ja iskevän kuorman vaikutus korostuu kuitenkin etenkin raskaiden lentokoneiden tapauksessa (Yadav et al. 2013).

Kirjallisuudessa päällysrakenteelle kriittisimmiksi on määritelty staattiset kuormat, jotka vaikuttavat, kun ilma-alus on asematasolla paikoillaan tai liikkuu hitaasti rullaustiellä kohti kiitotien päätä. Tällöin ilma-alus on usein myös raskaimmillaan polttoainemäärän ja hyötykuorman ollessa suurimmillaan. Etenkin asema-alueella liikennemäärä on myös usein suurempi kuin muilla lentopaikan alueilla. Ilma-aluksen lähtiessä nousukiittoa päällysrakenteeseen kohdistuva kuormitus alkaa vähitellen pienentyä. (Obeidat 2006; ICAO 1983) ICAO:n suunnittelukäsikirjan erään esimerkin mukaan kuormitukset painottuvat selvästi eri tavalla eri lentoaseman alueilla (kuva 5). Yhdysvaltojen ilmailuhallinnon ohjeistuksen mukaan, pelkästään kevyiden pienkoneiden liikennöimillä lentopaikoilla kiito- ja rullausteiden päällysrakenteet mitoitetaan kuitenkin saman paksuisiksi samoilla kantavuusvaatimuksilla (FAA 2009).



Kuva 5. Erään esimerkin mukainen päällysrakenteen kuormitusten jakautuminen lentopaikan eri alueilla. (mukaiillen ICAO 1983)

Kuormituskerrat mitoitusiän aikana

Kuormituskertojen määrä, eli liikennemäärä, on yksi mitoittava tekijä, kuormituksen suuruuden ohella varsinkin sertifioitavien lentoasemien rakenteille. Lentopaikoilla tarkastellaan usein vuosittaisten nousujen (annual departures) tai välillä myös laskeutumisten määrää (ICAO 1983), kun tiesuunnittelun yhteydessä puhutaan keskimääräisestä vuorokausiliikenteestä. Tämä liikennemäärän esitystapa vuosittaisena nousujen määränä kuvaa osittain sitä, että liikennemäärä lentopaikoilla on yleisesti ottaen huomattavasti vähäisempää kuin tieliikenteen väylillä. Nousujen määrä vaihtelee kuitenkin suuresti eri lentopaikkojen välillä. Pienkentillä ilmailu on niin sanottua aikatauluttamatonta lentoliikennettä ja liikennemäärä on huomattavasti vähäisempää, mutta myös selkeästi epäsäännöllisempää ja hankalammin ennustettavaa kuin kaupallisen liikenteen lentopaikoilla (Windcraft 2015).

Kantavuusvaatimukset

Sertifioitavilla lentoasemilla päällysrakenteen kantavuusvaatimukset tulevat lähes yksinomaan ilma-alusten ominaisuuksien ja käyttömäärien perusteella. Euroopan komission asetus No 139/2014 määrittelee lentoasemien kantavuusvaatimukset hyvin yleisellä tasolla. Näiden mukaan kiitotien tulee kantaa ne ilma-alukset, joille se on tarkoitettu. Rullaustien kantavuuden tulee yleisesti ottaen olla vähintään yhtä suuri kuin siihen liittyvän kiitotien, sillä rullaustiellä liikennemäärä on usein suurempi kuin kiitotiellä ja siellä liikkuvien ilma-alusten ja ajoneuvojen liike on hitaampaa ja

kuormittavampaa. Kiitoalueen kantavuudesta määrätään ilmailumääräyksissä niin, että kiitoalueen tulee olla käsitelty ja rakennettu siten, että kantavuuseroista aiheutuva vaara kiitotieltä suistuvalla ilma-alukselle jää mahdollisimman pieneksi. (EASA 2017)

Valvomattomille kevytlentopaikoilla ja kevyehköille yleisilmailukoneille tarkoitetuilla pienkentillä kantavuudelle ei sen sijaan ole asetettu ollenkaan vaatimuksia. Kevyemmin kuormitetuilla kentillä lähtökohtana on mitoittaa ja rakentaa kiitotien sekä muiden alueiden rakenteet niin, että ne kestävät ilma-alusten ohella myös esimerkiksi huolto-, sammutus- ja polttoainekaluston liikenteen, koska ne voivat olla usein kantavuuden suhteen kriittisempi tekijä kuin kenttää käyttävät ilma-alukset (Silpola 2017; ICAO 1983).

2.5 Lentopaikan liikennealueen routanousuvaatimukset

Valvomattomien lentopaikkojen osalta ei routanousulle ole asetettu erityisiä vaatimuksia ilmailumääräyksissä (Silpola 2017). Jos sovelletaan kuitenkin lentoasemien kenttäalueen suunnittelua koskevia ilmailumääräyksiä, kiitotiellä ei saa esiintyä epäsäännöllisyyksiä, jotka voivat heikentää kitkaominaisuuksia tai vaikuttaa haitallisesti ilma-aluksen lentoonlähtöön tai laskeutumiseen. (EASA 2017) Myös Liikenneviraston varalaskupaikkojen suunnitteluohjeen (2010) mukaan varalaskupaikalla päällysrakenteen ja päällysteen on oltava erittäin tasainen eikä halkeamia sallita, koska lentokalusto on usein erittäin vaurioitumisherkkää. Tästä syystä varalaskupaikoilla routa- ja painumamitoitus tehdään vaatimusluokan V1 mukaan, käyttäen ohjetta ”Tierakenteen suunnittelu (TIEH 2100029-04)”. (Liikennevirasto 2010) Vaatimusluokka V1 tarkoittaa tiesuunnitteluohjeissa vaativinta, moottoriteille asetettua mitoitusluokkaa (Tiehallinto 2004).

Kiitotien tapaan myöskään rullausteilla ei sallita epäsäännöllisyyksiä. Kiitotien ympärillä olevan, yleensä ruohopäällysteisen kiitoalueen osalta on sanottu, että alue tulee tasata ilma-alusten vaurioiden vähentämiseksi. (EASA 2017) Mainituissa määräyksissä tai ohjeissa ei ole käsitelty sallittua routanousua, mutta tasaisuusvaatimus asettaa samalla raja-arvoja routanousulle. Erityisen kriittistä epätasaisuuden suhteen ovat alueet, joissa rullausnopeudet ovat suuria, kuten nousu- ja lähtökiidossa (Huttunen 2017).

Kansainvälisen siviili-ilmailuliiton ohjeistuksen mukaan pääperiaate uudella kiitotiellä on, että valmiissa kulutuspinnoissa ei sallita 3 metrin oikolaudalla, mihin suuntaan tahansa mitattuna 3 mm suurempia yksittäisiä epätasaisuuksia. Käytön aikana tätä suurempia poikkeamia kuitenkin voi esimerkiksi deformaation ja kulumisen vuoksi syntyä, joten tästä poikkeuksena sallitaan tilapäiset poikkeamat, jotka eivät vielä vaikuta lentoturvallisuuteen (ICAO 1983). EU:n asetuksen mukaisissa tasaisuusrajoituksissa on määritelty hyväksyttävän, siedettävän ja liiallisen epätasaisuuden raja-arvot (taulukko 1; EASA 2017).

Taulukko 1. EU:n asetuksen No 139/2014 asettamat kiitotien tasaisuusvaatimukset (mukaillen EASA 2017).

Pinnan epätasaisuus	Poikkeaman pituus L (m)								
	3	6	9	12	15	20	30	45	60
Hyväksyttävä pystysuuntainen poikkeama (cm)	2,9	3,8	4,5	5	5,4	5,9	6,5	8,5	10
Siedettävä pystysuuntainen poikkeama (cm)	3,5	5,5	6,5	7,5	8	9	11	13	15
Liiallinen pystysuuntainen poikkeama (cm)	5,8	7,6	9,1	10	10,8	11,9	13,9	17	20

Epätasaisuuden ylittäessä hyväksyttävän raja-arvon mutta sen ollessa vielä siedettävien arvojen alapuolella, tulee päällysrakenteelle laatia ylläpito-ohjelma. Siedettävän rajan ylityttyä on puolestaan ryhdyttävä mahdollisimman nopeasti korjaustoimenpiteisiin mutta lentopaikkaa voidaan vielä pitää käytössä. Liiallisen poikkeaman ylityessä tulee kenttä sulkea ja korjata perustavanlaatuiset rakenteelliset vauriot välittömästi, jos lentoliikennettä jatketaan. (EASA 2017)

3 SASSIN LENTOPAIKAN KUVAUS JA SUUNNITTELUPERUSTEET

3.1 Nykytila

Sassin alue sijaitsee Mäntän-Vilppulan kaupungin alueella vanhalla sellupuuvarastoalueella. Paikalle rakennettiin 1970 –luvulla sorapintainen lentopaikka lannoituslentojen tukikohdaksi. Lentopaikka oli virallinen vuoteen 1982. Tämän jälkeen kenttä on ollut harrastelentotoiminnan käytössä. (Mänttä-Seura 2017)

Lentopaikan kiitotien pituus on tällä hetkellä 750 m ja leveys 18 m. Kiitotie on tasattu pengertämällä se täyttömaalla, ja kiitotien pinnalle on levitetty sorakerros. Kiitoradan korkeustaso vaihtelee välillä +107,99...+110,38 m. Alueella tehtyjen pohjatutkimusten perusteella pinnassa esiintyy silttikerrostuma, jonka paksuus vaihtelee 0-1,5m välillä. Kiitoradan kohdalla on täyttömaata 0,3-2,0 m. Näiden kerrosten alla on pääasiassa hiekkamoreenia. (Kasari ym. 2016)

3.2 Suunnitelmat

Mänttä-Vilppulan kaupungin omistamalle Sassi-Kannusniemi -alueelle on suunnitteilla kaupunginosa, jossa asuminen ja matkailu sijoittuvat lentopaikan välittömään läheisyyteen (kuva 6; Mänttä-Seura 2017). Alue on osoitettu maakuntakaavassa pienlentopaikaksi (Pirkanmaan maakuntavaltuusto 2017). Lentopaikasta tavoitellaan Trafin hyväksymää virallista valvomatonta lentopaikkaa. Alueelle on valmistunut lentoteknillisen koulun tilat 2016, ja koulutus tiloissa on aloitettu. (Koivulahti 2017a)



Kuva 6. Lentopaikan ja lähialueen luonnoskuva idän suunnasta, jossa varsinaiset lentoliikenteen alueet sekä asema- ja hallialueet on hahmoteltu rajauksella. Eteläreunalle sijoittuu lentokoneasentajakoulun tilat. (Mänttä-Seura 2017)

Lentopaikan kiitotie kuuluu ilmailumääräyksen AGA M1-1 mukaiseen kiitotieluokkaan 1, mikä määrittelee kiitotien mittoja ja esterajoituspintoja. Uuden kiitotien pituudeksi tavoitellaan 850 m ja leveydeksi 23 metriä. Kiitoalueen leveyden tulee olla kolme kertaa kiitotien leveys. Kentällä ei tulla käyttämään liukkauden torjuntaa, mutta lentopaikka on tarkoitus pitää käytössä auringonpaisteella myös talviaikaan. (Koivulahti 2017a)

Lentopaikalla on pääasiassa tarkoitus liikennöidä pienkoneilla ja ultrakeveillä niin sanotuilla 4-mäntäisillä koneilla (Koivulahti 2017b). Pienkoneet ovat pääasiassa yksityislentäjän PPL-lupakirjalla (Privat Pilot Licence) lennettäviä yksityislentokoneita, joiden maksimi lentoonlätöpaino on 5000 kg. Kentällä on mahdollisesti tarkoitus kuitenkin varautua koneiden 16 t lentoonlätöpainoon, tosin lentopaikan pituus saattaa asettaa rajoitteita tämän kokoisten lentokoneiden laskeutumiselle. (Huttunen 2017) Sassin lentopaikan liikennemäärä arvio on vain ennuste, mutta laskeutumismääräksi on arvioitu noin 280 laskeutumista vuodessa (Windcraft 2015).

Tuhkien käyttö rakenteessa

Lentopaikan kiito- ja rullaustierakenteissa on suunniteltu käytettäväksi tuhkia ns. massiivirakenteena, jossa rakenne tehdään pelkästä tuhkasta tai lujitetaan sideaineella. Toinen suunniteltu vaihtoehto on käyttää tuhkaa stabiloidussa kerroksessa sideaineena. Hyödyntämistapa riippuu käytettävissä olevien tuhkien ominaisuuksista kelpoisuudesta ja määrästä. Lentopaikalla käytettäväksi suunniteltu tuhka on peräisin kohteen lähellä sijaitsevalta Mäntän Energian voimalaitokselta, jonka on ajateltu tekevän tuhkan käytöstä kustannustehokasta.

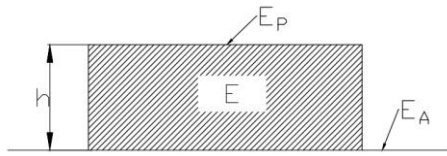
3.3 Lentopaikan päällysrakenteen suunnittelu- ja mitoitusperusteet

Mitoittaminen

Kuten on aiemmin todettu, pienkoneiden liikennöimillä lentopaikoilla kriittisimmät kuormat tulevat huoltoajoneuvoista. Kirjallisuustutkimuksiin perustuen keveät ilmalukset eivät aiheuta suuria mekaanisia kuormituksia. Tästä syystä, ja lentopaikoille tarkoitettujen kattavien mitoitusohjeiden puuttuessa, kiitotien ja muiden päällystettävien rakenteiden kantavuusmitoitus eli kerrospaksuudet voidaan mitoittaa Suomessa tiesuunnittelussa yleisesti käytössä olevilla menetelmillä. Yleisesti Suomessa pohjamaan ollessa routivaa, tulee päällysrakenteen kokonaispaksuutta määrääväksi tekijäksi kuitenkin routamitoitus. Myös tuhkarakenteiden suunnitteluohjeissa ohjataan mitoittamaan rakenteet yleisillä tierakentamisen mitoituskäytännöillä, ja siten tässäkin työssä vaihtoehtoiset rakenteet mitoitetetaan näitä ohjeita soveltaen.

Kantavuusmitoitus Odemarkin -menetelmällä

Suomessa tiesuunnittelussa yleisimmin käytössä oleva kantavuusmitoitusmenetelmä on Odemarkin -menetelmä. Menetelmässä monikerroksinen rakenne on yksinkertaistettu kaksikerrosrakenteeksi, missä ylemmän kerroksen päältä saatava kantavuus (E_P) saadaan alemman kerroksen kantavuuden (E_A) ja mitoittavan kerroksen jäykkyysmoduulin (E) sekä sen paksuuden (h) avulla (kuva 7).



Kuva 7. Kantavuuslaskennassa käytetyt parametrit (mukaiillen Ehrola 1996)

Laskennassa edetään pohjamaasta kohti päällysteen yläosaa. Lähtötiedoiksi laskentaan tarvitaan päällystetyyppi, tavoitekantavuus, päällysteen vähimmäispaksuus ja pohjamaan/penkereen kantavuus. (Tiehallinto 2004)

Kantavuusmitoitusta varten on määritetty eri maarakennusmateriaaleille materiaalin jäykkyyttä kuvaavat E -moduuliarvot ja ne on esitetty perinteisten materiaalien osalta Tiehallinnon ohjeessa ”Tierakenteen suunnittelu (2004)”. Rakennekerrosten E -moduuliarvot on määritetty takaisinlaskennan avulla perustuen kenttäkokeina suoritettaviin levykuormituskokeisiin tai pudotuspainolaitemittauksiin (Ehrola 1996).

Tuhkan massiivirakenteiden osalta mitoituksessa käytettävä E -moduuli määritetään tuhkan käyttöluokan perusteella (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017). Tuhkalla kerrostabiloidun rakenteen osalta E -moduulit on johdettu sementtistabiloitujen rakenteiden perusteella (Kiviniemi ym. 2012). Tuhkien jäykkyyshmoduuliarvot on käyty läpi kappaleessa 5.4.

Odemarkin kantavuusyhtälöllä 2 sekä huomioiden lisäehdot 1. ja 2. lasketaan rakenteen kokonaiskantavuus:

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

jossa:

E_A on mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)

E_P mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa)

E mitoitettavan kerroksen materiaalin E -moduuli (MPa)

h mitoitettavan kerroksen paksuus (m)

Lisäehto 1: Sitomattoman kerroksen käyttökelpoinen E -moduuli on enintään $6 \cdot E_A$ ja osittain sidottujen enintään $n \cdot E_A$, missä kerroin n saadaan perinteisten rakennusmateriaaleille julkaisusta ”Tietoa tiesuunnitteluun 71 (2005)” tai sen kulloinkin voimassaolevasta versioista sekä tuhkamateriaaleille Tuhkarakentamisen käsikirjasta.

Lisäehto 2: Yhteen liimautuneet, ehjät bitumilla sidotut kerrokset, joiden $E > 1500 \text{MPa}$, lasketaan yhtenä kerroksena, jonka moduuliksi otetaan osakerrosten moduulien paksuuksilla painotettu keskiarvo. Ehto voi täytyä vain, kun AB-kerrosten bitumipitoisuus on vähintään 3,8 % ja massa on asemasekoitteista. Pelkästään PAB-päällysteitä sisältävissä rakenteissa bitumipitoisuuden tulee olla vähintään 3,1% ja E-moduulin vähintään 1400MPa. Samassa rakenteessa olevat PAB- ja AB -kerrokset eivät ole tässä mielessä yhteen liimautuneita vaan ne lasketaan erillisinä kerroksina. (Tuhkarakentamisen käsikirjasta 2012)

Routamitoitus

Suomessa routamitoitus tehdään tavallisesti ns. routaturpoamamenetelmällä, jossa asetetaan sallittu laskennallinen routanousu ja mitoitetaan rakenne sen mukaisesti. Eri rakennemateriaaleille on määritetty vastaavuus eristävyiden kannalta eli kyky estää lämmön poistuminen alapuolisesta rakenteesta. Lähtökohtaisesti väylän rakenne on routimatonta, jolloin laskennallinen routanousu voidaan laskea käyttämällä yhtälöä 3 (Tiehallinto 2004).

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 - a_3) \cdot \frac{t}{100} \quad (3)$$

jossa

S on	mitoitusroutansyvyys [mm]
R_i	routimattoman kerroksen paksuus [mm]
a_i	materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta
t	alusrakenteen routaturpoama

4 TUHKAMATERIAALIT PÄÄLLYSRAKENTEISSA

Uusiomateriaalien käyttöä, ja vastaavasti uusiutumattomien luonnonvarojen käytön vähentämistä, on pyritty edistämään Suomessa jo ainakin parin viime vuosikymmenen aikana. Suomessa uusiomateriaalirakentamista on edistämään ja kehittämään on käynnistetty UUMA – ohjelma vuonna 2006. Tuhkat ovat materiaalina merkittävä uusiomateriaalirakentamisen osa, sillä niitä voidaan käyttää monipuolisesti täytöissä ja kerrosrakenteissa sekä sellaisenaan että seosmateriaalina yhdessä muiden materiaalien, jopa muiden sivutuotteiden kanssa. (Kiviniemi ym. 2012)

4.1 Aiempi tieto tuhkan käytöstä

Tuhkien käytöstä on runsaasti kokemuksia Suomessa varsinkin tie- ja aluerakentamisessa jo pitkältä aikaväliltä, ja koerakenteita on tehty useissa kohteissa. Tulokset ovat olleet myönteisiä. Myös tuhkarakenteiden pitkäaikaistoimivuutta on tutkittu monissa koekohteissa (Tarkkio 2014) ja tuhkamateriaalien käyttöä kerrosstabiloinnin sideaineena on selvitetty (Harju 2017).

Maailmalla tuhkien käyttö lentopaikoilla kiito- ja rullausteiden rakenteissa ei ole kokonaan uusi tuhkarakentamisen soveltamisala. McLaughlinin (1984) laatimassa liittovaltioiden ilmailuhallinnon (FAA) tukemassa tutkimuksessa on käsitelty kalkki-sementti-lentotuhka kerroksen toimivuutta siviili-ilmailulle tarkoitetun lentokentän kantavassa kerroksessa. Tunnetuimpia Yhdysvalloissa raportoituja kohteita ovat 1960 - luvulla toteutetut Newarkin ja John F. Kennedyn kansainväliset lentokentät.

Newarkin kentällä pohjaolosuhteet olivat huonot (McLaughlin 1984). Kentällä kiitotien, rullausteiden ja asematasojen joustavan päällysrakenteen kantavassa kerroksessa käytettiin kalkin, sementin, lentotuhkan sekä hiekan ja murskeen seosta lisäkantavuuden saamiseksi. Kalkki-sementin määrä vaihteli 3-4 prosentin välillä ja lentotuhkan määrä 10-12 prosentin välillä. (Federal Highway Administration 2016) Kentällä on raportoitu kuluneen 1,8 miljoonaa tonnia kalkki-sementti-lentotuhka seosta, josta lentotuhkaa oli 270 000 t. Eri ainesosien toimivimmat seokset on pitkälti arvioitu kokemuksen ja kokeellisten tutkimusten avulla, mutta lopullisen seoksen päättämiseen on kehitetty testejä, jotta varmistutaan ainesosien laadusta ja reaktiivisuudesta. (McLaughlin 1984) Tutkimuksen perusteella keskeisimpänä suosituksina ja lisätutkimuksen aiheena

mainittiin, että kyseisen sideaineseoksen kemiallista aktiivisuutta ja ominaisuuksien muuttumista tulisi tarkkailla mm. väsymisajan ennustamiseksi. Lisäksi vastaavanlaisen suunnittelun ja rakentamisen avuksi tulisi kehittää uusia menetelmiä ja malleja. Lentopaikan tekovaiheessa rakenteen pitkäaikaistoimivuudestakaan ei ollut näyttöä. (McLaughlin 1984) Myöhemmän tarkastelun perusteella yli 20 vuoden jälkeenkin kyseinen rakenne on toiminut vielä tyydyttävästi (Federal Highway Administration 2016).

4.2 Lainsäädäntö

Nykyisessä Suomen lainsäädännössä tuhka on lähtökohtaisesti luokiteltu jätteeksi, jonka käyttö maarakentamisessa on mahdollista pääsääntöisesti joko ilmoitusmenettelyn tai ympäristöluvan avulla. Valtioneuvoston eräiden jätteiden hyödyntämisestä antama asetus VNa 591/2006, korvattiin 1.1.2018 voimaan tulleella asetuksella VNa 843/2017. Uuden ns. Mara -asetuksen on tarkoitus helpottaa jätteiksi luokiteltujen materiaalien hyötykäyttöä maarakentamisessa niin, että ympäristönsuojelulain mukaista ympäristölupaa ei tarvittaisi. Tuhkan osalta asetus määrittelee edelleen soveltamisalaan kuuluvaksi kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkat. Uudessa asetuksessa soveltamiskohteita ei kuitenkaan määritellä yhtä yksityiskohtaisesti kuin sen kumoamassa vanhassa asetuksessa. Sovellusalaan kuuluvia maarakentamiskohteita ovat väylät, kentät, vallit, teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteet sekä tuhkamursketiet. (VNa 843/2017) Näin ollen lentoliikenteen alueet voidaan tulkita asetuksen mukaan kelvolliseksi hyödyntämiskohteeksi.

Uuden asetuksen (VNa 843/2017) mukaan, kun jätteen hyödyntäminen järjestetään asetuksen mukaisesti, hyödyntämispaikan haltijan on tehtävä ainoastaan ympäristönsuojelulain 116§:n 2 momentin mukainen rekisteröinti-ilmoitus valtion valvontaviranomaiselle. Uusiomateriaalin käytölle asetetut vaatimukset koskevat esimerkiksi uusiomateriaalirakenteen enimmäispaksuutta, jätteen haitallisten aineiden liukoisuutta ja pitoisuutta, laadunhallintaa, peittämistä sekä materiaalin etäisyyttä pohjaveteen. Näistä on säädetty asetuksen (VNa 843/2017) liitteessä 2.

4.3 Tuhkien tyypilliset ominaisuudet ja rajoitukset

Tuhkamateriaalit syntyvät voimalaitosten polttoprosesseissa. Niiden laatuun vaikuttaa merkittävästi muun muassa polttoprosessi, polttoaine ja tuhkanerotustekniikka. Tuhkat luokitellaan Suomessa niiden keräyspaikan mukaan pohja- ja lentotuhkiksi sekä polttoprosessin polttoainekoostumuksen mukaan kivihiilen polton, seospolton ja rinnakkaispolton tuhkiksi. Eurooppalainen toissijaisten kiviainesten standardi (CEN/TC 154/WG12) luokittelee tuhkat syntyperän mukaan tarkemmin (taulukko 2). (Kiviniemi ym. 2012)

Taulukko 2. Eurooppalaisen toissijaisten kiviainesten standardin (CEN/TC 154/WG12) mukainen luokittelu. (Kiviniemi ym. 2012)

Lähde	Tunnus	Määritelmä
B Yhdyskuntajätteen poltto	B1	Yhdyskuntajätteen pohjatuhka
	B2	Yhdyskuntajätteen lentotuhka
C Kivihiilen poltto	C1	Kivihiilen pölypolton lentotuhka (LT)
	C2	Kivihiilen leijupetipolton LT (750-900°C)
	C3	Kivihiilen kattilakuona (1500-1700°C)
	C4	Kivihiilen arinapolton pohjatuhka
	C5	Kivihiilen leijupetipolton LT (800-900°C)
I Muut	I1	Paperilietteenpolton tuhka
	I2	Vedenkäsittelyjätteenpolton tuhka
	I3	Biomassatuhka

Tuhkille on määriteltävissä luonnonmateriaaleihin verrattavissa olevat luokitusominaisuudet (taulukko 3) sekä lujuus-, vedenläpäisy- ja routivuusominaisuudet (taulukko 4). Koska laatu vaihtelee tuhkien välillä paljon, tulee eri ominaisuudet aina määrittellä myös tapauskohtaisesti. (Kiviniemi ym. 2012)

Taulukko 3. Tuhkien tyypillisiä fysikaalisia luokitusominaisuuksia (mukaiillen Kiviniemi ym. 2012).

Ominaisuus	Lentotuhka	Pohjatuhka
Rakeisuus [mm]	0,002-0,1	0,002-16
Optimivesipitoisuus [%]	20-50	16-24
Maksimikuivairtoteihs [kg/m ³]	1100-1400	1000-1500
Märkäirtoteihs tiivistettynä [kg/m ³]	1300-1500	1250-1800
Hehikutushäviö [%]	1-15	-

Taulukko 4. Lujutta, routivuutta ja vedenläpäisevyyttä kuvaavat ominaisuudet (mukaiillen Kiviniemi ym. 2012)

Ominaisuus	Olosuhde	Lentotuhka	Pohjatuhka
Kitkakulma [°]	lujittumaton	28-36	39-53
	lujittunut	49-77	
Koheesio [kPa]	lujittumaton	23-47	10-30
	lujittunut	64-490	
Vedenläpäisevyys [m/s]	lujittumaton	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵
	lujittunut	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁶	
Lämmönjohtavuus [W/mK]	sula	0,4-0,6	0,9
	jäätynyt	0,8	
Segregaatiopotentiaali [mm ² /Kh]		0,05-5	<0,2

4.4 Ympäristöominaisuudet

Tuhkien luokittelu jätteeksi aiheuttaa sen, että niiden ympäristökelpoisuus tulee osoittaa, jos niitä hyödynnetään rakentamisessa. Määritettäviä asioita ovat Mara – asetuksessa määriteltyjen haitta-aineiden kokonaispitoisuudet sekä liukoisuudet. Lentotuhkien tutkimuksissa on todettu, että haitta-aineiden liukoisuudet voivat myös muuttua erilaisten käsittelyjen vaikutuksesta. Varastoimalla tuhkat kostutettuna, stabiloimalla ja seostamalla sekä tiivistämällä voidaan saada pienennettyä eräiden haitta-aineiden liukoisuuksia. Oleellisinta on, että tapauskohtaisesti kriittisimpien haitta-aineiden liukoisuuksia pienennetään, ja siten myös tapauskohtaiset laboratoriotutkimukset ovat välttämättömiä. (Kiviniemi ym. 2012)

4.5 Lentotuhkien lujuus- ja routivuusominaisuudet

Luonnonmateriaaleihin verrattuna lentotuhka sijoittuu rakeisuudeltaan siltin ja hiekkaisen siltin välille. Tuore tuhka sisältää useimmiten suhteessa enemmän hienompia jakeita. Kasavarastointi saa aikaan lajittumista ja rakeisuus muuttuu tällöin karkeampaan suuntaan. Lentotuhkan rakeisuuden perusteella maa-aine luokitellaan routivaksi, mutta hyvin lujittuvana lentotuhkat ovat silti usein routimattomia. (Kiviniemi ym. 2012)

Lentotuhkilla on maarakentamisen kannalta merkittävänä ominaisuutena lujittuvuus. Sillä on suuri parantava vaikutus materiaalin toimintaan rakenteessa. Lujittuvuus määritetään tuhkasta tehdystä koekappaleesta yksiaksiaalisella puristuskokeella. (Kiviniemi ym. 2012) Maarakentamiseen soveltuvat lentotuhkat jaotellaan teknisten ominaisuuksien perusteella nykyisen määrittelyn mukaan kolmeen käyttöluokkaan LT I, LT II ja LT IV taulukon 5 mukaisesti ja niiden perusteella arvioidaan mahdolliset käyttökohteet maarakenteissa. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017) Lentotuhkien käyttöluokat määritellään seuraavien ominaisuuksien perusteella:

- Yksiaksiaalinen puristuslujuus 28 vrk
- Lujuuden alenema jäätymis-sulamiskokeen jälkeen (28vrk)
- Routivuus
- Vedenläpäisevyys

Taulukko 5. Massiivituhkarakenteena käytettävien lentotuhkien luokittelu (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017)

Käyttöluokka	1-aks. puristuslujuus 28d [MPa]	JS - kokeen muutos*	Routivuusluokitus	Vedenläpäisevyys [m/s]
LT I	3-8	<15%	Routimaton	$\geq 1 \cdot 10^{-8}$
LT II	1-8	<30%	Routimaton	$\geq 1 \cdot 10^{-8}$
LT IV	-	-	-	-

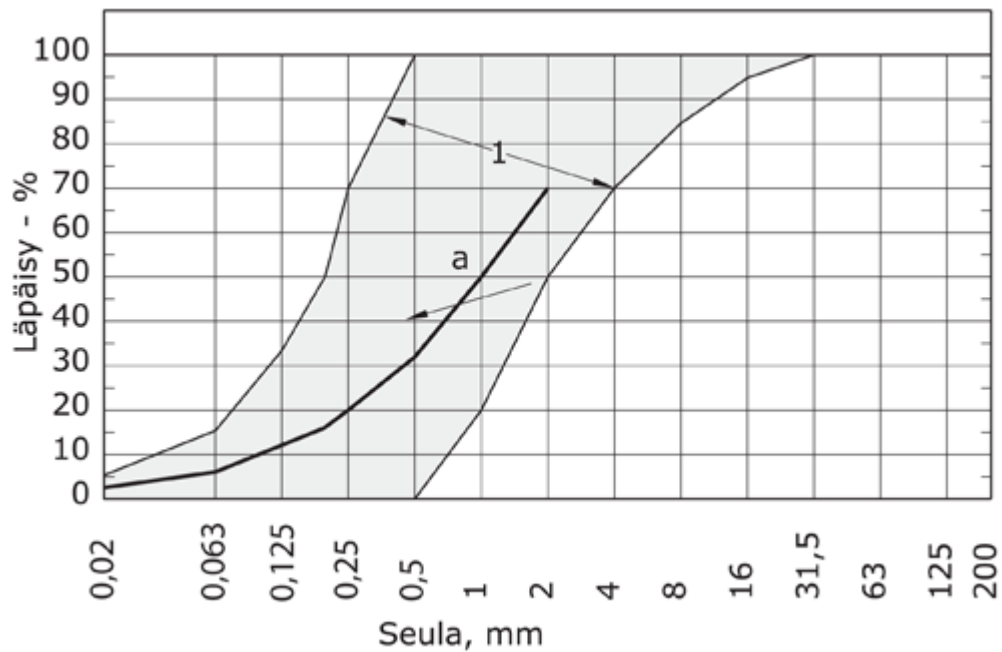
*Jäätymis-sulamiskokeen aiheuttama muutos 1-aksiaalisessa puristuslujuudessa

4.6 Pohjatuhkien lujuus- ja routivuusominaisuudet

Pohjatuhkat ovat rakeisuutensa perusteella verrattavissa hiekkaan tai hienoon soraan. Niiden karkearakeisuuden vuoksi ne ovat useimmiten routimattomia. Pohjatuhkilla ei lentotuhkan tavoin ole merkittäviä lujittumisominaisuuksia. (Kiviniemi ym. 2012) Pohjatuhkien käyttöluokat PT I ja PT II sekä niiden vaatimukset tulevat raekokojakauman, routivuuden ja vedenläpäisevyyden perusteella (taulukko 6). Käyttöluokan perusteella tehdään jako päällysrakenteisiin soveltuvien ja soveltumattomien tuhkien välillä. Pohjatuhkilla tekninen laatu ei muutu merkittävästi varastoinnin seurauksena. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017) InfraRYL:n suodatinhiekan raekokovaatimus on esitetty kuvassa 8.

Taulukko 6. Pohjatuhkien käyttöluokkien tekniset vaatimukset (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017)

Käyttöluokka	Raekokojakauma	Routivuus	Vedenläpäisevyys [m/s]
PT I	InfraRYL:n mukainen suod. hiekan vaatimukset	Routimaton	$\geq 1 \cdot 10^{-6}$
PT II	Ilmoitettava	-	-



Kuva 8. InfraRYL:n vaatimus suodatinkerrosmateriaalin rakeisuudesta, jonka mukaan rakeisuuskäyrän tulee pysyä harmaalla alueella, eikä se saa ylittää paksua viivaa nuolen suunnassa. (InfraRYL 2017a)

4.7 Tuhkamateriaalien käyttö ja rajoitukset

Tuhkia käytetään maarakentamisessa massiivirakenteena tai sideainemaisesti esimerkiksi sementin kanssa. (Kiviniemi ym. 2012) Lentotuhkaa käytetään massiivirakenteena, joko sellaisenaan tai lujitettuna sideaineella. Teknisesti mahdollisia lentotuhkan massiivirakenteiden käyttökohteita ovat penkereiden täytöt sekä kaikki päällysrakenteen kerrokset suodatinkerroksesta kantavan kerroksen alaosaan asti. Kuten aiemmin todettiin, riippuu lentotuhkien luokka kuitenkin merkittävästi mm. poltto-prosessista, polttoaineista ja varastoinnista, joten kaikki lentotuhkat eivät ole hyödynnettävissä kaikissa edellä mainituissa kerroksissa. Sideaineen lisäystä tai stabilointia lentotuhka vaatii yleensä päällysrakenteen ylimmissä kerroksissa. Näin parannetaan kerroksen kantavuutta ja pitkäaikaiskestävyyttä. Jakavassa kerroksessa tai sitä alempana lentotuhkakerros voidaan tavallisesti rakentaa ilman sideainelisäystä lähes samaan tapaan kuin luonnon kiviainesmateriaalilla. Poikkeuksena tulee huomioda kuitenkin se, että lentotuhkalla optimivesipitoisuus on korkeampi kuin luonnonmateriaaleilla. (Kiviniemi ym. 2012)

Pohjatuhkia käytetään sitomattomina suodatinkerroksissa tai penger- ja täyttörakenteissa lähes samalla tavalla kuin luonnonmateriaaleja. Jakavan kerroksen alaosassa käytettynä materiaalin tekniset ominaisuudet ja rakenteen tekniset vaatimukset tulee huomioda

kohdekohtaisesti. Pohjatuhkat kuitenkin usein soveltuvat vain kohteisiin, joissa on alhaiset kantavuusvaatimukset. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017) Tuhkien hyödyntämiskohteet on jaoteltu yleispiirteisesti tuhkaluokkien perusteella (taulukko 7).

Taulukko 7. Maarakentamiseen soveltuvien tuhkaluokkien mahdolliset käyttökohteet yleispiirteisesti (mukaillen Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017 ja Kiviniemi ym. 2012)

Käyttöluokka	Käyttökohte [MPa]	Huomioitavaa
LT I	kantavan kerroksen alaosa, jakava kerros	päällysteen alle murskekerros
LT II	jakava kerros, suodatinkerros	
LT IV	penger, täytöt, putkikaivantojen arinat ja täytöt	tuhkien korroosio- ominaisuudet
PT I	suodatinkerros	
PT II	penger, täytöt	

Tuhkarakentamisessa on syytä huomioida, että hienorakeiset lentotuhkat ovat herkkiä veden vaikutuksille, eli ne ovat muun muassa eroosioalttiita ja häiriintymisherkkiä. Lisäksi tuhkarakenteen sijoittamista rakenteeseen määrää osin kapillaarinen nousukorkeus, sillä esimerkiksi suodatinkerroksen keskeinen tehtävä päällysrakenteessa on katkaista veden kapillaarinen nousu. Kapillaarinen nousukorkeus pohjatuhkilla on usein pienempi kuin hienommilla lentotuhkilla. (Oulun yliopisto 2016, Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017)

Tuhkarakenteiden mitoitus Suomessa

Vaikka tuhkarakenteet ovat usein lujittuvia, pidetään tuhkarakenteita joustavina päällysrakenteina ja kantavuusmitoitus tehdään Suomessa tavallisesti Odemarkin menetelmällä. Kantavuusmitoitusta varten on eri tuhkaluokille ja tuhkalla stabiloiduille kerroksille määritetty suuntaa antavat E-moduuli arvot sekä Odemarkin lisäehdon 1 n - arvot (taulukko 8). (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017) Taulukoissa esitetyt E - moduuliarvot on johdettu puristuslujuudesta määritettyjen E_{50} -moduuliarvojen sekä kantavuuskokeista takaisinlaskettujen E -moduuliarvojen perusteella. Kerrosstabiloinnin parametrit on johdettu sementtistabiloidun kerroksen parametreista Tiehallinnon

julkaisun ”Tietoa tiesuunnitteluun 71 (2005)” perusteella. (Kiviniemi ym. 2012). Luonnonmateriaaleille sekä mm. betonimurskeelle ja masuunihiekalle on kantavuusmitoitusta varten tarvittavat materiaalien mitoitussarvot esitetty Tiehallinnon ohjeessa ”Tierakenteen suunnittelu (2004)”.

Taulukko 8. Kantavuusmitoituksessa käytettävät tuhkien E -moduulien enimmäisarvot ja Odemarkin lisäehto 1:n n-parametrit eri tuhkaluokille (mukaillen Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017 ja Kiviniemi ym. 2012)

Käyttöluokka	E- moduuli [MPa]*	n	Huomioitavaa
LT I	500	10	28d puristuslujuus \geq 3-8 MPa, JS-kokeen muutos <15%, routimaton
LT II	150	6	28d puristuslujuus \geq 1-8 MPa, JS-kokeen muutos < 30%, routimaton
LT IV	50	6	Routiva => ei sovellu päällysrakenteeseen
PT1	50	6	Suodatinkerroksen rakeisuus
Kerrosstabiloitu rakenne 1	1500	18	28d puristuslujuus \geq 3 MPa, JS-kokeen muutos <20%
Kerrosstabiloitu rakenne 2	3500	35	28d puristuslujuus \geq 5 MPa, JS-kokeen muutos <20%

*Vaihtelee tuhkaohjekortin mukaan eri kerroksissa

Päällysrakenteen routamitoitusta varten tarvitaan materiaalien lämmöneristävyttä kuvaavat mitoitussarvot, joita nimitetään vastaavuudeksi eristävyden kannalta. Perinteisille tierakennemateriaaleille ne on esitetty ohjeessa ”Tierakenteen suunnittelu” (2004). Arvo johdetaan materiaalin lämmönjohtavuuden perusteella (Kiviniemi ym. 2012) ja luonnonhiekalla kyseisenä mitoitussarvona käytetään tavanomaisesti arvoa 1,0 (Tiehallinto 2004). Tuhkamateriaalien vastaavuudet eristävyden kannalta on esitetty Tuhkarakentamisen käsikirjan mukaisesti alla (taulukko 9). Massiivilentotuhka ja pohjatuhka eristävät selkeästi hiekkaa paremmin. Tuhkamateriaalien selkeimpiä etuja luonnonmateriaaleihin nähden massiivirakenteena käytettäessä ovatkin juuri niiden paremmat lämmöneristävyysominaisuudet. (Kiviniemi ym. 2012)

Taulukko 9. Tuhkamateriaalien vastaavuus eristävyiden kannalta (Kiviniemi ym. 2012).

Materiaali	Vastaavuus eristävyiden kannalta
Lentotuhka	1,7
Pohjatuhka	1,2
Kerrosstabilointi	1,0

5 TUTKITTAVAT MATERIAALIT JA KOEMENETELMÄT

5.1 Tutkittavat materiaalit

Tähän työhön liittyen laboratoriokokeilla koestettiin Mäntän Energian voimalaitokselta saatujen tuhkamateriaalien ja niistä rakennettavien koekappaleiden, lujuus- ja routivuusominaisuuksia sekä rasituskestävyyttä. Voimalaitoksen tuhkat syntyvät puuperäisten polttoaineiden poltosta. Voimalaitoksen polttoprosessiin on tulossa muutoksia, joten tuhkanäytteet otettiin suoraa tulevaisuuden polttoprosessin koeajosta. Ennen koekappaleiden valmistamista tehtiin materiaaliominaisuuksien perusmäärittäyksiä, jotka on kuvattu kappaleessa 6.2.

Kokeissa testattiin voimalaitoksen pohjatuhkia puhtaasti massiivituhkakappaleina sekä lentotuhkia massiivituhkana ilman sideaineita sekä sideaineilla lujitettuna. Sideaineina käytettiin tässä normaalisti kovettuvaa portlandseossementtiä, kaupalliselta nimeltään Plussementtiä. Toisena sideaineena toimi niin ikään kaupallinen masuunikuonajauhe (KJ400), jota on valmistettu jauhamalla granuloitua masuunikuonaa (Finnsementti 2018).

Lentotuhkaa käytettiin myös stabiloitujen koekappaleiden sideaineena. Koekappaleissa käytettiin kolmea eri runkoainetta. Runkoaineilla tarkoitetaan sitä materiaalia, joka muodostaa rakennekerroksen perustan, ja jonka ominaisuuksia voidaan parantaa erilaisilla sideaineilla tai sideaineseoksilla. Kerrosstabiloituissa kerroksissa vaihtoehtoiset runkoaineet ovat lentopaikan nykyisen sorarakenteen materiaali, uusi raekooltaan 0-16 mm murske sekä näiden materiaalien yhdistelmä. Sideaineina käytettiin lentotuhkaa, jauhattua lentotuhkaa sekä portlandseossementtiä.

5.2 Materiaalien perusominaisuuksien määrittäminen

Materiaalien indeksiominaisuudet sekä muut materiaalien käyttöön vaikuttavat perusominaisuudet määritettiin lentotuhkilta ja pohjatuhkilta sekä tietyiltä osin stabiloituissa rakenteissa käytettäviltä runkoaineilta. Kultakin materiaalilta määritettiin materiaalikohtaisesti tärkeimpiä ominaisuuksia (taulukko 10).

Taulukko 10. Materiaaleista määritettävät perusominaisuudet. Taulukossa x=yksi koekappale.

Materiaali	Lentotuhka	Pohjatuhka	Murske (uusi) 0-16 mm	Sora*
Vesipitoisuus [%]	x	x	x	x
Hehkutushäviö [%]	x	x		x
pH	x	x		
Aktiivinen kalkki	x			
Reaktiivisuus	x			
Rakeisuus	x	x	x	x

*Nykyisen kiitotien pintasora

Vesipitoisuus

Vesipitoisuus kuvaa näytteessä (m_m) olevan veden määrää [g] suhteessa kuivan aineen massaan (m_d , [g]) ja se määritetään kuivaamalla näytettä uunissa noin 105°C lämpötilassa, kunnes materiaali on saavuttanut vakioainon. Tavallisesti kuivatusaika on 16-24 h. Haihtuneen veden ja kuivamassan suhteena saadaan vesipitoisuus yhtälön 4 mukaan.

$$w = \frac{m_m - m_d}{m_d} * 100\% \quad (4)$$

Vesipitoisuuden määrittäminen perustuu standardiin SFS 179-2 -CEN ISO/TS 17892 (Ramboll 2014)

Hehkutushäviö

Hehkutushäviön määrittämisessä selvitetään orgaanisen aineen ja kideveden määrä näytteessä, hehkutamalla pientä määrää näytettä 800°C lämpötilassa. Lentotuhkassa palamattoman aineksen määrän (hehkutushäviön) vaikuttaa tuhkan lujittumiseen ja siten hehkutushäviön tulisi olla mahdollisimman alhainen. Hehkutushäviö (LoI) saadaan laskettua massahäviön suhteena alkuperäiseen kuivamassaan yhtälöllä 5.

$$LoI = \frac{m_d - m_i}{m_d} * 100\% \quad (5)$$

Yhtälössä m_d on kuivan näytteen massa [g] ja m_i on hehkutetun näytteen massa [g].

Yleensä hehkutushäviö määritetään kahden näytteen keskiarvona. Kokeessa saatu hehkutushäviöarvo ei anna suoraa humuspitoisuutta, vaan tuloksesta tulee arvioida kideveden vaikutus. Kideveden osuus hehkutushäviöstä arvioidaan näytteen savipitoisuuden (läpäisyprosentti <0,002mm) perusteella käyrästä SGY:n julkaisusta GLO-85 Geotekniset laboratorio-ohjeet (1985). Hehkutushäviön määrittäminen perustuu standardiin SFS-EN 1997-2 5.6. (Ramboll 2014)

pH -arvo

Tuhkat ovat tyypillisesti emäksisiä. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017) pH -arvo määritetään standardin ISO 10390:2005 mukaisesti sekoittamalla kuivaa näytettä ja tislattua vettä massojen suhteessa 1:5. Kostean näytteen pH:ta mitattaessa vesipitoisuus otetaan huomioon vettä lisättäessä niin, että massasuhde pysyy vakiona. Seosta sekoitetaan 5 minuuttia ja annetaan tämän jälkeen seistä 2-4 tuntia. Tämän jälkeen näyte sekoitetaan uudelleen huolellisesti, ja pH mitataan sekoitetusta näytteestä kalibroidulla mittarilla. (Ramboll 2014)

Aktiivinen kalkki

Aktiivisen kalkin määrällä on todettu olevan vaikutusta tuhkan lujittuvuuteen. Tuhkalla, jossa on ollut suuri määrä aktiivista kalkkia, on saavutettu keskimäärin suurempi lujuustaso. (Kiviniemi ym. 2012) Aktiivisen kalkin määrittäminen noudattaa standardia SFS 5188. Kokeessa hiilidioksidittomaan tislattuun veteen sekoitetaan sideainetta, jonka jälkeen näytteeseen lisätään hiilidioksiditonta kiehuvaa vettä. Seosta kuumennetaan levyllä, jotta kalkki hydratoituu. Kalkin hydraamisen jälkeen jäähtyneeseen liuokseen sekoitetaan sokeria. Liuoksen annetaan reagoida 10-20 minuuttia, jonka jälkeen lisätään fenoliftaleiini-indikaattoria. Liuos titrataan suolahapolla ja suolahapon kulutuksen perusteella sekä kemikaalien ja kalkin moolimassojen perusteella lasketaan aktiivisen kalkin määrä. (Ramboll 2014)

Reaktiivisuus (lämpenemistesti)

Reaktiivisuustestillä selvitetään, kuinka reaktiivista tuhka on mittaamalla lämmön nousu ja maksimilämpötila sekä määrittämällä vesipitoisuuden muutos reaktion aikana. Reaktiivisuuden arvioinnissa käytetään lämpenemistestiä, jossa lämpöeristettyyn laatikkoon suljetaan näyte, jossa huoneenlämpöiseen tuhkaan on lisätty

huoneenlämpöistä vettä, niin että näytteen vesipitoisuus on 30%. Näytteeseen työnnetyn lämpöanturin avulla seurataan näytteen lämpötilaa tavallisesti 6 tunnin ajan. Kokeen perusteella arvioidaan, voidaanko tuhkasta tehdä koekappaleet. Liian reagoiva tuhka aiheuttaa ongelmia koekappaleiden testeissä. (Ramboll 2014) Toisaalta reaktiivisuus ennustaa myös kykyä sitoutua ja kovettua pelkän veden vaikutuksesta (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017).

Rakeisuus

Rakeisuus on paitsi luonnon kiviaineksilla myös pohjatuhkilla tärkein ominaisuus, joka määrittelee suurelta osin myös muut geotekniset luokitusominaisuudet (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017). Raekokojakauma voidaan määrittää näytteestä pesu- ja kuivaseulonalla sekä areometrikokeella. Kuivaseulonassa saadaan selville 32 - 0,063 mm rakeiden jakauma ja pesuseulonassa selvitetään alle 0,063 mm rakeiden osuus koko näytteen massasta. Areometrikokeella voidaan puolestaan selvittää hienoaineksen eli 0,063 mm pienempien rakeiden jakauma. Tuhkille areometrikoe ei kuitenkaan Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) mukaan sovellu. Raekoon määrittäminen toteutetaan standardin SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-4:fi mukaan. (Ramboll 2014)

5.3 Koekappaletutkimukset rakenteita varten

Edellä kuvattujen materiaalien perustutkimusten jälkeen tehtiin päällysrakennekerroksia ajatellen seuraavanlaisia koekappaleita, käyttäen erilaisia runko- ja sideainevaihtoehtoja.

- Massiivituhkakoekappaleet lentotuhkasta ja pohjatuhkasta (kappale 5.3.2)
- Kerrosstabiloinnin koekappaleet lentotuhkasta (kappale 5.3.3)

Näytekappaleet valmistetaan sylinterimäiseen muottiin, jonka halkaisija on noin 100 mm. Myös koekappaleen korkeudeksi pyrittiin saamaan noin 100 mm, sillä koekappaleen korkeuden ja leveyden suhteen tulee olla 1 (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017). Tiivistys tehtiin parannetun Proctor -kokeen välineistöllä käyttäen vakioitua iskujen määrää/kerros. Tähän määrään päädytään tiivistyvyystestin tuloksen sekä kokemukseräisen tiedon perusteella käytännön rakentamistyössä saavutettavissa olevasta tiivistystyömäärästä.

Tuhkakoe-kappaleiden ominaisuuksien koestamiseksi testattiin näytekappaleista keskeisimpinä ominaisuuksina lujuutta, jäädytys-sulamiskestävyyttä, routivuutta ja lämmönjohtavuutta. Lisäksi testattiin koekappaleista vedenjohtavuutta ja kapillaarisuutta. Kokeiden avulla pyrittiin arvioimaan tuhkakoe-kappaleista, lujuuden ja rasituskestävyyden kannalta, sekä muutoin, toimivimmat massiivituhka- ja kerrosstabilointirakenteet. Massiivituhkasta ja kerrosstabiloidusta runko-aineesta tehtyjen koekappaleiden testimenetelmät käydään läpi kappaleessa 5.3.1.

Tämän työn puitteissa ei ollut mahdollista suorittaa kovin yksityiskohtaisia tarkasteluja monilla eri seossuhteilla, mutta testattaviin seossuhteisiin on päädytty kokemuksen pohjalta. Tämän työn yhteydessä ei laboratoriotutkimuksissa myöskään tehdä laatuvariaatioiden määrityksiä, eli ei esimerkiksi testata tiiveysasteen tai vesipitoisuusvaihtelun vaikutusta ominaisuuksiin. Nämä määritykset tulee toteuttaa rakentamisen yhteydessä suoritettavassa testauksessa.

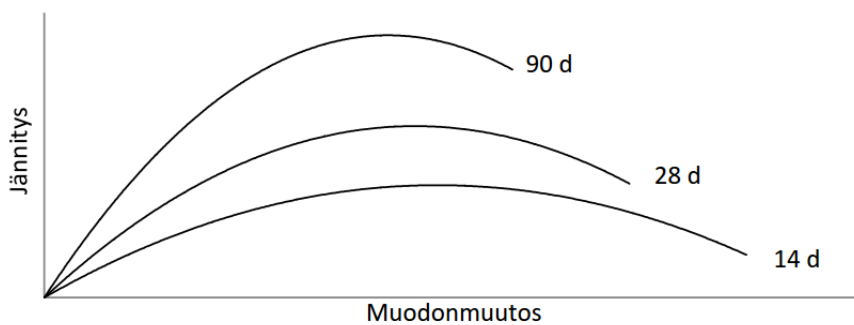
5.3.1 Koekappale-tutkimusten menetelmäkuvaukset

Proctor -koe

Proctor -kokeella määritetään koekappaleen maksimikuivairtotehiys ja optimivesipitoisuus. Koe suoritetaan käyttäen standardoitua ns. parannettua Proctor -koetta tai modifioitua Proctor -koetta. Tutkimuksissa materiaali homogenisoidaan lähellä optimivesipitoisuutta ja koekappaleita tiivistetään kerroksittain Proctor -vasaralla Proctor -muotissa. Parannetussa kokeessa Proctor -vasaran iskumäärä on vakioitu 25 iskua/kerros. Modifioitun kokeen tapauksessa tiivistystyömääränä käytetään yhtä vakioitua työmäärää siten, että se vastaa tiivistysmahdollisuutta myös todellisissa olosuhteissa. Modifioitussa kokeessa pyritään siis simuloimaan rakentamisen aikaista tiivistystyötä, tavoiteteheyttä ja sen mahdollista vaihtelua. Tiivistetty näyte punnitaan ja kuivataan, ja näiden perusteella voidaan laskea näytteen kuivairtotehiys ja vesipitoisuus. Kun vastaavia tiivistyksiä tehdään eri vesipitoisuuksilla, voidaan piirtää kuvaaja, josta nähdään vesipitoisuuden ja tiiviuden välinen suhde. Kuvaajasta voidaan määrittää optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtotehiys. (Ramboll 2014)

Puristuslujuuden määrittäminen

Puristuslujuustestillä määritetään tuhkan, yleensä vain lentotuhkan, lujittuvuusominaisuuksia halutun, tavallisesti 28 ja 90 vuorokauden lujittumisajan jälkeen (Kiviniemi ym. 2012). Testi tehdään yksiaksiaalisella puristuskokeella mukailien standardia SFS 179-2 -CEN ISO/TS 17892-7:fi. Koe tehdään muotoon leikatusta koekappaleesta ennalta määritetyn lujittumisajan jälkeen. Testissä sylinterin muotoista koekappaletta kuormitetaan puristuslaitteistolla käyttäen tasaista 1-2 mm/min nopeutta siihen asti, kunnes koekappale murtuu. Jos kyseinen näyte ei murru, jatketaan kuormitusta, kunnes koekappaleen muodonmuutos on 15 %. Puristus-testin tuloksena saadaan jännitys-muodonmuutoskuvaaja. Tavallisesti puristuslujuudet kasvavat pidemmän lujittumisajan jälkeen (kuva 9). Puristuslujuustestillä määritettyjen puristuslujuusarvon ja muodonmuutosmoduulin (E_{50}) perusteella pystytään arvioimaan lentotuhkasta tehdyn rakenteen kantavuusominaisuuksia. (Ramboll 2014)



Kuva 9. Puristuslujuustestin avulla saadut jännitys-muodonmuutos kuvaajat eri lujittumisaikojen jälkeen (Kiviniemi ym. 2012).

Jäätymis-sulamiskestävyyskoe

Jäätymis-sulamiskokeessa määritetään rasituskestävyys käyttäen useita toistuvia jäätymis-sulamissyklejä. Koe tehdään koekappaleelle, joka on lujittunut 28 vuorokautta. Astia asetetaan kapillaarisen maton päälle, jossa testikappale imee itseensä vettä 4 tunnin ajan. Tämän jälkeen näyte pakastetaan -18°C lämpötilassa, jossa se on 8-16 tunnin ajan. Näytteen annetaan sulaa kapillaarimaton päällä edelliskertaan nähden ylösalaisin käännettynä. Edellä mainittua toistetaan 12 kertaa, seuraten testikappaleen kuntoa kokeen aikana. Kokeen jälkeen kappale valokuvataan ja arvioidaan silmämääräisesti. Lisäksi mitataan sen korkeus ja halkaisija. Lopuksi koekappaleen puristuslujuus testataan

uudelleen, mikäli koekappale on vielä sellaisessa kunnossa, että puristuslujuutta voidaan testata. (Ramboll 2014)

Routanousukoe

Routanousukokeella määritetään materiaalin routivuus simuloimalla todellisia routimisen vaatimia olosuhteita. Routanousukoe tehdään kolmelle neljästä koekappaleesta. Koekappale tiivistetään halkaistavissa olevaan muottiin ja annetaan sen lujittua 28 vrk huoneenlämmössä. Lujittumisen jälkeen koekappale kyllästetään vedellä ja tällöin näytettä kuormitetaan 20 kPa kuormalla. Routanousulaitteistossa koekappaleen yläosa jäädytetään lämpötilaan -3 °C, ja alaosa pidetään sulana (+1 °C). Laitteiston pohjalla olevan huokoskiven takia kappaleen on mahdollista imeä vettä koko testin ajan. Testin aikana koekappaletta kuormitetaan tavallisesti 3 kPa:n suuruisella kuormalla. Routanousu määritetään mittaamalla nousun suuruutta sekä näytteen lämpötilajakaumaa kokeen aikana. Segregaatiopotentiaali määritetään testituloksen perusteella. (Ramboll 2014)

Lämmönjohtavuuden määrittäminen

Lämmönjohtavuutta tarvitaan rakenteen routamitoitusta varten. Lämmönjohtavuuteen vaikuttaa materiaalin vesipitoisuus ja lämpötila. Lämmönjohtavuus on tuhkien osalta pieni verrattuna vastaaviin kiviaineksiin, sillä tuhkien huokostilavuus on suuri. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017)

Lämmönjohtavuus määritetään yksisondimenetelmällä sulana lämpötilassa +22 °C tai jäätyneenä -15 °C asteessa. Lämmönjohtosondi mittaa sondin keskipisteen lämmön nousun ajan suhteen. Lämmönjohtavuus [W/Km] lasketaan mittausten perusteella yhtälön 6 avulla.

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot (T_2 - T_1)} * (\ln t_1 - \ln t_2) \quad (6)$$

q on lämmitysteho sondin pituusyksikkö kohti [W/m]; T on lämpötila [K] ja t on kulunut aika [s]. (Ramboll 2014)

Vedenläpäisevyyden määrittäminen

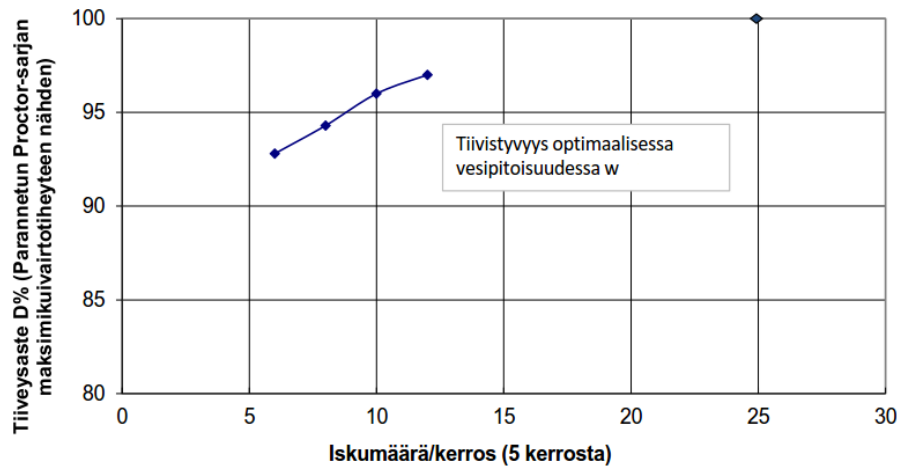
Vedenläpäisevyydestä tehdään standardin SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-11:fi mukaan. Koekappale asetetaan membraanikalvon sisälle testiselliin kolmiakseliseen paineeseen. Testikappaleen läpi johdetaan vettä jatkuvan virtauksena toisesta säiliöstä toiseen paine-eron avulla ja säiliöiden veden pinnan muutoksia mitataan. Testissä vesi virtaa näytteessä alhaalta ylöspäin. Vedenläpäisevyysarvo k [m/s] voidaan laskea yhtälön 7 avulla.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot H} \quad (7)$$

missä Q on testikappaleen läpi menneen veden tilavuus [m^3]; L on testikappaleen korkeus [m]; A on poikkileikkauksen pinta-ala [m^2]; t on aika [s] ja H on hydraulinen paine-ero [m] (Ramboll 2014)

Tiivistävyyskoe

Koekappaleiden tiivistävyyttä testataan Proctor -laitteistoa käyttäen. Tuhkilla ei yleensä ottaen ole mahdollista saavuteta samanlaista tiiveyttä kenttäolosuhteissa kuin parannetulla Proctor -kokeella saadaan tai mitä luonnonmateriaaleilla saavutetaan. Tiivistävyystestillä pyritään selvittämään se tiivistävyysmäärä optimivesipitoisuudella, jolla saavutetaan kenttäolosuhteissa tavoiteltava tavoitetiiveys. Tiivistävyystestin tuloksista saadaan kuvaaja, jossa tiiveysastetta verrataan Proctor -vasaran iskumäärään/kerros (kuva 10). Tiiveysaste ilmaistaan prosentteina parannetun Proctor -sarjan maksimikuivairtitiheyteen nähden. Tuhkarakenteilta vaaditaan yleensä vähintään 90-95 % tiiveyttä verrattuna parannetulla Proctor -kokeella määritettyyn optimivesipitoisuutta vastaavaan maksimitiiveyteen (Kiviniemi ym. 2012).



Kuva 10. Tiivistävyden määrittäminen optimivesipitoisuudessa.

Kapillaarisuus

Kapillaarisuus on tärkeä selvitettävä ominaisuus erityisesti routimisen vuoksi, koska kapillaarinen veden nousu on jäätymisrintamassa keskeinen routanousua ja jäälinsien muodostumista aiheuttava tekijä. Kapillaarisuus vaihtelee tuhilla merkittävästi ja riippuu muun muassa rakeisuudesta ja tiiveydestä. Erityisen keskeistä kapillaarisuus on tuntea, kun tuhkaa käytetään suodatinkerroksessa. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017)

Kapillaarisuus määritetään mittaamalla veden nousukorkeus koekappaleessa. Se tehdään uunissa kuivatetulle ja jäädytetylle näytteelle. Näyte tiivistetään aluksi täyryttämällä läpinäkyvään 1 metrin korkuiseen putkeen, joka asetetaan vesialtaaseen, siten että vedenpinta on 100 mm korkeudella putken alapäästä. Vesipinta pidetään vakiona. Putken alapää on avoin, verkolla rajoitettu siten, että se voi imeä vapaasti vettä ja yläpää umpinainen. 28 vuorokauden jälkeen määritetään vedenimeytymiskorkeus mittaamalla näytteen vesipitoisuuseroja eri korkeuksilla. (Ramboll 2014)

5.3.2 Massiivituhkakoekappaleet ja niille suoritettut testit

Lentotuhkasta tehdyille massiivituhkakoekappaleille (ilman sideaineita sekä sementti ja sementti-kuonajauhe -sideaineseoksella) tehtiin edellä kuvattuja, lujuutta ja routakestävyyttä sekä hydraulisia ominaisuuksia testaavia määrittäyksiä (taulukko 11). Taulukossa sideainepitoisuus ilmoitetaan pitoisuutena runkoaineen kuivamassasta. Ennen testausta, sideaineiden lisäystä ja tiivistystä massiivituhkat kostutettiin vesipitoisuuteen 20% ja annettiin vanhentua 3 vuorokautta. Massiivituhkakoekappaleille

tiivistyksessä käytettiin tiivistystyömäärää 10 iskua/kerros, jonka on todettu olevan rakennusolosuhteissa saavutettavissa oleva tiivistystyömäärä.

Taulukko 11. Massiivilentotuhkarakenteelle tehtävät määrittäykset. Osa testeistä tehtiin kahdelle rinnakkaiselle koekappaleelle. Taulukossa x=yksi koekappale. Taso tarkoittaa maksimikuivairtoiheden ja optimivesipitoisuuden tason määrittämistä ilman täydellistä Proctor -sarjaa.

Runkoaine	Lentotuhka			
		PlusSe*		PlusSe+KJ400**
Sideainelaatu	-			
Sideainemäärä	-	3%	5%	1,5 + 3,5%
Proctor- sarja, $\rho_{d \max} [\text{kg/m}^3]/w_{\text{opt}}[\%]$		xx	taso	
Puristuslujuus (MPa)				
28d	xx	xx	xx	xx
JS -koe	xx	xx	xx	xx
90d	x	x		x
Routakoe, SPo [mm^2/Kh]	x	x		x
Lämmönjohtavuus, sula/jäässä [W/Km]	x			
Vedenläpäisevyys	x			
Tiivistyvyys	x			
Kapillaarisuus	xx			

* normaalisti kovettuva kaupallinen portlandseossementti, ** kaupallinen masuunikuonajauhe

Pohjatuhkaa käytetään tavallisesti suodatinkerroksessa massiivirakenteena hiekan tavalla, joten sideaineita ei tällöin käytetä. Pohjatuhkan koekappaleista tehtiin edellä kuvatuista testeistä Proctor -kokeita, lämmönjohtavuuskoe, vedenläpäisevyydesti sekä kapillaarisuuskoe (taulukko 12).

Taulukko 12. Pohjatuhkan massiivituhkarakenteelle tehtävät määritykset

Runkoaine	Pohjatuhka
Proctor -sarja, $\rho_{d \max}$ [kg/m³]/ w_{opt} [%]	X
Lämmönjohtavuus, sula/jäässä [W/Km]	X
Vedenläpäisevyys [m/s]	X
Kapillaarisuus [mm]	X

5.3.3 Kerrosstabiloinnin koekappaleet ja niille suoritettut testit

Kerrosstabilointia varten tehtiin koekappaleet käyttäen lentotuhkaa sideaineena kolmelle erilaiselle runkoaineelle (taulukko 13). Kerrosstabiloitavasta uudesta murskeesta tehtiin koekappaleet käyttäen neljää eri sideainelaatua tai sideainesuhdetta. Lisäksi testattiin nykyisen kiitotien pintasorasta sideaineilla stabiloitua koekappaletta sekä uuden murskeen ja vanhan pintasoran seoksen stabiloitua rakennetta, kumpaakin yhdellä seossuhteella. Stabiloiduille koekappaleille tiivistyksessä käytettiin tiivistystyömääränä murskeella 9 iskua/kerros, soralla 12 iskua/kerros ja murske-sora -seoksella 10 iskua/kerros, joilla tavoitettiin noin 95 % tiiveysaste. Tuhkarakenteiden luokittelussa käytetään Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) mukaisesti puristuslujuutta, joka on määritetty 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen. Tuhkien lujittumiskykyä testattiin puristuslujuustestillä lisäksi 90 vuorokauden lujittumisen jälkeen.

Taulukko 13. Kerrosstabilointirakenteelle tehtävät määritykset. Taulukossa sora on nykyisen kiitotien rakenteesta ja x=yksi koekappale. Taso tarkoittaa maksimikuivairtoisuuden ja optimivesipitoisuuden tason määrittämistä.

Runkoaine	Murske (uusi) 0-16mm				Sora	Murske + Sora
	LT*	LT (J**)	LT+PlusSe***		LT+PlusSe	LT+PlusSe
Sideainelaatu	6%	6%	3+3%	6+2%	6+2%	6+2%
Sideainemäärä	6%	6%	3+3%	6+2%	6+2%	6+2%
Proctor- sarja						
$\rho_{d\ max}$ [kg/m ³]/ w_{opt} [%]	taso	x			x	
Puristuslujuus (MPa)						
28d	xx	xx	xx	xx	xx	xx
JS -koe	xx	xx	xx	xx	xx	xx
90d	x	x	x	x	x	x
Routakoe, segreg.potentiaali [mm ² /Kh]	x	xx		x		
Vedenläpäisevyys				x		
Tiivistyvyys				x		

*Lentotuhka, ** Jauhettu lentotuhka, *** normaalisti kovettuva kaupallinen portlandseossementti

6 TUTKIMUSTULOKSET

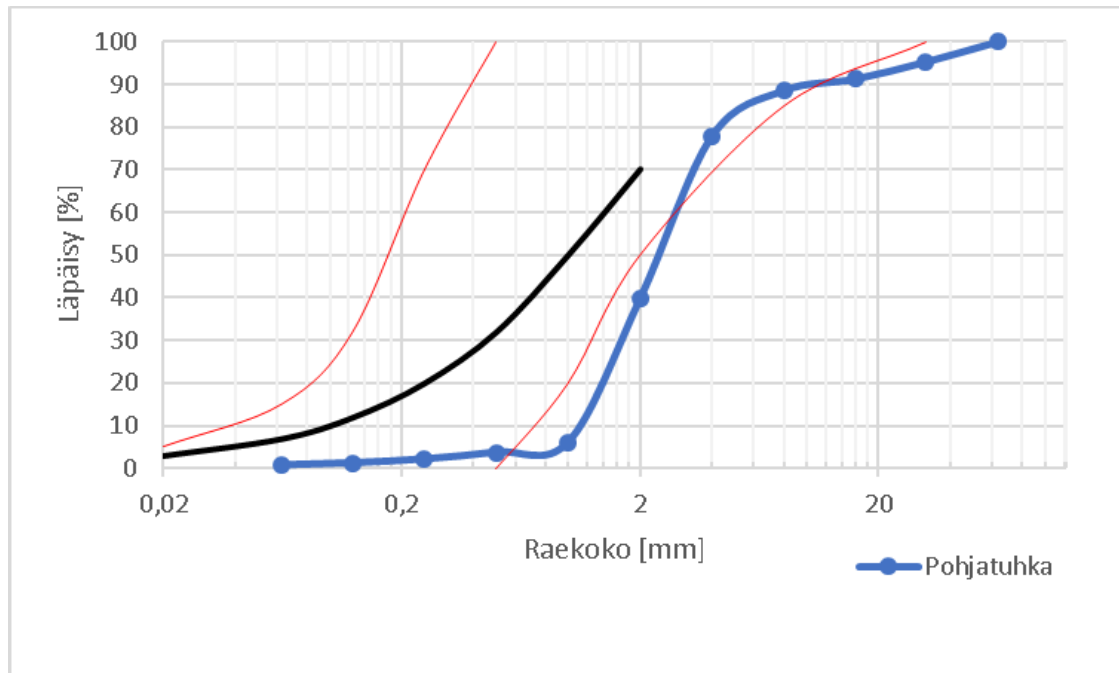
6.1 Tuhkamateriaalien perusominaisuudet

Tuhkamateriaaleille ja kerrostabiloinnin runkoaineille tehtiin perusmääritykset ennen koekappaleiden valmistusta. Näiden perusteella saatiin koekappaletestejä varten olennaista tietoa materiaalien perusominaisuuksista (taulukko 14). Tuhkien testituloksista nähdään, että voimalaitokselta polttoprosessista saadut tuhkat ovat käytännössä kuivia ja niiden pH on selvästi emäksinen. Hehkutushäviötuloksesta nähdään, että lentotuhkassa on pieni määrä humusta, mikä voi vaikuttaa sen lujittumiseen. Pohjatuhkalla ei lujittuvuusominaisuuksia ole kuten lentotuhkalla, joten myös aktiivisen kalkin pitoisuus määritettiin ainoataan lentotuhkalta.

Taulukko 14. Materiaalien perusominaisuuksien tutkimustulokset. Taulukossa sora tarkoittaa nykyisen kiitotien sora.

Materiaali	Lentotuhka	Pohja tuhka	Murske (uusi) 0-16 mm	Sora
Vesipitoisuus [%]	0,1	0,1	3,7	5,8
Hehkutushäviö [%]	1,4	0		0,5
pH	12,7	10,6		
Aktiivinen kalkki [%]	7,3			
Lämpenemistesti	Tehty			
Rakeisuus	saSi (hkSi)	saGr (hkSr)	saGr (hkSrMr)	grSa (srHkMr)

Eriyisesti pohjatuhkan osalta rakeisuus on tuloksissa merkittävä, sillä pohjatuhkan käyttöluokitus perustuu siihen, täytyykö sen osalta InfraRYL:n suodatinkerrokselle asetetut vaatimukset. Tämä määrittelee suurelta osin sen, voidaanko tuhkaa käyttää suodatinkerroksessa. Kuvasta 11 nähdään, että kyseinen vaatimus ei tämän rakeisuusmäärityksen perusteella täyty, jonka vuoksi kyseinen pohjatuhka ei saavuta ylintä käyttöluokkaa.



Kuva 11. Pohjatuhkan rakeisuuskäyrä ja InfraRYL:ssä suodatinhiekalle asetetut vaatimukset. Rakeisuuden tulisi olla punaisten ohuiden viivojen välissä eikä se saa ylittää paksua viivaa oikealta vasemmalle.

6.2 Tuhkakoekappaleiden ominaisuudet

6.2.1 Massiivilentotuhkakoekappaleet

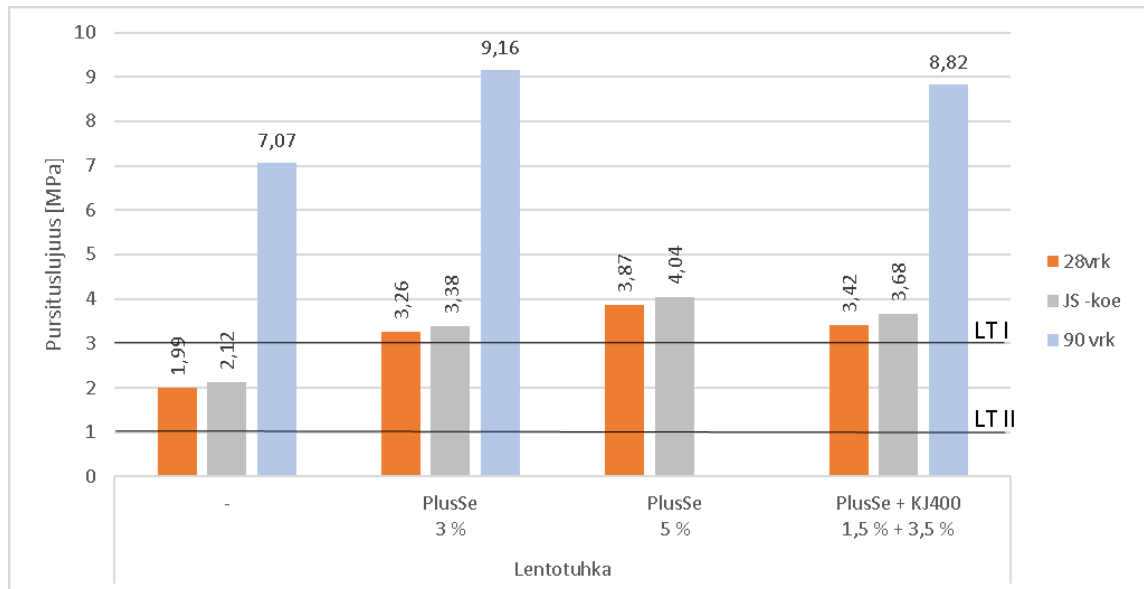
Massiivilentotuhkan koekappaleiden tuloksista (taulukko 15) voidaan todeta, että Proctor -kokeen perusteella maksimikuivairtitiheys ja optimivesipitoisuus ovat lentotuhkalle tyypillistä luokkaa. Lentotuhkilla optimivesipitoisuus vaihtelee paljon, ja tähän vaikuttaa mm. tuhkan ikä ja varastointitapa. Tämän takia tuhkan ominaisuuksia tulee seurata myös rakentamisen yhteydessä. Routakokeesta määritetyt segregatiopotentiaalia arvot olivat kaikilla testatuilla massiivituhkakappaleilla alle $0,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Tuhkarakentamisen käsikirjan (2012) perusteella routimattomia ovat materiaalit, joiden segregatiopotentiaaliarvo on alle $0,18 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Tämän perusteella voidaan todeta, että massiivilentotuhkakappaleet ovat routimattomia. Lämmönjohtavuus on yleensä tarpeellinen tieto väylärakenteen routamitoitusta varten. Määritettyjen lämmönjohtavuusarvojen perusteella, testatun lentotuhkan vastaavuus eristävyyskannalta on samaa luokkaa kuin lentotuhkilla tyypillisesti. Tulosten mukaan kapillaarisuus on lentotuhkilla suuri, yli 90 cm. Tämä vaikuttaa tuhkan hyödyntämismahdollisuuksiin suodatinkerroksessa.

Taulukko 15. Massiivituhrakenteen tutkimustulokset. Taso tarkoittaa maksimikuivairtoisuuden ja optimivesipitoisuuden tason määrittämistä ilman täydellistä Proctor -sarjaa.

Runkoaine	Lentotuhka			
	Sideainelaatu	-	PlusSe	
Sideainemäärä	-	3%	5%	1,5 + 3,5%
Proctor -sarja, $\rho_{d \max}$ [kg/m ³]/ w_{opt} [%]		parannettu: 1300/33,0 modifioitu: 1135/36,0	taso: 1315/33,5	
Puristuslujuus (MPa)				
28d	1,96/2,02	3,14/3,38	3,91/3,83	3,42/3,41
JS -kokeen jälkeen	2,07/2,16	3,54/3,22	4,55/3,53	3,93/3,42
90 d	7,07	9,16		8,82
Routakoe, SPo* [mm ² /Kh]	< 0,1	< 0,1		< 0,1
Lämmönjohtavuus, sula/jäässä [W/Km]	0,54/0,62			
Vedenläpäisevyys [m/s]	$2,9 \cdot 10^{-7}$			
Tiivistyvyyskoe	Tehty			
Kapillaarisuus [mm] (2 eri tiheyttä)	>900			

*SPo = segregaatiopotentiaali

Massiivituhrakokekappaleiden puristuslujuuksia testattiin heti 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen sekä jäädytys-sulatustestin ja 90 vuorokauden tiivistymisen jälkeen (kuva 12). Puristuslujuudet testattiin kahdella rinnakkaisella koekappaleella. Puristuslujuustestien tulostuslomakkeet on esitetty liitteenä (liite 1) Kuvassa pylväät esittävät rinnakkaisten puristuslujuustestien keskiarvoa.



Kuva 12. Lentotuhkan massiivikoeappaleen puristuslujuus suoraan 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen sekä jäätymis-sulamiskokeen (JS-koe) ja 90 vuorokauden lujittumisen jälkeen. Paksut viivat osoittavat Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen 2017 mukaiset käyttöluokkien rajat.

Kuvan puristuslujuus tuloksista havaitaan, että sementin lisäys lentotuhkaan nostaa heti sen puristuslujuutta merkittävästi. Kun lisättiin 3 % sementtiä, nostaa se puristuslujuuden n. 2 MPa:sta arvoon 3,26 MPa. Sementin määrällä 5 % lentotuhkan kuivatilavuuspainosta nousee puristuslujuus lähes 4 %:n. Myös 1,5 % sementin ja 3,5 % masuunikuonajauheen seoksella puristuslujuus nousee merkittävästi pelkkään lentotuhkaan nähden. Huomattavaa on, että kaikilla kuvan testatuilla lentotuhkaseoksilla puristuslujuus nousee JS-kokeen jälkeen. Tämä ei ole tavanomaista lentotuhkilla mutta on selitettävissä eri polttolaitosten välisillä tuhkaohjelmilla eroilla. Kuvan perusteella nähdään myös, että massiivirakenteena käytettynä lentotuhka voidaan jakaa käyttöluokkiin käytännössä jo puristuslujuuden perusteella, mutta sen tulee täyttää myös muut luokittelukriteerit.

Lentotuhka lujittuu useimmiten ilman sideainetta, mutta kuten havaitaan, sen käyttöluokkaa voidaan nostaa lisäämällä lentotuhkan joukkoon sementtiä ja kuonajauhetta. Massiivirakenteena käytettäessä ilman sideaineita, lentotuhkan puristuslujuus jää alle 3 MPa:n, jolloin se sijoittuu Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) mukaan käyttöluokkaan LT II. Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) mukaan lentotuhkan puristuslujuus (28d) ilman sideainelisäystä voisi parhaimmillaan kuitenkin olla jopa 5 MPa. Lentotuhka kestää yksistäänkin ilmeisen hyvin jäädytys-sulatuskokeen rasitusta mutta sementin ja kuonajauheen lisäys nostaa tuhkan käyttöluokkaan LT I suuremman puristuslujuuden ansiosta (taulukko 16).

Taulukko 16. Massiivilentotuhkien luokittelu käyttöluokkiin.

Runkoaine	Side- aine	Luokitteluominaisuudet				Käyttö- luokka
		PL 28d* [MPa]	JS -koe [%]	Routi- vuus	Vedenläpäise- vyys [m/s]	
Ehdot		LT1: 3-8 LT2: 1-8	LT1: <15 LT2: <30	Routimat on	LT1 ja LT2: ≥1*10 ⁻⁸	
Massiivi- lentotuhka	-	1,99	< 15	Kyllä	2,9*10 ⁻⁷	LT2
	PlusSe 3%	3,26	< 15	Kyllä	-	LT1
	PlusSe 5%	3,87	< 15	Kyllä	-	LT1
	PlusSe 1,5% +KJ400 3,5%	3,42	< 15	Kyllä	-	LT1

*Yksiaksiaalinen puristuslujuus 28 vrk, ** Jäädytysulamiskokeen jälkeinen lujuuden alenema

Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) mukaan käyttöluokaltaan LT II massiivilentotuhka soveltuu hyvin päällysrakenteen routaa eristäviin ja jopa jakavaan kerrokseen ilman sideainelisäystä. LT II - luokan lentotuhkalle ei voida kuitenkaan antaa vähäisemmän lujittumisen vuoksi kantavuusmitoituksessa niin suurta E -moduuliarvoa kuin LT I -luokan tuhkalle. Massiivirakenteita käytetään usein sitomattomana jakavan kerroksen alaosissa tai sitä alempana. Sideaineilla lujitettuja massiivilentotuhkia voidaan käyttää myös jakavan kerroksen yläosissa mutta sementin ja kuonajauheen lisäys lisää myös rakennekerroksen kustannuksia. Eri sementin ja kuonajauheen seosainereseptejä vertailemalla ei saavuteta käyttöluokitteluun tai rakennevaihtoehtojen vertailuun lisäarvoa, sillä pienellä sideainelisäyksellä lentotuhka voidaan lukea LT I -luokan tuhkaksi. Myöskään erot eri sideainemäärillä sidottujen LT I -luokan tuhkien puristuslujuuksissa eivät ole kovin suuria. Eri vaihtoehtojen kannattavuutta tulee miettiä kustannusvertailujen avulla.

Massiivituikkakokekappaleiden puristustuloksesta 90 vuorokauden lujittumisen jälkeen nähdään, että lentotuhkalla on merkittävä kyky lujittua ajan kuluessa. Lentotuhka, jonka puristuslujuus 28 vuorokauden jälkeen oli noin 2 MPa, saavutti 90 vuorokauden jälkeen

yli 7 MPa:n puristuslujuusarvon. Sementti- ja kuonajauheseoksilla saavutetaan noin 2 MPa suurempi 90 vuorokauden puristuslujuus kuin pelkällä massiivilentotuhkalla.

6.2.2 Pohjatuhkakoekappaleet

Pohjatuhkakoekappaleen testituloksista (taulukko 17) havaitaan, että Proctor -kokeella saatu maksimikuivavirtotiheys on suurempi kuin Tuhkaohjekortissa (käsikirjoitus 2017) esitetty tyypillinen taso 1000-1500 kg/m³. Samoin optimivesipitoisuus on hieman alhaisempi. Vedenläpäisevyys näyttää tyypillisen pohjatuhkan vedenläpäisevyyttä (10⁻⁶-10⁻⁵ m/s) korkeammalta mutta se täyttää siten paremmin myös suodatinkerroksen vedenläpäisevyysvaatimukset. Kapillaarisuus testatulla pohjatuhkalla on suodatinkerroksen materiaaliksi korkea eli 880 mm, mikä on lähes samaa luokkaa kuin lentotuhkalla (>900 mm), joten sen soveltuvuus siihen on epätodennäköiseltä. Kuten aiemmin todettiin testattu pohjatuhka ei täytä myöskään suodatinkerroksen rakeisuusvaatimuksia, joten se ei siten täytä myöskään PT I -luokan pohjatuhkalle asetettuja vaatimuksia (taulukko 18).

Taulukko 17. Pohjatuhkakoekappaleen tutkimustulokset.

Runkoaine	Pohjatuhka
Proctor -sarja, $\rho_{d \max}$ [kg/m³]/ w_{opt} [%]	parannettu: 1950/12,2
Lämmönjohtavuus, sula/jäässä [W/Km]	0,81/0,72
Vedenläpäisevyys [m/s]	1,1*10 ⁻³
Kapillaarisuus [mm]	880

Taulukko 18. Pohjatuhkan luokittelu käyttöluokkiin.

Runko-aine	Luokitteluominaisuudet			Käyttöluokka
	Raekoko-jakauma	Routivuus	Vedenläpäisevyys [m/s]	
Ehdot	PT1: InfraRYL mukainen suod.hiekan vaatimus	Routimaton	PT1: $\geq 1 \cdot 10^{-6}$	
Pohjatuhka	Ei täyty	-	1,1*10 ⁻³	PT II

Käyttöluokan perusteella ja Tuhkaohjekortin (käsikirjoitus 2017) mukaan on pohjatuhka käytettävissä penger- ja täyttörakenteissa, eikä sovellu PT1 -luokan pohjatuhkan tavoin jakavaan tai suodatinkerrokseen. Pohjatuhkaa ei siten ole tarpeen tarkastella kiito- tai rullaustien rakennevaihtoehtona.

6.2.3 Kerrosstabiloinnin koekappaleet

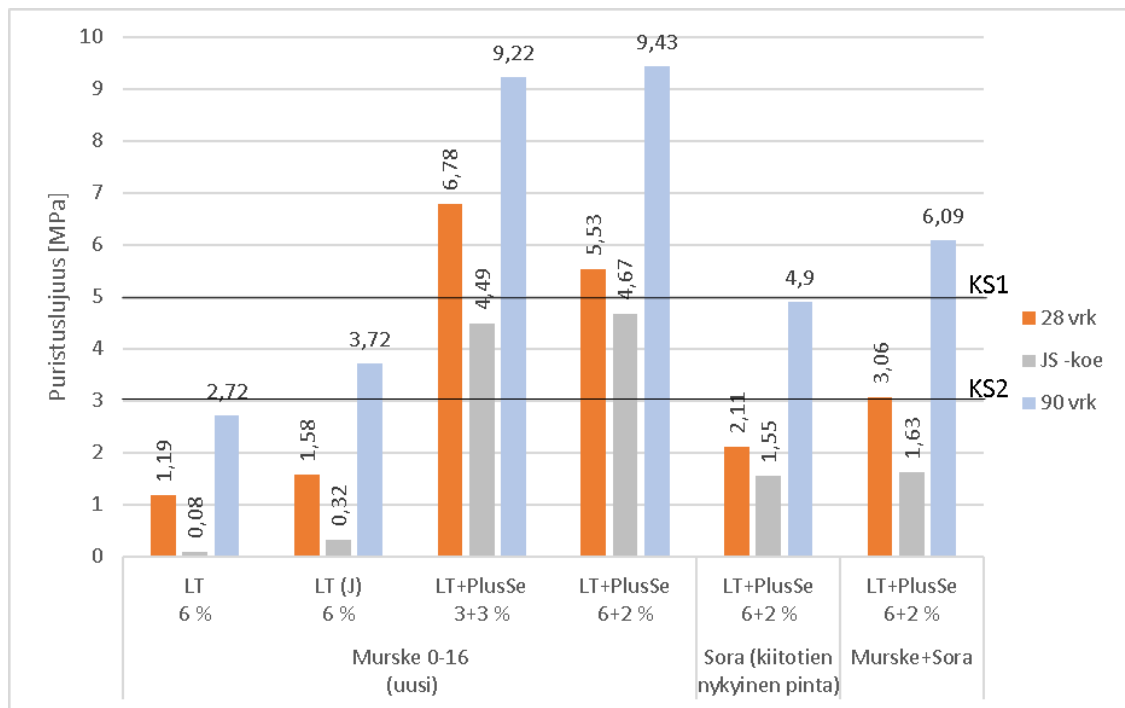
Stabiloitujen koekappaleiden laboratoriotuloksista nähdään sideaineiden ja niiden suhteiden vaikutus kerrosstabiloidun rakenteen ominaisuuksiin (taulukko 19). Testituloksista ja kuvaajasta (kuva 13) nähdään, että 28 vrk puristuslujuudet jäävät alhaisiksi, kun sideaineina käytetään pelkkää lentotuhkaa tai jauhettua lentotuhkaa. Lujuudet myös putoavat jäädytys-sulatuskokeen jälkeen merkittävästi eivätkä ainoastaan lentotuhkalla stabiloidut koekappaleet siten kestä jäätymis-sulatussykliä, vaan vaativat sementtiä sideaineeksi. Tuloksista havaitaan, että heikosti lujittuvat stabiloituna myös nykyisen kiitotien sora sekä uuden murskeen ja nykyisen soran seos, vaikka lentotuhkan lisäksi sideaineena käytettiin sementtiä.

Huomattavasti paremmat puristuslujuudet saadaan uudella murskeella, joka on stabiloitu lentotuhkan ja sementin seoksilla. Seossuhteella, jossa on 3% lentotuhkaa ja 3% sementtiä, puristuslujuus laskee JS -kokeen jälkeen merkittävästi (34 %), mutta puristuslujuus on kuitenkin edelleen tämän jälkeen hyvä. Sen sijaan lentotuhkan pitoisuuden ollessa 6 % ja sementin 2 %, puristuslujuus heikkenee JS -kokeen jälkeen ainoastaan 15 %. Routivuuskokeiden perusteella pelkällä lentotuhkalla stabiloidut koekappaleet ovat lievästi routivia ($SPo = 0,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$), koska niiden segregaatiopotentiaali on välillä 0,18 - 0,72 mm^2/Kh . Lentotuhka-sementti (6 % + 2 %) -sideaineella stabiloitu murske puolestaan on tulosten perusteella luokiteltavissa routimattomaksi.

Taulukko 19. Kerrosstabiloidun rakenteen laboratoriotulokset. Taulukossa sora tarkoittaa nykyisen kiitotien soraa. Taso tarkoittaa maksimikuivairtoisuuden ja optimivesipitoisuuden tason määrittämistä ilman täyttä Proctor -sarjaa.

Runkoaine	Murske (uusi) 0-16mm				Sora	Murske+Sora
	LT	LT (J*)	LT+PlusSe		LT+PlusSe	LT+PlusSe
Sideainemäärä	6%	6%	3+3%	6+2%	6+2%	6+2%
Proctor -sarja, ρ_d max [kg/m ³]/ w _{opt} [%]	taso: 2280/7,1			paran.**: 2290/ 6,8	paran.: 2165/6,7	
Puristuslujuus [MPa]						
28d	-/1,19	1,58/ 1,58	7,03/ 6,53	6,03/ 5,02	2,24/1,98	3,12/2,99
JS -kokeen jälkeen	0,04 /0,12	0,31 /0,32	4,55 /4,42	4,74/4,59	2,47/0,63	1,06/2,19
90d	2,72	3,72	9,22	9,43	4,9	6,09
Routakoe, SPO [mm ² /Kh]	0,5	0,5		< 0,1		
Vedenläpäise- vyys [m/s]				5,3*10 ⁻⁹		
Tiivistyvyys				Tehty		

*Jauhettu lentotuhka, **paran. tarkoittaa parannettua Proctor -koetta



Kuva 13. Stabiloidun koekappaleen puristuslujuudet ennen jäätymissulamiskoetta ja sen jälkeen sekä 90 vuorokauden lujittumisen jälkeen. Paksut viivat osoittavat Tuhkaohjekortin (käsikirjoitus 2017) mukaiset luokittelurajat.

Tuhkarakentamisen käsikirjassa (2012) on luokiteltu kerrosstabiloidut rakenteet kahteen luokkaan. Alemman luokan kerrosstabiloidulta rakenteelta (KS2) vaaditaan ohjeessa yli 3 MPa:n puristuslujuutta ja ylemmän luokalta (KS1) vaaditaan 5 MPa:n puristuslujuutta. Kummallakin jäätymis-sulamiskokeen jälkeinen puristuslujuus saa pudota enintään 20%. Todellista rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä ajatellen puristuslujuus tarkastelussa jäätymissulamiskestävyys on hyvin tärkeä (Kiviniemi ym. 2012). Verrattaessa tuloksia Tuhkarakentamisen käsikirjan määrittelyihin nähdään, että kerrosstabiloinnin seossuhteista käytännössä ainut mahdollinen hyödynnettävä seos rakenteessa on uuden murskeen stabilointi 6 %:lla lentotuhkaa ja 2 %:lla sementtiä.

6.3 Ympäristökelpoisuus

Ympäristökelpoisuus määritetään koekappaleesta joko kaksivaiheisella ravistelutestillä tai diffuusiotestillä edellä kuvattujen teknistä kelpoisuutta määrittelevien testien jälkeen. Ympäristökelpoisuus testataan niiltä koekappaleilta, jotka teknisesti kelpaavat lentopaikan päällysrakenteisiin. Ympäristökelpoisuutta ei kuitenkaan käsitellä tarkemmin tässä diplomityössä.

7 SASSIN LENTOPAIKAN TUHKARAKENTEIDEN MITOITTAMINEN JA VAIHTOEHTOVERTAILU

7.1 Rakenteiden mitoitus ja mitoitusperusteet

Laboratoriotulosten perusteella hyödynnettävissä olevia tuhkarakenteita ovat massiivilentotuhkarakenne joko ilman sideaineita, jolloin sen käyttöluokka on LT II tai sideaineilla lujitettuna, jolloin käyttöluokka nousee luokkaan LT I. Koekappaletulosten perusteella toinen soveltuva tuhkan hyödyntämistapa on käyttää sitä uuden murskeen stabiloinnissa sideaineena yhdessä sementin kanssa. Pohjatuhka ei ole rakeisuuden ja kapillaarisuustestin perusteella hyödynnettävissä rakenteessa.

Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) massiivilentotuhkakerroksen paksuudelle on asetettu minimi paksuus, joka on 250 mm. Massiivituhkan tulee olla hyödyntämiskohteessa peitetty, joten massiivituhkarakenteen rakennepaksuutta määrää osittain lentotuhkakerroksen päälle vaadittava murskekerros. Murskekerroksen tarkoitus on mm. johtaa päällysteen läpi suotautuva vesi pois rakenteesta. Murskekerroksen paksuuteen vaikuttaa tuhkan käyttöluokka. LT I -luokan lentotuhkan päälle vaaditaan päällystetyssä rakenteessa vähintään 200 mm ja LT II -luokan lentotuhkalla vähintään 300 mm mursketta.

Toinen rakennekerroksen paksuuteen vaikuttava tekijä on massiivilentotuhkan alle vaadittava suodatinkerros. Tuhka on herkkä veden vaikutuksille, joten tuhka on pidettävä kuivana kapillaarivedeltä. Lisäksi kapillaarinen nousukorkeus on lentotuhkalla suuri. Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) mukaan massiivilentotuhkan alla on oltava vähintään 200 mm paksuinen kapillaarikatko. Kapillaarikatkon materiaali vaikuttaa kuitenkin merkittävästi mitoittavan suodatinkerroksen paksuuteen. Tyypillisesti suodatinkerroksessa käytetään hiekkaa, mutta hiekassa kapillaariveden nousukorkeus voi olla suurikin ja vaihdella paljon. Alla on esitetty tietoja tiiviin hiekan kapillaarisuuksista (Korhonen ym. 1985).

Kapillaarisuus (tiivis hiekka)

- | | |
|-----------------------------|-------------|
| a. karkea 0,6-2,0 mm | 4 - 15 cm |
| b. keskihiekka 0,2-0,6 mm | 12 - 50 cm |
| c. hieno hiekka 0,06-0,2 mm | 40 - 350 cm |

Hiekan kapillaarisuuden perusteella voidaan todeta, että rakennettaessa kapillaarikatko hiekalla, tulee sen rakeisuudelle asettaa tarkat vaatimukset ja käyttää esimerkiksi tiheää suodatinkerroksen salaojitusta, jotta tuhka pysyy kuivana. Turvallisempi vaihtoehto kapillaarikatkoksi olisi kuitenkin esimerkiksi karkeampi sora, joka pysäyttää kapillaarisen nousun tehokkaammin.

Seuraavaksi on määritelty tässä työssä kantavuus ja routamitoituksessa käytetyt lähtötiedot ja oletukset. Kantavuusmitoitus on tehty Odemarkin kantavuusyhtälöllä ja routamitoitus routaturpoamamenetelmällä. Kantavuus- ja routamitoituksen laskentataulukot esitetään liitteenä (liite 2).

7.1.1 Kantavuus

Kuten on todettu, pienlentokentän kantavuus määräytyy kenttää käyttävän huoltokaluston perusteella. Lisäksi lentopaikoilla päivittäiset liikennemäärät ovat vähäisiä ja kriittiset kuormitukset syntyvät huoltoajoneuvoista. Pienlentopaikkojen kantavuusvaatimusten osalta järkevää on tarkastella tie- ja katumitoituksen ohjeita ja pyrkiä löytämään liikennemäärältään ja -tyypiltään samankaltaisuutta. Liikennemäärän ja kuormittavuusennusteiden perusteella arvioituna Mäntän lentopaikka vastaa InfraRYL:n mukaista katuluokkaa 5. (taulukko 20).

Taulukko 20. Liikennemäärä ja kuvaus katuluokassa 5 (mukaillen InfraRYL 2017b).

Katuluokka	Kuvaus	Liikennemäärä, ajon./vrk
5	Pientaloalueen asuntokatu, huoltoliikenteen väylät, henkilöautojen pysäköintialueet	10 - 500

Pohjamaa vaihtelee alueella paljon mutta se on lähtötietojen pohjalta pinnasta silttiä sekä vanhan kiitotien kohdalla täyttömaata. Kyseisellä pohjamaalla laskennallinen tavoitekantavuus katuluokassa 5 on InfraRYL:n mukaan kantavan kerroksen päältä noin 190 MPa ja päällysteen päältä noin 230 MPa (taulukko 21). Kirjallisuusselvityksen perusteella kantavuuden tulisi rullausteilla olla samaa luokkaa kuin kiitotiellä. Pienlentopaikalla päällysteen kulumisen oletetaan olevan vähäistä. Kantavuuslaskennassa on päädytty seuraaviin Odemarkin menetelmän vaatimiin lähtötietoihin.

- päällystetyyppi: AB (asfalttibetoni päällyste)
- tavoitekantavuus kiito- ja rullausteilla: kantavan päältä 190 MPa
päällysteen päältä 230MPa
- päällystekerrosten vähimmäispaksuus: 50 mm
- pohjamaan/penkereen kantavuus: 20 MPa

Taulukko 21. Tavoitekantavuudet verrattaessa katuluokkaan 5 (mukaihen InfraRYL 2017c)

Pohjamaa (MPa)	Päällysrakenteen kokonaispaksuus, m	Tavoitekantavuus rakennekerroksen päältä, MPa		
		Jakava	Kantava	Päällyste
E (20)	1,30	150	190	230

7.1.2 Routanousu

Laskennallisen sallitun routanousun määrittely on tehtävä tässä lentopaikkojen tasaisuusvaatimusten perusteella sekä tukeutuen varalaskupaikkojen suunnitteluohjeisiin. Rullausteilla routanousuvaatimus on kiitotietä vähäisempi hitaampien ajonopeuksien vuoksi. Mitoituksessa sallittavaan laskennalliseen routanousuun vaikuttaa arvio siitä, kuinka tasaista routanousu alueella on. Tierakenteen suunnittelu (2004) -ohjeen mukaan sallittavaan routanousuun vaikuttaa se onko pohjamaa sekalaatuista vai tasalaatuista.

Alapuolella on esitetty mitoituksessa käytettävät, kirjallisuuskatsauksen perusteella määritetyt suurimmat sallitut laskennalliset routanousut kiito- ja rullausteilla (taulukko 22). Tässä työssä rakennetarkastelussa pohjamaa oletetaan sekalaatuiseksi, jolloin kriteerit ovat tiukemmat. Kiitotien sallittu laskennallinen routanousu on siten 0 mm ja rullausteilla 30 mm. Routamitoitusta varten tarvittu siirtymäkiilasyvyys on Mänttä-Vilppulan korkeudella 1,60 m. Pohjamaan perusteella routaturpoamaksi on arvioitu 16 % käyttäen ohjetta ”Tierakenteen suunnittelu (2004)”.

Taulukko 22. Kiito- ja rullausteiden sallitut laskennalliset routanousut

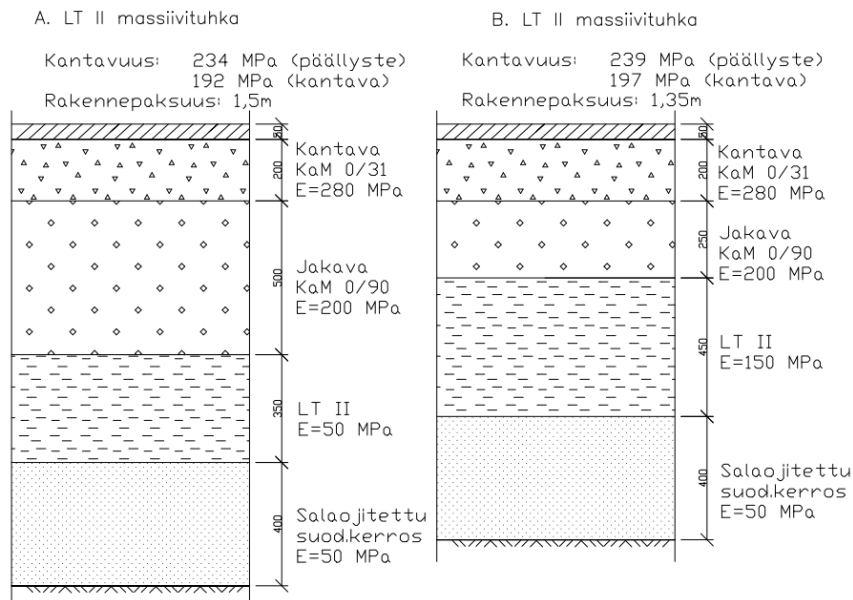
	Suurin sallittu laskennallinen routanousu (RN_{sall})		Siirtymäkiilan kaltevuus
	Tasalaatuinen pohjamaa	Sekalaatuinen pohjamaa	
Kiitotie	30 mm	0 mm	1:40
Rullaustie	60 mm	30 mm	1:30

7.2 Vaihtoehtoja kiitotierakenteelle

Massiivilentotuhkarakenne

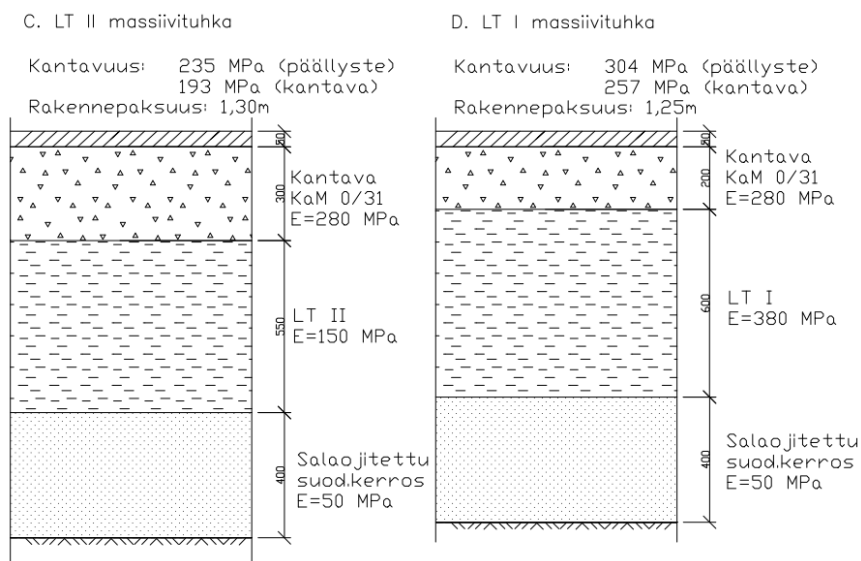
Kiitotien rakenteessa massiivilentotuhkista käyttökelpoisia ovat käyttöluokan LT I ja LT II lentotuhkat. Tuloksissa esitetyn käyttöluokittelun perusteella ilman sideaineita käytetty Mäntän Energian lentotuhka kuuluu käyttöluokkaan LT II. Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) perusteella voidaan jakavassa kerroksessa käyttää E -moduuliarvona enintään 150 MPa. Saman ohjeen mukaan kuitenkin eristävän kerroksena jakavan kerroksen alapuolella eristekerroksena käytettynä E -moduulina voidaan käyttää arvoa 50 MPa. Alla esitetyistä rakenteista (kuva 14) nähdään, että tuhkan lujuus ja arvioitu jäykkyyshmoduuli vaikuttavat merkittävästi yllä olevien kantavan ja jakavan kerroksen paksuuteen sekä tarvittavan lentotuhkakerroksen paksuuteen.

Riittävän kantavuuden saamiseksi vaaditaan melko paksu kerros mursketta, kun lentotuhkalle käytetään E -moduulin arvoa 50 MPa, kuten Tuhkaohjekortissa (käsikirjoitus 2017) eristekerroksessa edellytetään. Lentotuhkarakenteessa on siis suuri merkitys sillä, miten lujittuvaa tuhkamateriaali on. Kuvan rakenteissa A ja B kantavuus on pääasiassa pyritty saamaan perinteisten murskekerrosten avulla niin, että esimerkiksi tuhkan kostumisesta johtuvan kantavuuden heikentymisen vuoksi päällysrakenteen kokonaiskantavuus pysyisi kuitenkin riittävänä (liite 2).



Kuva 14. Eristekerroksena toimivan LT II -luokan lentotuhkan E -moduulien vaikutus rakennepaksuuteen.

Tutkittu Mäntän Energian lentotuhka, johon on lisätty sementtiä tai sementtiä ja masuunikuonajauhetta, kuuluu käyttöluokkaan LT I. Tällä saadaan tuhkerakkekselle huomattavasti lisää kantavuutta verrattuna LT II -luokan tuhkaan (kuva 15). Suurin mahdollinen E -moduuli on LT I luokan tuhkalle jakavassa kerroksessa käytettynä 500 MPa, huomioiden kuitenkin Odemarkin -menetelmän lisäehdot. Sideaineilla lujitettua LT I -luokan massiivituikkaa on jäykkyysoinaisuuksien vuoksi kannattavaa käyttää lähinnä jakavassa kerroksessa päällysrakenteen yläosissa kuten alla rakenteessa D.



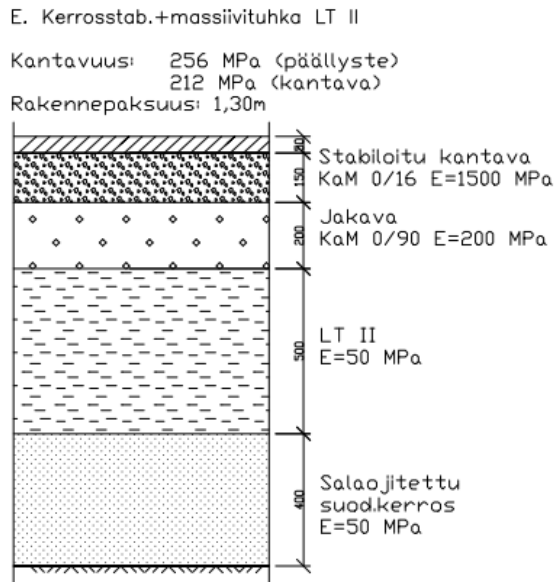
Kuva 15. Massiivituikkarakenteet LT I ja LT II -luokkien lentotuhkista.

Kuvan rakenteissa on käytetty murskepiteelle Tuhkaohjekortin käsikirjoituksessa (2017) mukaisia vähimmäispaksuuksia, joka LT II -luokan tuhkalla (rakenne C) tulee olla 300 mm ja LT I -luokan tuhkalla 200 mm (rakenne D). Edellä kuvatuissa rakenteissa myös suodatinkerroksen paksuus on vakioitu minimipaksuudeksi, jolla kapillaarinen nousu saadaan katkaistuksi. Tällöin rakenteen kantavuuden ja routanousun määrittelee pääasiassa tuhkakerroksen paksuus ja lujuus. Rakenteessa C riittävä kantavuus saadaan LT II -luokan tuhkalla routaeristeeksi vaadittavalla minimipaksuudella. Routamitoituksen kannalta vaaditaan 600 mm paksuinen LT I -luokan tuhkakerros, jolla saavutetaan kantavan kerroksen päältä 257 MPa kantavuus. Tämä ylittää helposti vaaditun kantavuuden.

Massiivituhrakenteista ohuin rakennepaksuus 1,25 m, on mahdollista saavuttaa sideaineiden avulla LT I -luokan lentotuhkalla (rakenne D). Lentotuhkan LT I etuna on todella hyvä lujittumiskyky mutta haittapuolena sideainekulu ja siten tuhkakerroksen korkeammat kustannukset. Rakennevaihtoehdoissa B ja C on käytetty LT II -luokan lentotuhkaa, jolle on annettu E -moduularvo 150 MPa. Rakenteella C, saavutetaan riittävä kantavuus vähäisemmällä murskemäärällä ja ohuemmalla kokonaisrakenteella. Lähellä tuotettu tuhka on kokonaiskustannuksiltaan varmasti edullisempi materiaali kuin murskeet, joten murskeen osittainen korvaaminen B ja C rakenteen tavalla voisi olla tässä mielessä kustannustehokasta. Minimi murskekerroksen paksuus toisaalta vaatii lentotuhkan lujittumiselta ja toimivuudelta selkeästi enemmän, huomioiden sen, että tuhkien laatu vaihtelee paljon ja vaatii mm. tiivistämisen, lujittumisen ja kuivana pidon onnistumista.

Kerrosstabiloitu kiitotierakenne

Koekappaletutkimusten perusteella päällysrakenteelle voidaan saada merkittävästi kantavuutta kerrosstabiloimalla kokoluokan 0-16 mm mursketta. Testatuista sideainesuhteista toimivimmaksi osoittautui seos, jossa on lentotuhkaa 6 % ja sementtiä 2 %. Tuhrakentämisen käsikirjan mukaan ja puristuslujuustestien perusteella kerroksen E -moduulina käytettiin arvoa 1500 MPa (Kiviniemi ym. 2012). Rakenteesta (kuva 16) havaitaan, että tavoiteltu kantavuusvaatimus täyttyy jo melko ohuella stabiloidulla kerroksella sekä murskekerroksella. Kuvassa esitetyn rakenteen E kokonaispaksuus on 1,3 m, joka samaa tasoa kuin LT II -luokan massiivituhrakenteella C. Kuvasta nähdään, että routamitoitus määrittelee rakenteen kokonaispaksuuden.



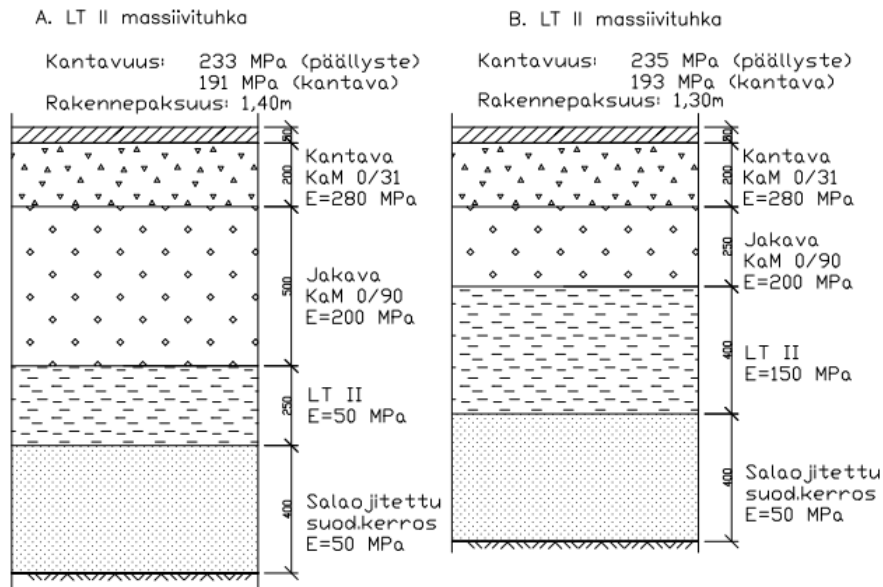
Kuva 16. Kiitotierakenne, jossa kantava kerros on stabiloitu sideaineseoksella ja eristeenä on käytetty massiivilentotuhkaa.

Sassin lentopaikalla kantavuusvaatimukset saadaan täyttämään melko hyvin jo normaaleilla murskekerroksilla, joten kantavuuden lisääminen stabiloimalla ei ole todennäköisesti järkevää, sillä stabilointi tulisi lisäämään rakennekerroksen työmäärää ja kustannuksia. Kerrosstabilointi on kuitenkin mahdollinen rakennevaihtoehto, jossa rakenteen kokonaispaksuus saataisiin pidettyä ohuena. Raskaampien ilma-alusten liikennöimillä lentopaikoilla kantavuuden tarve voi olla huomattavasti suurempi, jolloin tuhkerakennestabilointi voisi olla vaihtoehtona merkittävämpi.

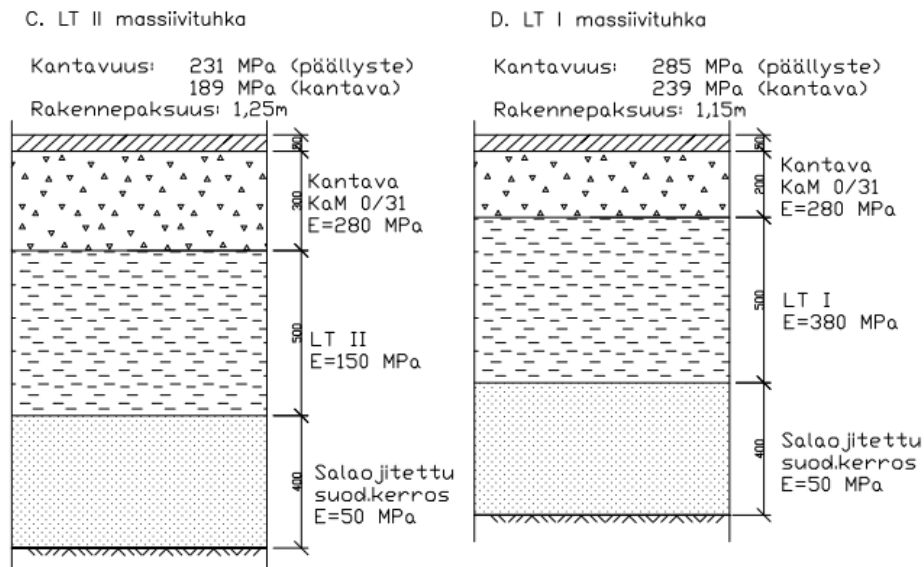
7.3 Vaihtoehtoja rullaustierakenteelle

Rullaustielle määritettiin rakennekerrokset samalla periaatteella kuten kiitotielle. Tavoite kantavuutena käytettiin samaa kuin kiitotiellä mutta routanousua sallittiin 30 mm. Tämä vaikuttaa olennaisesti lähinnä eristävän lentotuhka kerroksen paksuuteen (kuva 17). Rullaustierakenteissa käytettynä riittävä kantavuus ja riittävän vähäinen routanousu saavutetaan keskimäärin 50-100 mm ohuemmalla rakenteella kuin kiitotiellä.

LT I -luokan rakenteessa murskekerros on ohuempi, koska siinä lentotuhkerakennestabilointi huomattavasti paremmin kuin LT II -luokan lentotuhka (kuva 18). Toisaalta kuten kiitotierakenteessa, myös rullaustiellä tulee Tuhkaohjekortin (käsikirjoitus 2017) edellyttämä tuhkaa peittävien murskekerrosten vähimmäispaksuudet täyttyä.



Kuva 17. Rullaustierakenteet eri LT II -luokan lentotuhkan E -moduularvoilla.



Kuva 18. Massiivituikkarakenteen vertailu LT I ja LT II luokkien lentotuhkilla.

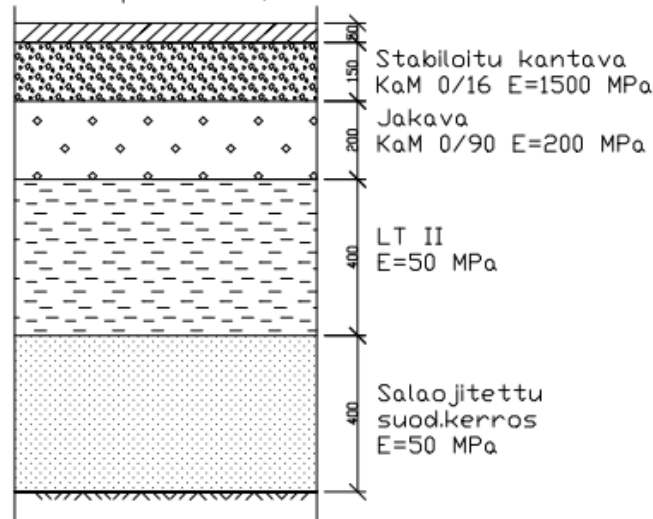
Kerrosstabiloitu rullaustierakenne

Kerrosstabiloidun rakenteen avulla kantavuutta voidaan lisätä myös rullaustierakenteessa. Asetettu kantavuustavoite saavutetaan 150 mm stabiloidulla kantavalla kerroksella ja 200 mm murskekerroksella. Massiivilentotuhka toimii tässä eristävänä kerroksena, jonka paksuus määräytyy routamitoituksen perusteella 400 mm:n. Kokonaispaksuus ohenee 100 mm kiitotien vastaavanlaiseen rakenteeseen nähden, mikä johtuu ohuemmasta tuhkakerroksen paksuudesta (kuva 19).

E. Kerrosstab.+massiivituikka LT II

Kantavuus: 253 MPa (päällyste)
210 MPa (kantava)

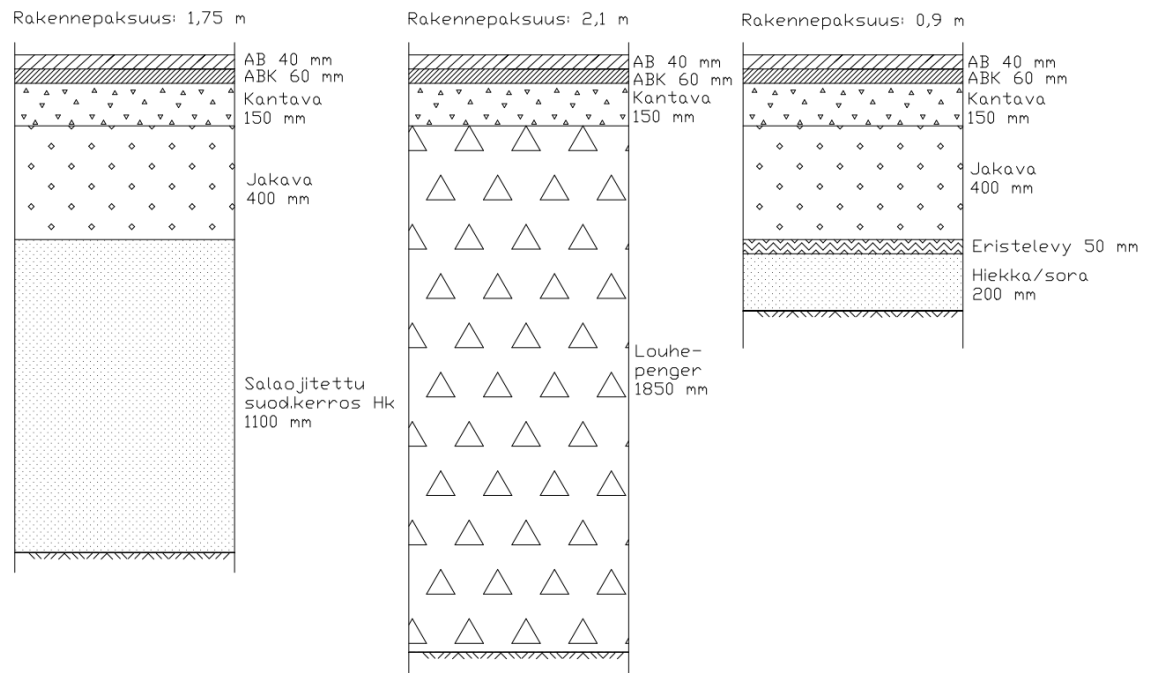
Rakennepaksuus: 1,20m



Kuva 19. Rullaustien rakennevaihtoehto, jossa kerrosstabiloitu kantava kerros ja massiivituikkaeristekerros.

7.4 Vastaavat perinteiset päällysrakennevaihtoehdot

Sassin lentopaikalle on mitoitettu aiemmin rakennettavuusselvityksen yhteydessä kiitotierakenteet käyttäen perinteisiä materiaaleja. Kiitotien mahdollisiksi päällysrakennevaihtoehdoiksi on mitoitettu tällöin perinteinen hiekkarakenne, louherakenne sekä lämpöeristerakenne. Rakenteet on rakennettavuusselvityksen perusteella pyritty mitoittamaan routimattomaksi (kuva 20). (Kasari ym. 2016) Kyseiset rakenteet eivät ole täysin vertailtavissa tässä työssä mitoitettuihin rakenteisiin, koska käytettävissä ei ole aiemmin mitoitettujen rakenteiden mitoituskriteerejä, kuten tavoitekantavuutta ja sallittua routanousua. Kuvasta kuitenkin nähdään, että kiitotien perinteisen hiekkarakenteen paksuus on 1,75 m, kun tässä työssä esitettyjen tuhkarakenteiden paksuudet ovat 1,25-1,5 m. Perinteisten materiaalien rakenteista ainoastaan lämpöeristerakenteesta on saatu mitoitettua selvästi ohuempi kuin tuhkarakenteista.



Kuva 20. Kiitotielle mitoitettu perinteinen hiekkarakenne, louherakenne ja lämpöeristerakenne (Kasari ym. 2016)

8 RAKENTAMINEN

8.1 Muodostuvien soveltuvien tuhkien määrä

Edellä on käsitelty tuhkien soveltuvuutta ja niiden käyttövaihtoehtoja päällysrakenteessa. Tuloksena nähdään, että lentotuhka voi soveltua teknisiltä ominaisuuksiltaan kiito- ja rullaustien rakennusmateriaaliksi usealla tavalla hyödynnettynä. Vaihtoehtovertailua on syytä miettiä kustannusnäkökulmasta.

Karkeasti Mäntän Energian vuosituotannosta syntyy lentotuhkaa 10 000 - 15 000 tonnia vuodessa. Mikäli tuotannon lentotuhka vastaa koeajosta otettua lentotuhkanäytettä, se on sellaisenaan päällysrakenteen massiivituhkakerrokseen soveltuvaa LT II -luokan lentotuhkaa. Tuhkaohjekortin (käsikirjoitus 2017) ja sen liitteiden mukaisella laadunvarmistuksella tulee kuitenkin varmistua, että poltosta tulevan materiaalin laatu pysyy samanlaisena ja huomioida materiaalissa kuljetuksen ja varastoinnin aikana tapahtuvat muutokset. Pohjatuhka ei tehtyjen testien perusteella sovellu lentopaikan päällysrakenteisiin. Toisaalta Mäntän Energialta tulevan pohjatuhkan määrä on myös huomattavasti vähäisempää, noin 2000 tonnia vuodessa.

8.2 Varastointi ja logistiikka

Lentopaikan päällysrakenteissa tarvittavan lentotuhkan määrä on niin suuri, että polttoprosessista tulevaa tuhkaa täytyy kerätä ja varastoida pidemmän aikaa. Lisäksi on huomioitava, että tuhkia syntyy tavallisesti talvikaudella enemmän kuin kesällä suuremman energiantarpeen takia, kun taas rakentaminen sijoittuu usein kesäkaudelle (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017). Sassin lentopaikka on logistisesti hyvällä etäisyydellä tuhkan kuljetuksen ja varastoinnin kannalta. Kuljetuksissa tulee kuitenkin kiinnittää huomiota lentotuhkan pölyävyyteen kuivana. Varastoinnissa tulee huomioida, että se voi vaikuttaa merkittävästi lentotuhkan teknisiin ominaisuuksiin.

Varastoinnin vaikutus riippuu paljon siitä, tehdäänkö varastointi kuivana vai kosteana. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017) Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) mukaan kuiva lentotuhkan on todettu säilyttävän kustutettua huomattavasti paremmin maarakennuskelpoiset ominaisuutensa, ja se pysyy reaktiivisena sekä homogeenisena pitkiäkin aikoja. Käytännössä koko lentopaikalla käytettävää tuhkamäärää ei kuitenkaan

voida varastoida kuivana. Siten on tärkeää huomioida, että kostutettuna lentotuhkan sitoutumis- ja kovettumiskyky pelkän veden vaikutuksesta alenee jo muutamassa viikossa, ja usein suurimmat muutokset teknisiin ominaisuuksiin tapahtuvatkin varastoinnin alkuvaiheessa. Kostutettuna varastointiin on kaksi tapaa, joista ensimmäinen on hallittu läjitys suuriin kasoihin ja toinen varastointi varastoauomoihin. Varastoinnissa tärkeää on huomata, että varastokasaa tai -aumaa ei saa missään tapauksessa tiivistää, koska tiivistettynä kostea tuhka alkaa lujittua. Välivarastoinnin aikaiseen laadunseurantaan kuuluu keskeisesti tuhkan vesipitoisuuden seuranta. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017)

8.3 Rakentamisen laadunvalvonta

Rakentamisessa tuhkarakenteen onnistumiseen ja materiaaliominaisuuksien toteutumiseen vaikuttaa olennaisimmin rakenteen oikea vesipitoisuus tiivistyshetkellä sekä riittävä tiivistystyömäärä. Vesipitoisuus korreloi kiinteästi lentotuhkan tiivistyvyyden kanssa. Täten vesipitoisuuden vaihteluväli, jolla tavoiteltu tiiveys voidaan saavuttaa, on erityisen tärkeää määrittää ja seurata vaihteluvälillä pysymistä. (Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017) Alla on määritelty rakentamisen aikaisen laadunvalvonnan kannalta olennaisimmat seurattavat ominaisuudet, menetelmät ja testaustiheys (taulukko 23).

Taulukko 23. Rakentamisen aikaisessa laadunvalvonnassa seurattavat tuhkan ominaisuudet (mukaillen Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017)

Ominaisuus	Määrittelymenetelmä	Testaustiheys
Vesipitoisuus		kohteittain
Tiiveysaste	InfraRYL, Päälyys- ja pintarakenteet 2017, liite 2	100 m välein ajoradalla
Kantavuus	InfraRYL, Päälyys- ja pintarakenteet 2017	InfraRYL:n mukaisesti
Lujuusominaisuudet	Testisarja*	Testisarja/alkava 2000 tonnia

*6 testikappaletta, joista määritetään 28 vrk ja 90 vrk puristuslujuudet

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että Sassin lentopaikan kaltaisten valvomattomien lentopaikkojen väylät vastaavat liikennemääränsä ja liikenteen mekaanisen kuormittavuuden puolesta vähäliikenteisiä katuja, joiden kantavuusmitoitus voidaan pääasiassa tehdä tie- ja katusuunnitteluohjeita soveltaen. Routanousu on tärkeää kuitenkin rajata erityisesti kiitotien osalta suurien rullausnopeuksien ja lentoturvallisuuden takia pieneksi.

Tässä tutkimuksessa käsiteltyjen, Mäntän Energian tuhkille ja tuhkakoeleikille tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan todeta, että

- Lentotuhka sijoittuu ilman sideaineita Tuhkaohjekortin käsikirjoituksen (2017) mukaiseen käyttöluokkaan LT II, ja sitä voidaan massiivituhkana hyödyntää jakavan kerroksessa sekä eristeenä suodatinkerroksen yläosassa. Suodatinkerroksessa alle tarvitaan kuitenkin tehokas kapillaarikatko, johtuen tuhkan suuresta kapillaarisuudesta ja herkkyydestä veden vaikutuksille.
- Lentotuhkan käyttöluokkaa voidaan nostaa luokkaan LT I jo pienelläkin sideainelisyksellä, käyttäen sementtiä tai sementtiä ja masuunikuonajauhetta, jolloin massiivituhkakerros soveltuu kantavankerroksen alaosaan tai jakavaan kerrokseen.
- Stabiloinnissa lentotuhka ainoana sideaineena lujitti runkoainetta heikosti, ja kesti huonosti jäätyksen ja sulamisen aiheuttamaa rasitusta. Lentotuhkaa voidaan käyttää kuitenkin sideaineena laadukkaille runkoaineille yhdessä mm. sementtisineen kanssa.
- Pohjatuhka sijoittuu käyttöluokkaan PT II, jonka perusteella se ei sovellu päällysrakenteissa käytettäväksi.
- Tutkituilla materiaaleilla ja esitetyillä rakenteilla voidaan saavuttaa lentopaikan päällysrakenteissa ohuempi rakennepaksuus kuin esimerkiksi perinteisellä hiekkarakenteella. Kokonaispaksuuteen vaikutti merkittävästi routamitoitus, mutta kantavuuden kannalta tuhkan lujittumisella on suuri merkitys.

Keskeistä tuhkan hyötykäytössä lentopaikan rakenteessa tai missä tahansa päällysrakenteessa on kuitenkin huomioida, että tulokset eivät ole hyödynnettävissä suoraa muissa kohteissa vaan tuhkamateriaalit tulee tutkia materiaali- ja

tapauskohtaisesti. Lisäksi rakentamisen aikainen laadunvalvonta sekä rakentamisvaiheessa mm. tiivistystyön suorittaminen huolellisesti ovat edellytys tuhkan ominaisuuksien toteutumiselle ja toiminnalle lentopaikkarakenteessa.

Työn perusteella keskeisiä jatkotutkimusaiheita tuhkan hyödyntämisestä lentopaikoilla ovat ainakin koekohteiden rakentamisen ja pitkäaikaistoimivuuden seuranta. Lisäksi olisi syytä tutkia tuhkarakenteisiin tulevaa mahdollista kemiallinen rasiusta esimerkiksi lentopaikoilla, jossa käytetään sulanapitokemikaaleja. Hyvä olisi myös tutkia tuhkien mahdollisuuksia suuremmilla ja raskasliikenteisemmällä lentopaikoilla, joilla esimerkiksi tuhkerosstabiloinnilla saatavaa kantavuuden lisäystä voitaisiin enemmän tarvita.

10 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä perehdyttiin lentopaikkojen rakenteen mitoitusta ohjaavaan lainsäädäntöön, määräyksiin ja ohjeistuksiin. Tarkoituksena oli selvittää, minkälaisia kantavuus- tai routanousuvaatimuksia on asetettu, ja minkälaisia suunnitteluohjeita on olemassa lentopaikkojen liikennealueille. Vaatimusten perusteella haluttiin selvittää, täyttävätkö tuhkarakenteet, ja millä edellytyksillä, niille lentopaikalla asetetut tekniset vaatimukset, pääasiassa kantavuus- ja routanousuvaatimukset. Selvityksen perusteella tuhkarakenteista on tutkimus- ja kokemusperäistä tietoa jo runsaasti, jonka perusteella tuhkarakenteiden suunnitteluun ja rakentamisen toteuttamiseen riittää pääasiassa samat lähtötiedot kuin perinteisille materiaaleille. Materiaalien testimenetelminä ja kelpoisuuden toteamisessa voidaan myöskin käyttää pääosin samoja menetelmiä kuin perinteisille materiaaleille.

Kirjallisuusselvityksen perusteella keskeisenä huomiona työssä voidaan todeta, että lentopaikkojen suunnitteluun ei ole olemassa tai ainakaan helposti saatavilla suunnittelijoita varten yhtenäistä suunnitteluohjeistusta. Myöskään erikokoisten lentopaikkojen rakenteiden teknisiä vaatimuksia ei ole määritelty. Tämän tutkimuksen perusteella pienkoneiden laskeutuminen, rullaus tai lentoonlähtö eivät aiheuta päällysrakenteeseen mekaanisia kuormituksia, jotka vaatisivat lentopaikan päällysrakenteille erityisiä kantavuusmitoitusmenetelmiä. Kirjallisuustutkimuksen perusteella kuitenkin esimerkiksi Yhdysvalloissa on käytössä lentopaikkarakenteiden mitoitusmenetelmä, jossa on huomioitu myös pienlentopaikkojen erityispiirteet. Tämän selvityksen perusteella lentopaikkoja käsittelevissä kansallisissa tai kansainvälisissä määräyksissä ja ohjeistuksessa ei suoranaisesti puhuta myöskään lentoliikennealueilla sallituista routanousuista. Tässä työssä kirjallisuusselvityksen perusteella suuntaa sallittavalle laskennalliselle routanousulle arvioitiin kuitenkin mm. tasaisuusvaatimusten pohjalta.

Diplomityön tarkastelukohteena oli Mänttä-Vilppulan kaupungin alueelle suunniteltu Sassin lentopaikka. Tämän tutkimuksen perusteella Sassin lentopaikan kaltaisten valvomattomien lentopaikkojen kantavuusvaatimukset vastaavat liikennemääränsä ja liikenteen kuormittavuuden puolesta katuluokan 5 vaatimuksia. Liikenne on vähäistä määrällisesti, ja ilma-alusten kuormat eivät ole yleisesti ottaen suuria. Raskaimmat ajoneuvot ovat huoltoajoneuvoja, joiden liikenne on myöskin vähäistä. Lentopaikan

kiitotien routanousuvaatimukset vastaavat tiesuunnitteluohjeisiin verrattaessa lähinnä ohjeessa ”Tierakenteen suunnittelu (2004)” esitettyä moottoritien vaatimusluokkaa. Rullausteilla rullausnopeudet eivät kuitenkaan välttämättä edellytä tämän luokan lentopaikoilla yhtä matalia routanousuvaatimuksia.

Työn tutkimusosiossa tutkittiin Mäntän Energian voimalaitoksen tuhkamateriaalien käyttömahdollisuuksia Sassin lentopaikalla. Mahdollisia tuhkien hyödyntämistapoja, joita työssä pohdittiin, olivat:

- Massiivilentotuhkarakenne ilman sideaineita tai sideaineilla lujitettuna
- Pohjatuhkakerros suodatinkerroksessa
- Erilaisten runkoainemateriaalien kerrosstabilointi käyttäen sideaineena lentotuhkaa ja mahdollisesti muita sideaineita

Työssä käsiteltiin voimalaitoksen tuhkille sekä koekappaleille tehtyjen laboratoriomääritysten tuloksia. Keskeisimpänä testattiin puristuslujuutta ja rasiskestävyyttä ilmasto-olosuhteita vastaan. Tulosten perusteella määriteltiin testatut tuhkat käyttöluokkiin, joiden perusteella määriteltiin niiden hyödyntämiskelpoisuus ja se, missä kohtaa rakennetta tuhkia on mahdollista käyttää.

Tulosten perusteella työssä todettiin, että Mäntän Energian testatuista tuhista lentotuhkat ovat tuhkien käyttöluokittelun mukaan ilman sideainelisäystä käyttöluokassa LT II, jolloin sen käyttö on teknisesti mahdollista varsinkin lentopaikan päällysrakenteen alimmissa kerroksissa. Sideaineiden avulla lujitettuna tuhka saadaan nostettua korkeimpaan käyttöluokkaan LT I, jolloin lentotuhka voi soveltua myös ylempiin päällysrakennekerroksiin, kuten jakavaan kerrokseen. Lentotuhkaa voidaan käyttää myös kerrosstabiloinnissa yhtenä sideaineena uudelle murskemateriaalille mutta Mäntän Energian lentotuhka ei yksistään lujittanut riittävästi käytettyjä runkoainevaihtoehtoja. Voimalaitoksen tutkitut pohjatuhkat olivat käyttöluokan PT II tuhkia, jotka eivät sovellu lentopaikan päällysraketeissa käytettäväksi. Voimalaitostuhkien hyödyntämisestä pienlentopaikalla voidaan kuitenkin todeta, että lentotuhkia käyttämällä on mahdollista saavuttaa ohuemmat kiito- ja rullaustierakenteet kuin perinteisillä kiviainemateriaaleilla.

LÄHTEET

Alkio, R., Juvankoski, M., Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Laukkanen, K., Petäjä S., Pihlajamäki, J. & Spoof, H. 2001. Tien rakennekerrosten materiaalit, Taustatietoa materiaalivalinnoille, Tiehallinnon selvityksiä 66/2001 [verkkodokumentti]. Helsinki: Tiehallinto, Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/materiaalit66-2001.pdf> [viitattu 23.1.2018]. 140 s.

Belt, J., Lämsä, V. P., Savolainen, M. & Ehrola E. 2002. Tierakaenteen vaurioituminen ja tiestön kunto, Tiehallinnon selvityksiä 15/2002 [verkkodokumentti]. Helsinki: Tiehallinto, Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/selv15_02.pdf [viitattu 20.1.2018] 72 s.

EASA 2017. Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014) [verkkodokumentti] European Aviation Safety Agency, Saatavissa: <https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/Easy%20Access%20Rules%20for%20Aerodromes.pdf> [viitattu 15.12.2017]. 556 s.

Ehrola E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki: Rakennustieto 365 s. ISBN: 951-682-338-6

FAA 2009. Advisory Circular 150/5320-6E, Airport Pavement Design and Evaluation [verkkodokumentti], U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration Saatavissa: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150_5320_6e.pdf [viittaus 7.11.2017]. 116 s.

FAA 2016. Advisory Circular 150/5320-6F, Airport Pavement Design and Evaluation [verkkodokumentti], U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration Saatavissa: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150-5320-6F.pdf [viitattu 12.11.2017].

Federal Highway Administration 2016. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Coal fly ash [verkkodokumentti]. Washington:

Federal Highway Administration Saatavissa:
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/cfa55.cfm>
 [viitattu 11.12.2017].

Finnsementti 2018. Tuotteet, Seosaineet, Masuunikuonajauhe KJ400 [verkkodokumentti]. Espoo: Finnsementti Oy Saatavissa:
<http://www.finnsementti.fi/tuotteet/seosaineet-ja-silikajauheet/masuunikuonajauhe-kj400> [viitattu 14.1.2018].

Harju, I. 2017. Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa. Oulu: I. Harju, 128 s.

Huttunen 2017. Diplomityön lähtöaineistoa [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Antti Laurila. Lähetetty 15.11.2017 klo. 9.01 (GMT +0200)

ICAO 2013. Annex 14 to the Conventions on International Civil Aviation, Volume I: Aerodrome Design and Operation. Sixth edition. [verkkodokumentti] Montreal: International Civil Aviation Organization, Saatavissa:
<http://cockpitdata.com/Software/ICAO%20Annex%202014%20Volume%201>. 336 s. ISBN 978-92-9249-281-6

ICAO 1983. Aerodrome Design Manual Part 3, Pavements, Second Edition (Doc 9157-AN/901) [verkkodokumentti]. International Civil Aviation Organization, Saatavissa:
https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/de/dokumente/Fachleute/Flugplaetze/ICAO/icao_doc_9157_aerodromedesignmanual-part3.pdf.download.pdf/icao_doc_9157_aerodromedesignmanual-part3.pdf aerodrome design manual part 3

InfraRYL 2017a. 2017/1 Tekniset vaatimukset, Päälly- ja pintarakenteet, Suodatinrakenteet, Suodatinkerrokset [verkkodokumentti] Helsinki: Rakennustieto, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/infraryl/extra/yleista.html.stx> [viitattu 14.2.2018].

InfraRYL 2017b. Julkaisu 2017/1, liite T3, Katuluokat [verkkodokumentti] Helsinki: Rakennustieto, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/infraryl/extra/yleista.html.stx> [viitattu 7.3.2018].

InfraRYL 2017c. 2017/1 Katurakenteen toimivuusvaatimukset, Kantavuus, katurakenne [verkkodokumentti] Helsinki: Rakennustieto, Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/infraryl/extra/yleista.html.stx> [viitattu 7.3.2018].

Inkeröinen J. & Alasaarela E. (toim.). 2010. Uusiomateriaalien käyttö maarakentamisessa, Tuloksia UUMA -ohjelmasta 2006-2010 [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/41387> [viittaus 7.12.2017] 94 s.

International Airport Review 2017. Articles, Airfield pavement and the A380 [verkkodokumentti]. Russell publishing, Saatavissa: <https://www.internationalairportreview.com/article/34685/airfield-pavements-a380/> [viitattu 18.12.2017]

Kasari T. & Kulman M. 2016. Rakennettavuusselostus. Tampere: A-insinöörit Suunnittelu Oy. 3 s.

Kazda A. & Caves R. E. 2015. Airport design and operation, Third edition. Bingley: Emerald, ISBN: 978-1-78441-870-0

Kermode A. C. 2006. Mechanics of flight, 11th edition. [verkkodokumentti] Harlow: Pearson Education, Saatavissa: <http://soaneemrana.org/onewebmedia/MECHANICS%20OF%20FLIGHT%20BY%20A.C%20KERMODE.pdf>. ISBN -13 978-1-4058 2359-3. 500 s.

Koivulahti M. 2017a. Projektin aloituskokous 18.8.2017

Koivulahti M. 2017b. Projektikokous 2.10.2017

Korhonen K-H., Hartikainen J., Hiltunen R., Jääskeläinen H. & Kleemola J. (toim.) 1985. RIL 157-1 Geomekaniikka 1. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto ry. ISBN 951-758-086-X. 479 s.

Lahtinen P. 2010. Tuhkatie kestää roudan runtelut, Yle Keski-Suomi 8.10.2010 Outi Parikka [verkkodokumentti]. YLE, Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-5646307> [viitattu 7.12.2017]

Lentopaikat.fi 2017. Lentopaikat [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://lentopaikat.fi/> [viitattu 26.1.2017]

Liikennevirasto 2010, Lentokoneiden varalaskupaikat [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto, Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2010-18_lentokoneiden_varalaskupaikat.pdf, 38 s. ISBN 978-952-255-659-4.

Lätti E. 2015. Vaihtoehtoisten maarakennusmateriaalien mekaaniset ominaisuudet. [verkkodokumentti] Tampere: E. Lätti, Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23602/latti.pdf;sequence=1>. 132 s.

McLaughlin A. L., 1984. The Performance of Civil Airport Pavements with Lime-Cement-Flyash Base Course [verkkodokumentti]. Washington: Federal Aviation Administration, Saatavissa: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a144614.pdf>, 17 s.

Mänttä-Seura 2017. Sassin lentopaikka ja vanha tuhkanlajitysalue [verkkodokumentti] Mänttä: Mänttä-Seura Ry, Saatavissa: <http://sassiin.fi/sassiin.php?k=4> [viitattu 29.11.2017]

Obeidat S. 2006. Home, ContentPavement Operations. [verkkodokumentti]. Civil Aviation Regulatory Commission, Saatavissa: <https://www.carc.gov.jo/en/content/246-pavement-operations> [viitattu 4.12.2017]

Oulun yliopisto 2016. 488154S Tien suunnittelu ja rakentaminen, luentokalvot [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun yliopisto.

Pirkanmaan maakuntavaltuusto 2017. Pirkanmaan maakuntakaava 2040, Pirkanmaan 2. maakuntakaava. [verkkodokumentti] Tampere: Pirkanmaan maakuntavaltuusto, Saatavissa: http://maakuntakaava2040.pirkanmaa.fi/sites/default/files/Maakuntakaava_2040_MKV_27032017_.pdf

Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P. & Forsman J. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja [verkkodokumentti].

Luopioinen: Ramboll. Saatavissa:
https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf [viittaus 17.10.2017]. 65 s.

Ramboll 2014. Labratestien kuvaukset, Luopioinen: Ramboll Finland Oy. 6 s.

Holmberg, K., Viitala, M., Kuivas, J. & Linna-Varis, H., 2006. Ilmaliikenteen infrastruktuuri. Teoksessa: Ojala, K. (toim.) RIL 165-2-2006 Liikenne ja väylät II. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto ry, S. 549-591. ISBN 951-758-464-4

SGY 1985. GLO-85 Geotekniset laboratorio-ohjeet. 1, Luokituskokeet, Suomen geoteknillinen yhdistys ry ja Rakentajain Kustannus Oy, 107 s. ISBN 951-676-308-1

Shafabakhsh G. A. & Kashi E. 2015. Effect of Aircraft Wheel Load and Configuration on Runway Damages. Periodic Polytechnica Civil Engineering, 59 (1) S. 85-94 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://pp.bme.hu/ci/article/view/2103> [viitattu 18.12.2017]

Silpola H. 2017. Lähtötietoa lentopaikkoja koskevaan diplomityöhön [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Antti Laurila. Lähetetty 21.11.2017 klo. 12.50 (GMT +0200)

Tahkokorpi 2017. YLE -uutiset 15.11.2017, Ensimmäinen lentokone laskeutuu pian Pyhtäälle - kiitotie on viimeistelyä vaille valmis. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-9930357>. [viitattu 26.1.2018]

Tarkkio, T. 2014. Lentotuhkan pitkäaikaistoimivuus teiden ja kenttien päällysrakenteissa [verkkodokumentti]. Tampere: T. Tarkkio, Saatavissa: <http://docplayer.fi/773644-Timo-tarkkio-lentotuhkan-pitkaaikaistoimivuus-teiden-ja-kenttien-paallysrakenteissa.html>, 138 s.

Tiehallinto 2004. Tierakenteen suunnittelu [verkkodokumentti]. Helsinki: Tiehallinto Saatavissa: <https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf/2100029-v-04tierakenteensuunn.pdf>, 69 s. ISBN 951-803-402-8.

Tiehallinto 2005. Tietoa tiesuunnitteluun nro 71D, Tien päällysrakenteen mitoituksessa käytettävät moduulit ja kestävyysmallit [verkkodokumentti]. Tiehallinto, tie- ja geotekniikka. Saatavissa: <https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/tts71d.pdf>

Trafi 2013. Määräys AGA M1-1 [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikenteen turvallisuusvirasto, Saatavissa: https://www.trafi.fi/ilmailu/saadokset/ilmailumaarayskokoelma/aga_lentopaikat_ja_maalaitteet, 23 s.

Trafi 2018. Määräys GEN M1-16 [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikenteen turvallisuusvirasto, Saatavissa: https://www.trafi.fi/filebank/a/1519041582/a0a7fcc32b5e2f1324515dd456adc4c0/29533-GEN_M1-16_2018.pdf, 2 s.

Tuhkaohjekortin käsikirjoitus 2017, Tuhkien käyttö maarakentamisessa – Metsä- ja energiateollisuuden tuhkamateriaalit [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5fIPeDhrH/NjY0Vs4V1/Tuhkaohjekortti_RTS_17-56.pdf [viittaus 10.1.2018]

VNa 843/2017. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>

Windcraft 2015. Mänttä-Sassin äänitasomallinnus [verkkodokumentti] Lahti: Windcraft Oy, Saatavissa: http://www.manttavilppula.fi/site/assets/files/8310/liite7_sassi_nitasomallinnus_v05.pdf, 39 s.

Yadav D. K. & Shukla S. K. 2012. Analytical Model for Deflection of the Runway Pavement at touchdown Point Caused by an Aircraft during Landing. International Journal of Geomechanics, 12 (2) S. 113-118

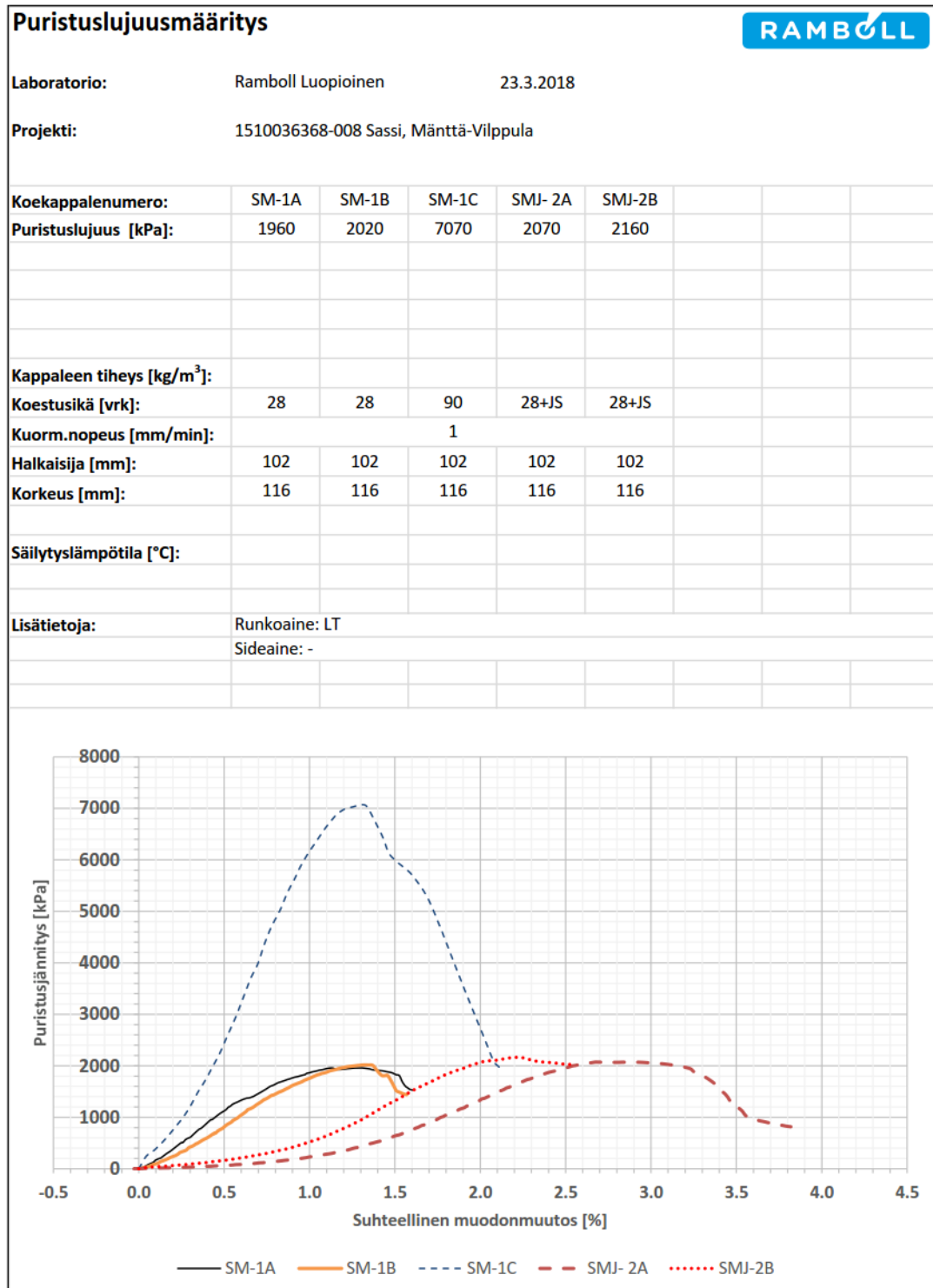
Yadav D. K. & Nikraz H. 2013. Technical evaluation of a runway using the deflection method. Aviation, 17 (4), S. 150-160

LIITTEET

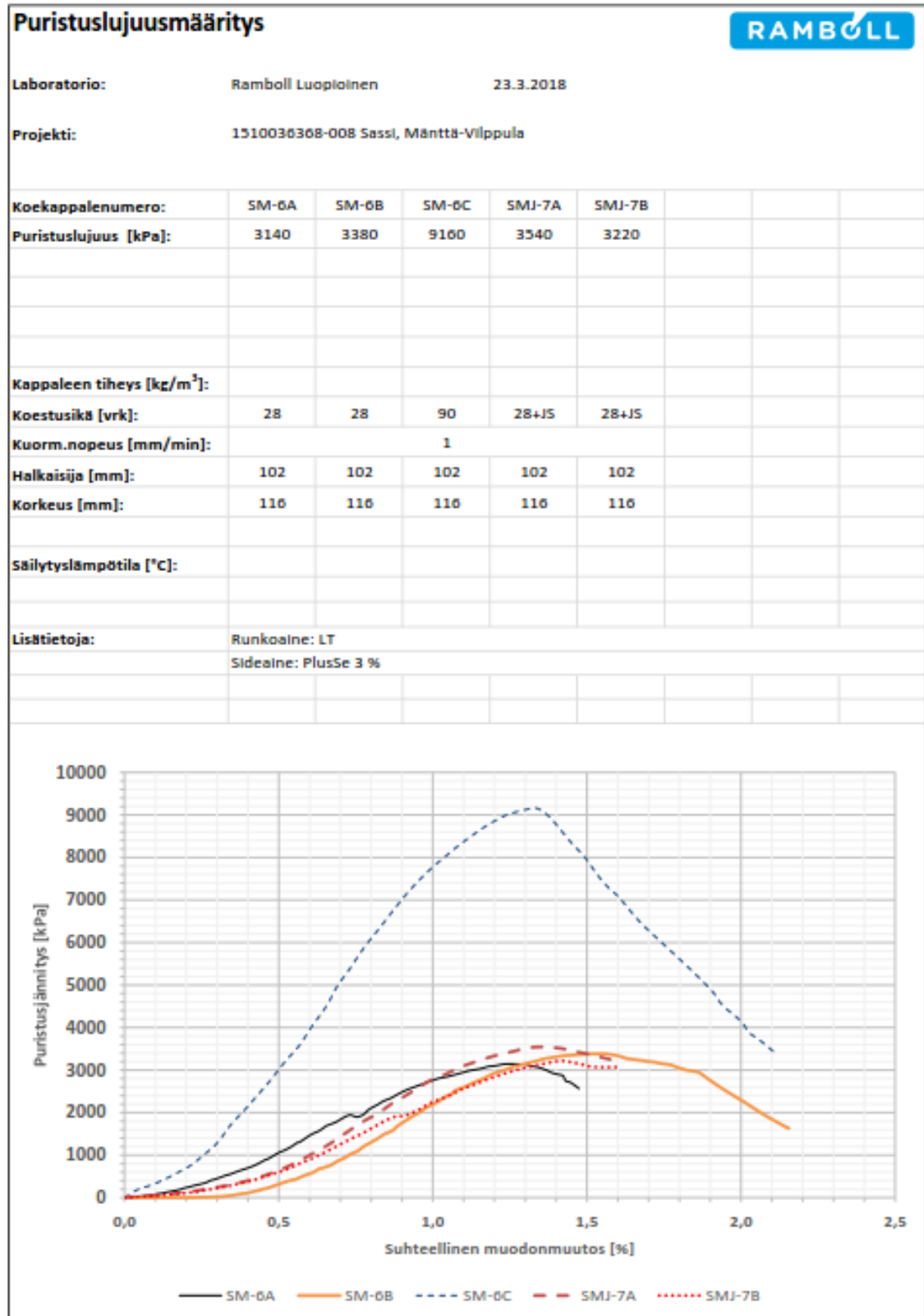
LIITE 1.

(1/10)

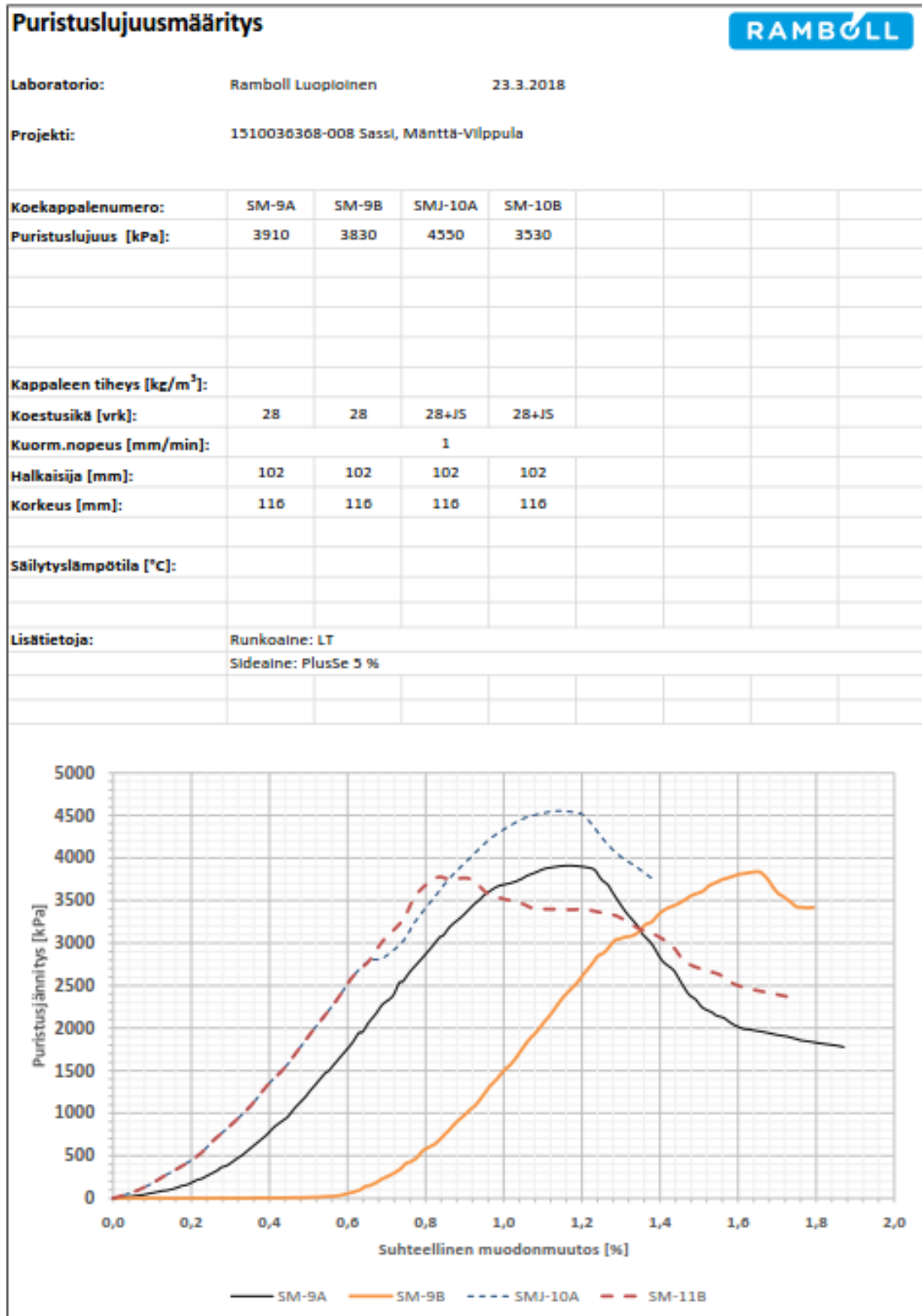
Taulukko 1. Puristuslujuustestien tulostuslomake ilman sideaineita lujittuneille massiivilentotuhkakoeleille.



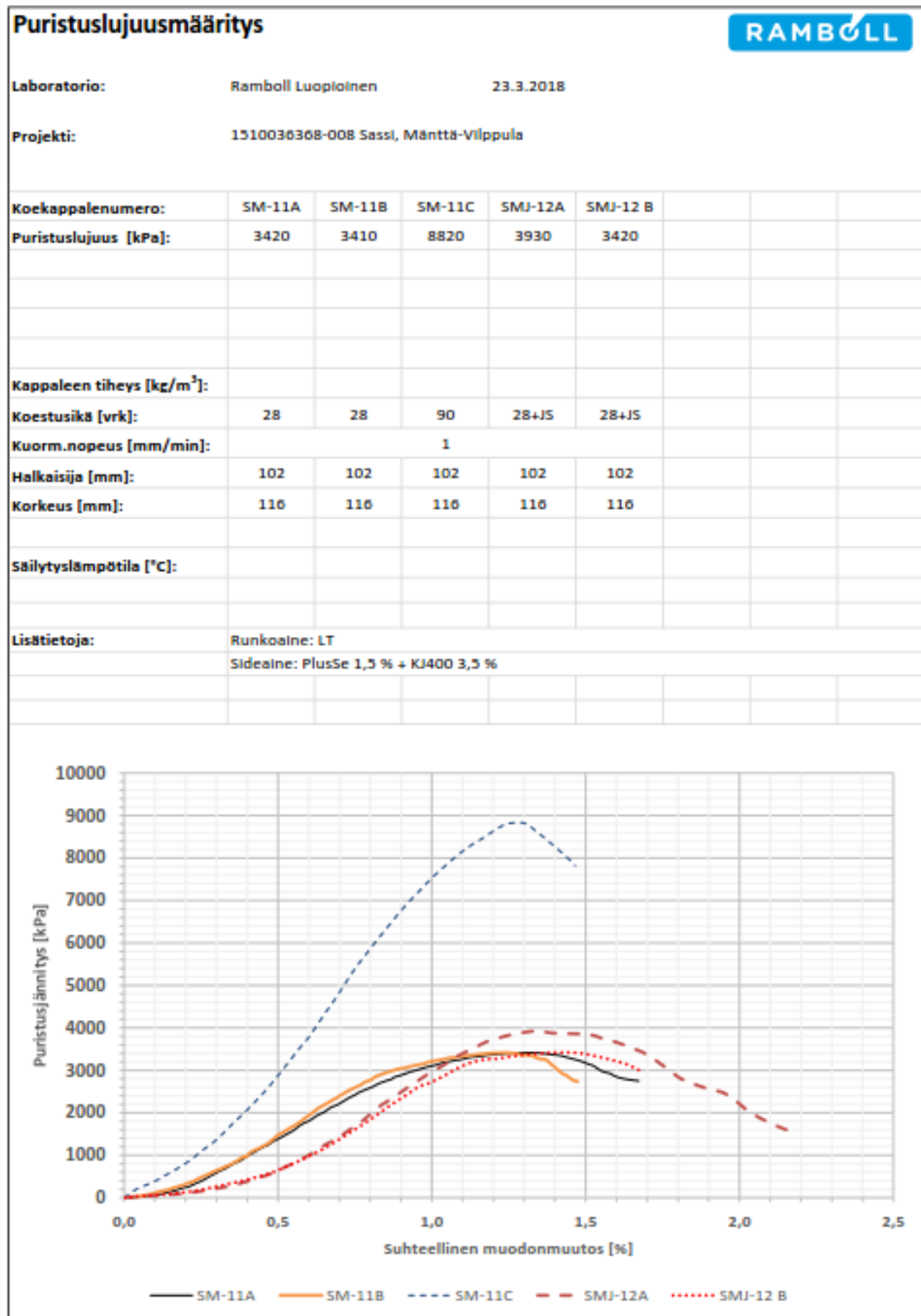
Taulukko 2. Puristuslujuustestien tulostuslomake Plussementti (3 %) -sideaineella lujitetuille massiivilentotuhkakoekappaleille.



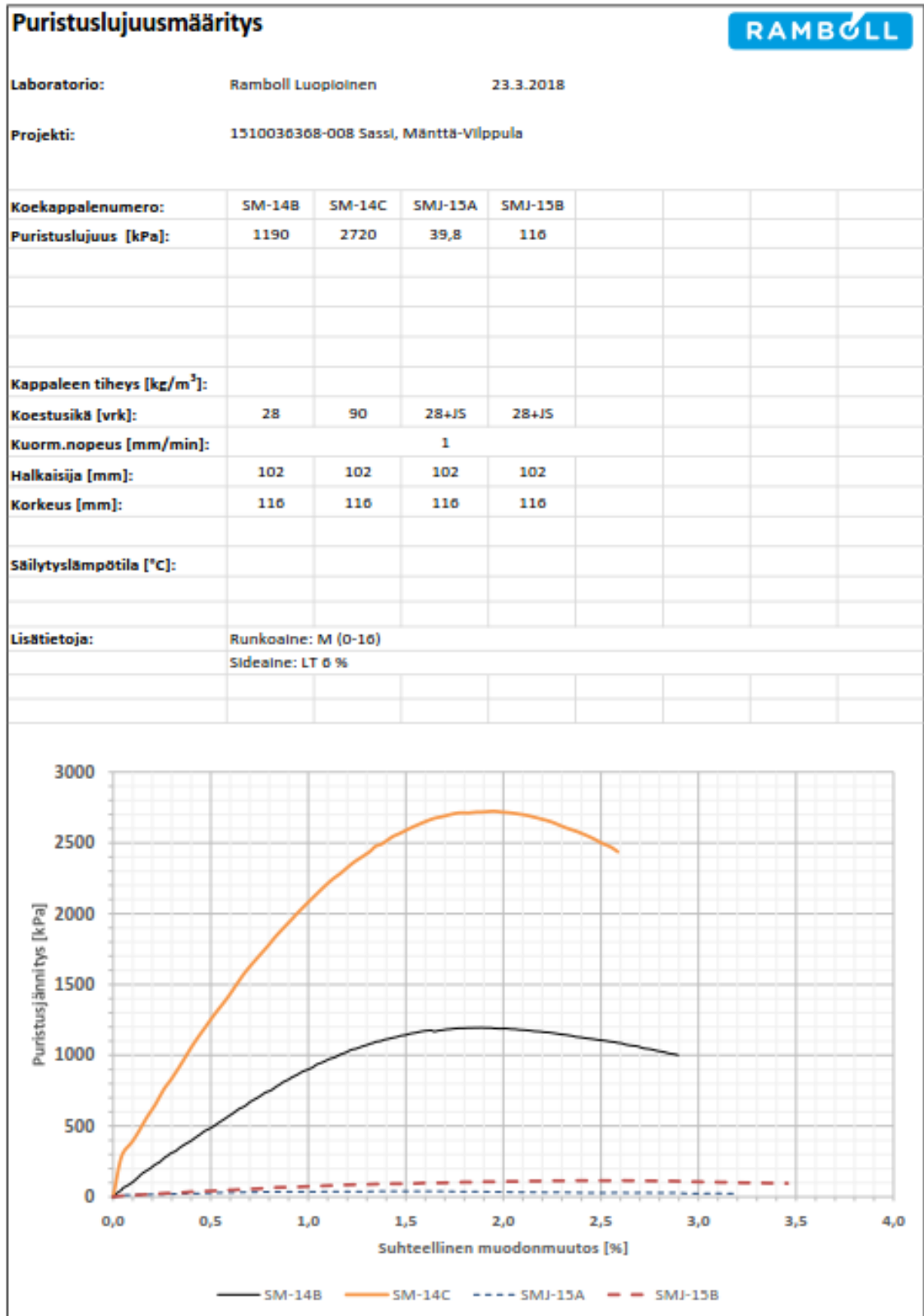
Taulukko 3. Puristuslujuustestien tulostuslomake Plussementti (5 %) -sideaineella lujitetuille massiivilentotuhkakoekappaleille.



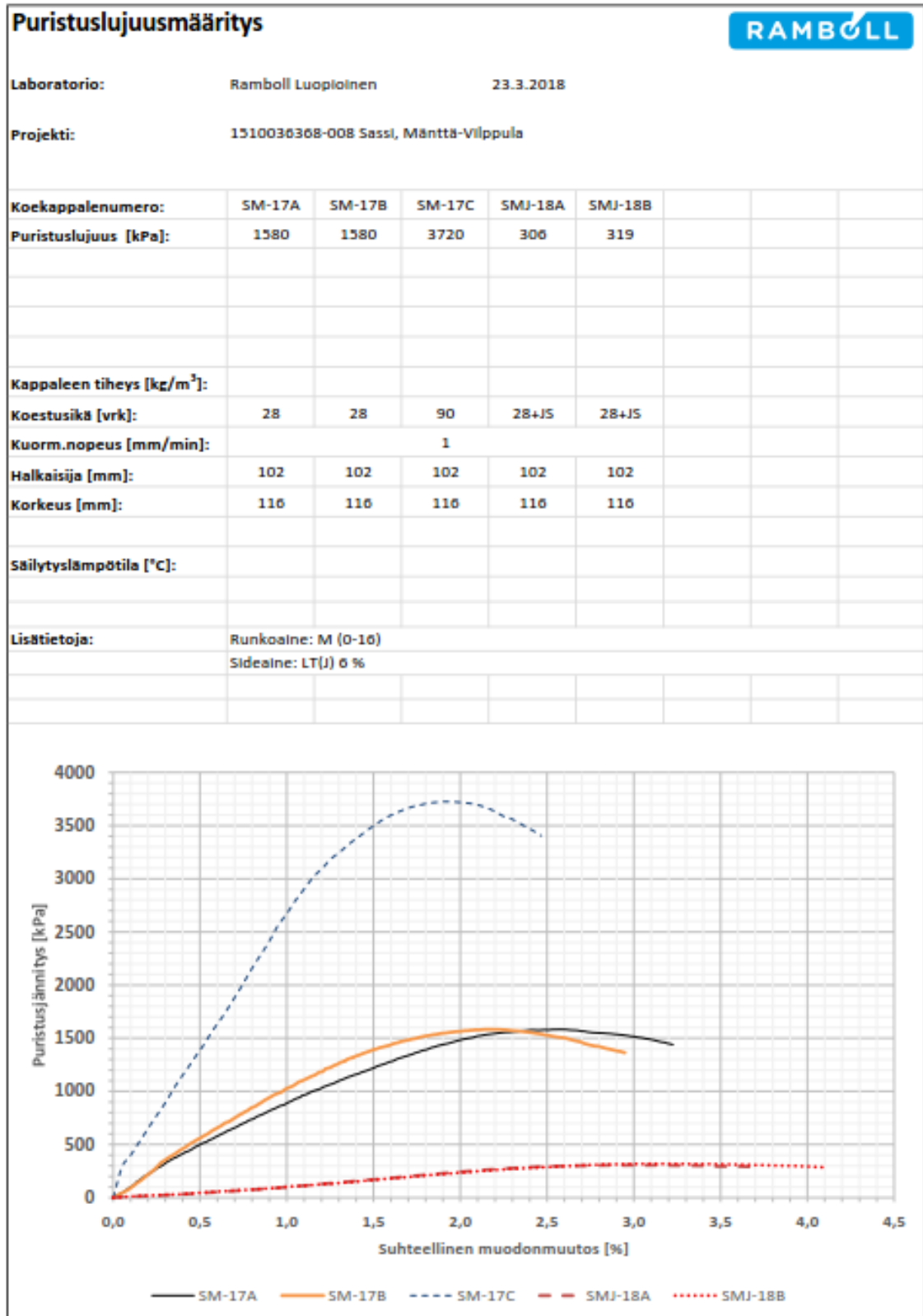
Taulukko 4. Puristuslujuustestien tulostuslomake Plussementti ja kuonajauhe (1,5 + 3,5 %) -sideaineilla lujitetuille massiivilentotuhkakoekappaleille.



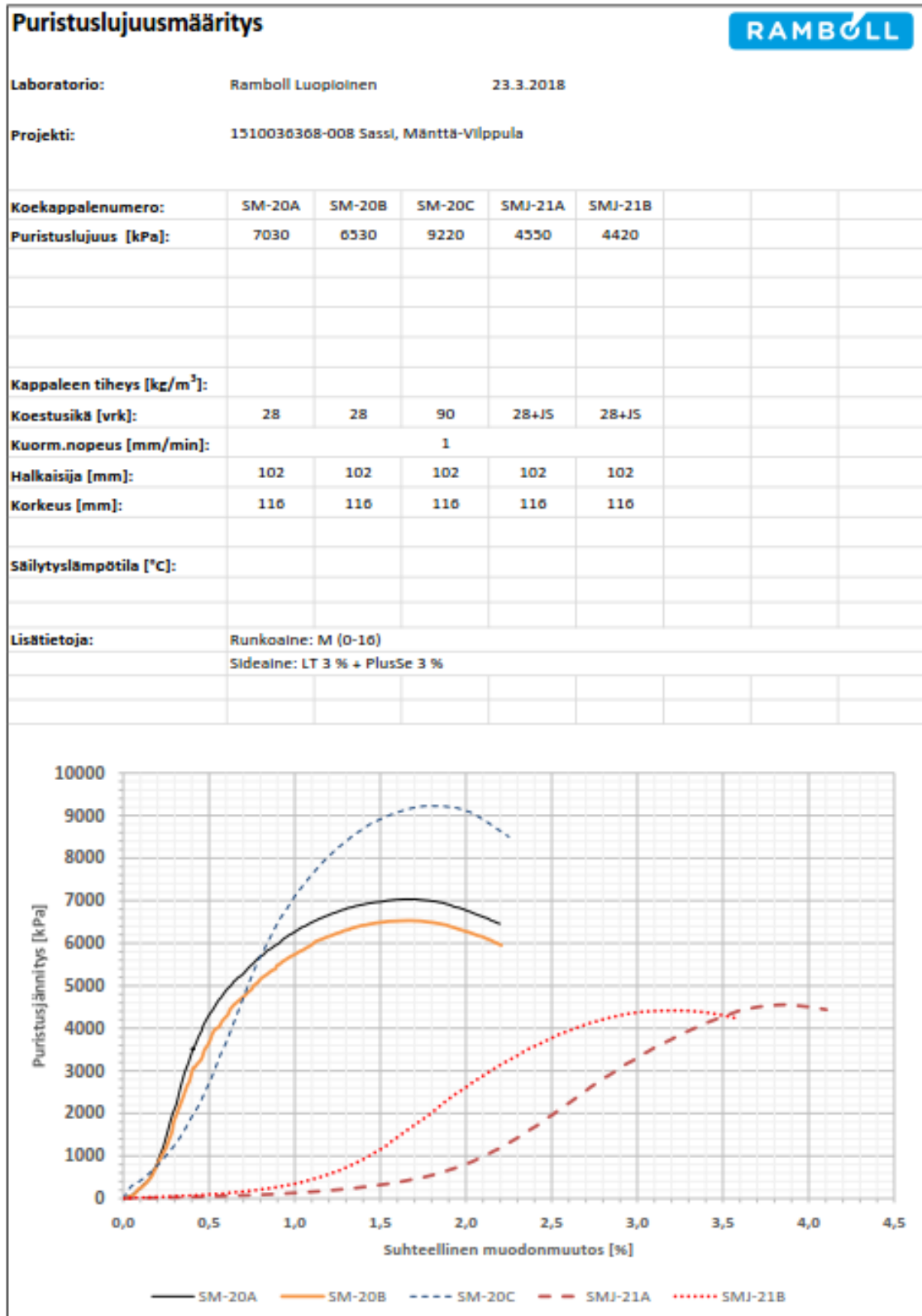
Taulukko 5. Puristuslujuustestien tulostuslomake lentotuhkalla stabiloiduille murskekoekappaleille.



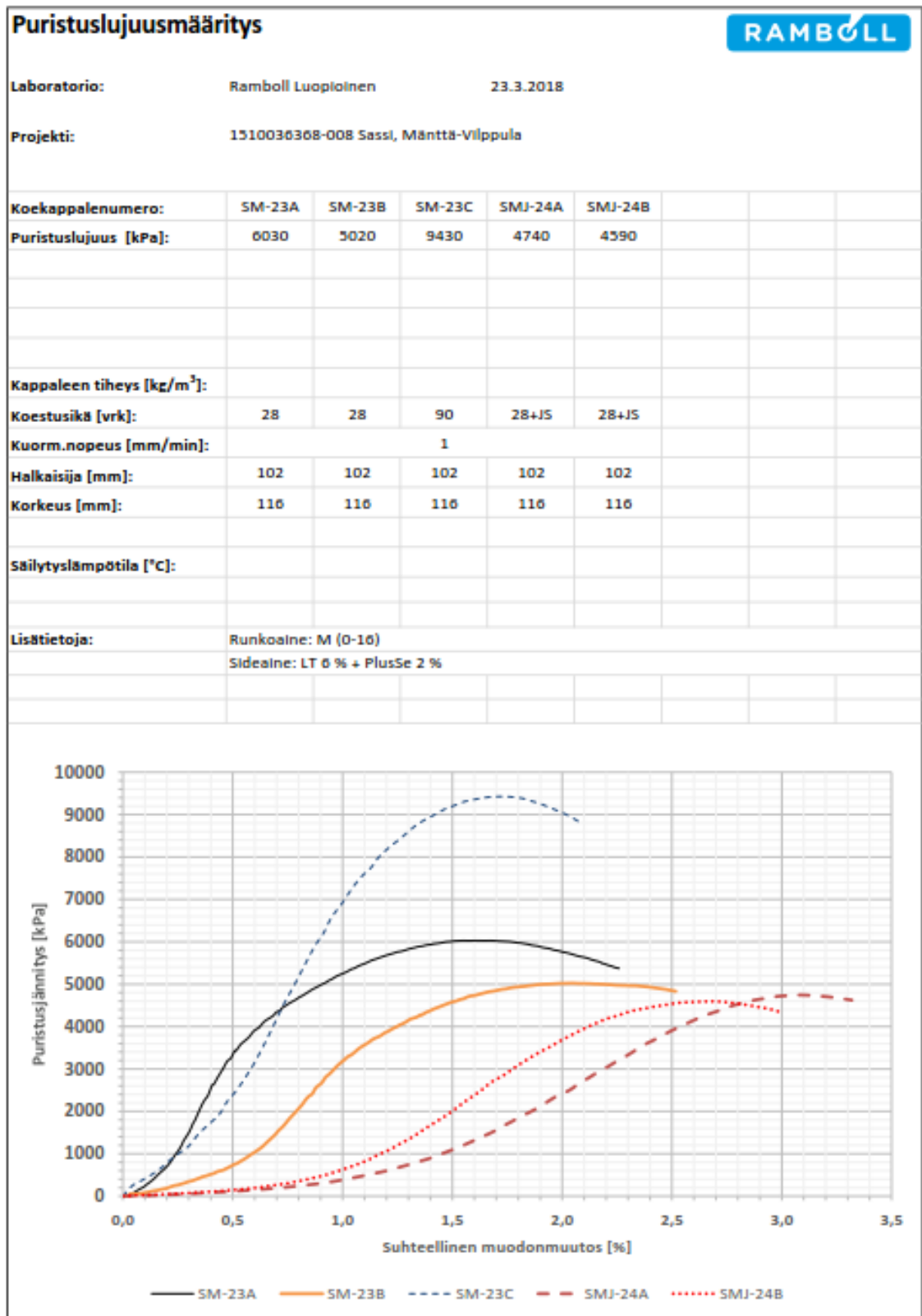
Taulukko 6. Puristuslujuustestien tulostuslomake jauhetulla lentotuhkalla stabiloiduille murskekoekappaleille.



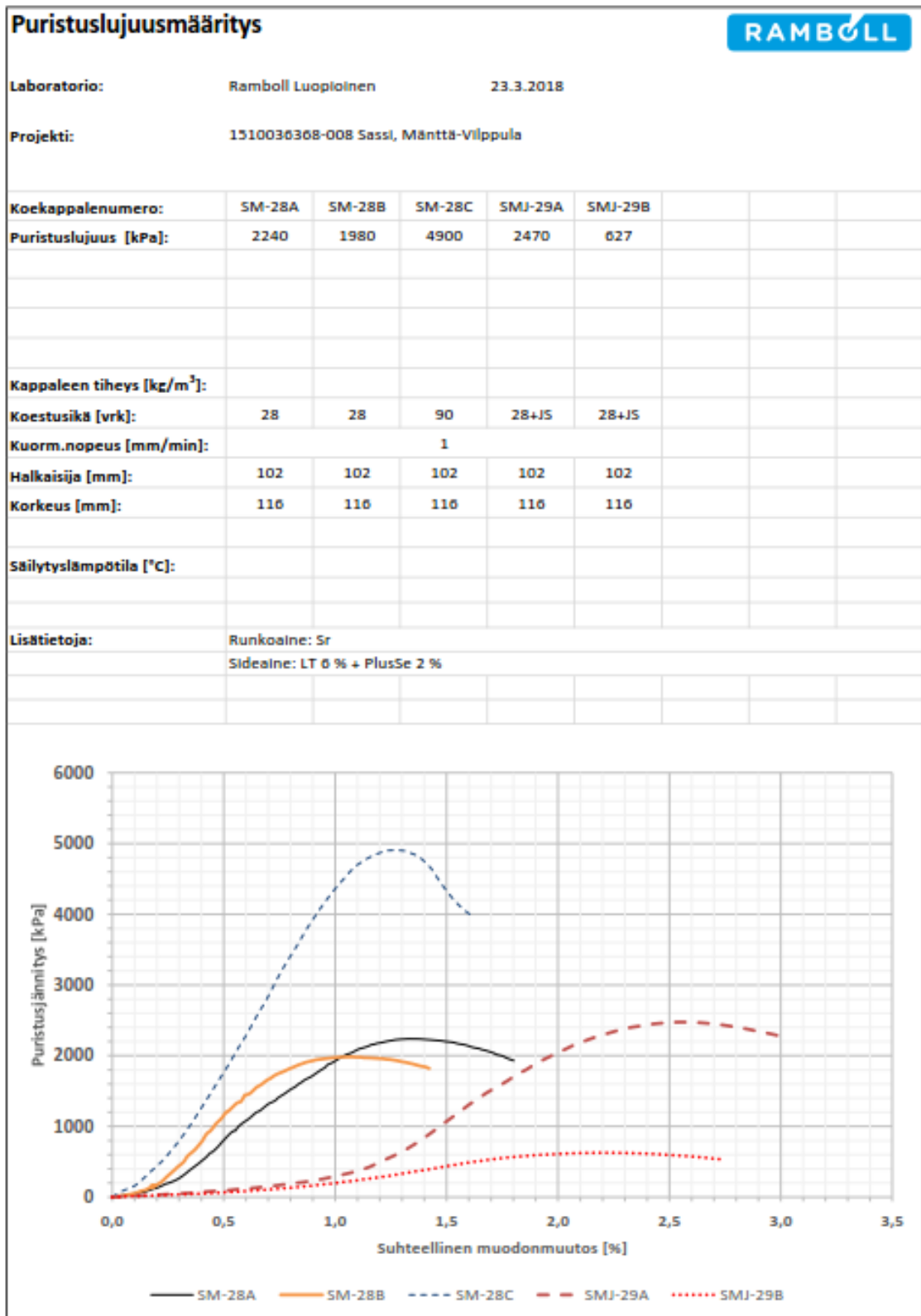
Taulukko 7. Puristuslujuustestien tulostuslomake lentotuhkalla (3 %) ja Plussementillä (3 %) stabiloiduille murskekoekappaleille.



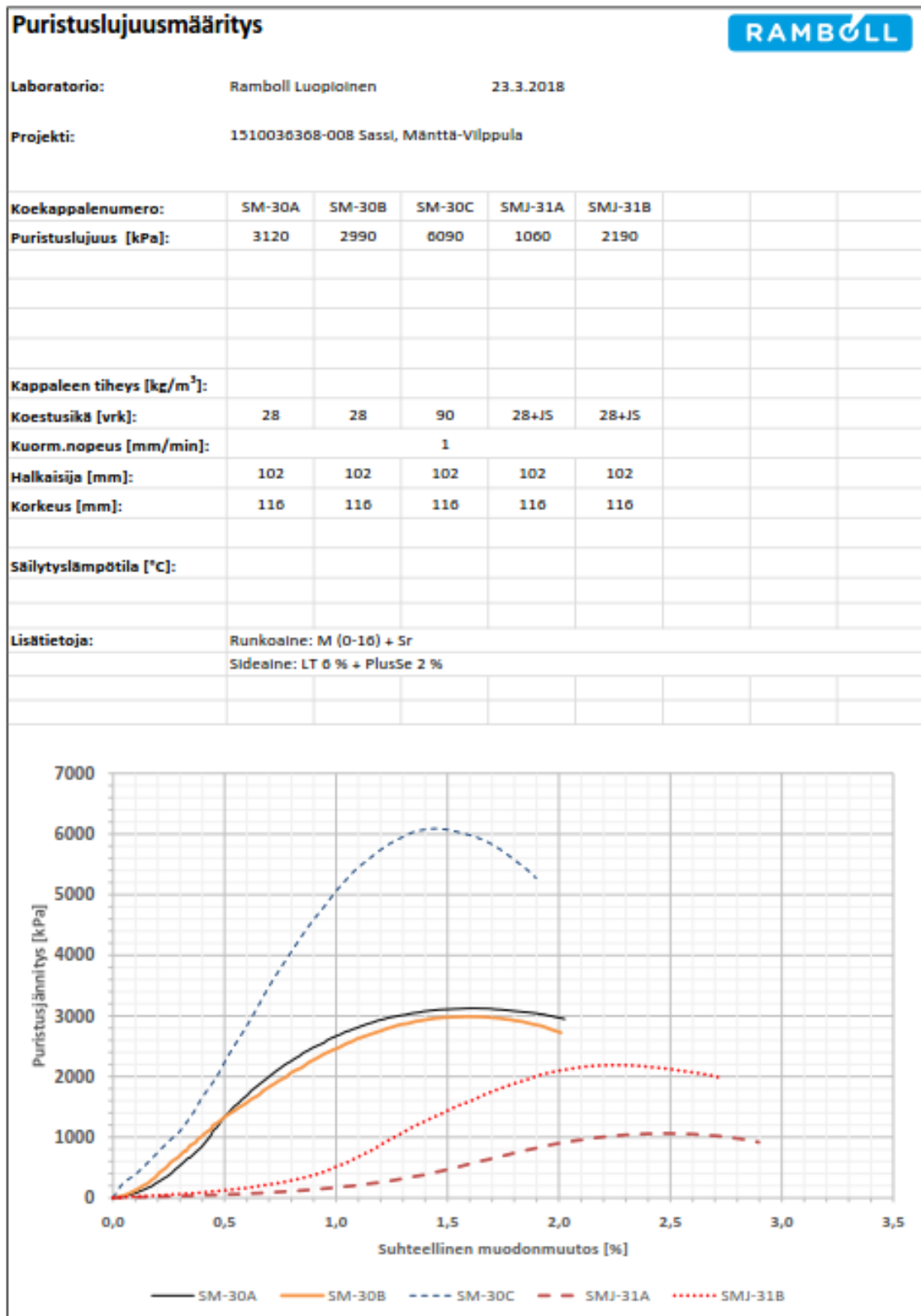
Taulukko 8. Puristuslujuustestien tulostuslomake lentotuhkalla (6 %) ja Plussementillä (2 %) stabiloiduille murskekoekappaleille.



Taulukko 9. Puristuslujuustestien tulostuslomake lentotuhkalla (6 %) ja Plussementillä (2 %) stabiloiduille sorakoeappaleille (kiitotien nykyisen sora).



Taulukko 10. Puristuslujuustestien tulostuslomake lentotuhkalla (6 %) ja Plussementillä (2 %) stabiloiduille murske+sorakoekappaleille (kiitotien nykyisen sora).



Kiito- ja rullaustierakenteiden A-E kantavuus ja routamitoitustaulukot, josta selviää laskennallinen routanousu (RN_{lask}) ja kunkin kerroksen yläpinnan kantavuus (E_Y) kerrospaksuuksilla (h) ja materiaalin E-moduuliarvoilla (E).

Kantavuus-routanousu



Kohde **Sassin lentopaikka, kiitotie**
 Projekti **D-työ Rakenne A** 27.3.2018 15:45
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta
1	20	0,40	50	120	37,1	Hk	a_i 1,0
2	37,1	0,35	50	222	45,3	LT2	1,7
3	45,3	0,25	200	272	94,9	KaM	0,9
4	94,9	0,25	200	569	141,1	KaM	0,9
5	141,1	0,20	280	846	192,2	KaM	0,9
6	192,2	0,05	2500	1153	234	AB	1,0

Yhteensä = 1,50 m

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S \cdot a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne}) \cdot t$$

S on siirtymäkiilasyvyys 1,60 m

Ri on routimattoman kerroksen p 1,50 m

Pohjamaan turpoama t 0,16

RN_{lask} -12 mm

Kantavuus-routanousu



Kohde **Sassin lentopaikka, kiitotie**
 Projekti **D-työ Rakenne B** 27.3.2018 15:52
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta
1	20	0,40	50	120	37,1	Hk	a_i 1,0
2	37,1	0,25	150	222	74,7	LT2	1,7
3	74,7	0,20	150	448	102,3	LT2	1,7
4	102,3	0,25	200	614	146,5	KaM	0,9
5	146,5	0,20	280	879	196,5	KaM	0,9
6	196,5	0,05	2500	1179	239	AB	1,0

Yhteensä = 1,35 m

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S \cdot a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne}) \cdot t$$

S on siirtymäkiilasyvyys 1,60 m

Ri on routimattoman kerroksen p 1,35 m

Pohjamaan turpoama t 0,16

RN_{lask} -3 mm

Kantavuus-routanousu



Kohde **Sassin lentopaikka, kiitotie**
 Projekti **D-työ Rakenne C** 27.3.2018 15:46
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta	
1	20	0,20	50	120	30,0	Hk	a_i 1,0	
2	30,0	0,20	50	180	37,9	Hk	1,0	
3	37,9	0,30	150	227	82,2	LT2	1,7	
4	82,2	0,25	150	493	113,7	LT2	1,7	
5	113,7	0,30	280	682	192,9	KaM	0,9	
6	192,9	0,05	2500	1158	235	AB	1,0	
Yhteensä =		1,30	m					

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne}) \cdot t$$

S on siirtymäkiilasyvyys m
 Ri on routimattoman kerroksen p m
 Pohjamaan turpoama t

RNlask -9 mm

Kantavuus-routanousu



Kohde **Sassin lentopaikka, kiitotie**
 Projekti **D-työ Rakenne D** 27.3.2018 15:54
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta	
1	20	0,20	50	120	30,0	Hk	a_i 1,0	
2	30,0	0,20	50	180	37,9	Hk	1,0	
3	37,9	0,30	380	227	126,0	LT1	1,7	
4	126,0	0,30	380	756	238,0	LT1	1,7	
5	238,0	0,20	280	1428	257,2	KaM	0,9	
6	257,2	0,05	2500	1543	304	AB	1,0	
Yhteensä =		1,25	m					

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne}) \cdot t$$

S on siirtymäkiilasyvyys m
 Ri on routimattoman kerroksen p m
 Pohjamaan turpoama t

RNlask -8 mm

Kantavuus-routanousu



Kohde **Sassin lentopaikka, kiitotie**
 Projekti **D-työ Rakenne E** 28.3.2018 10:58
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta
1	20	0,40	50	120	37,1	Hk	a_i 1,0
2	37,1	0,25	50	222	43,8	LT2	1,7
3	43,8	0,25	50	263	47,2	LT2	1,7
4	47,2	0,20	200	283	87,0	KaM	0,9
5	87,0	0,15	1500	522	212,1	KaM(stab)	0,9
6	212,1	0,05	2500	1273	256	AB	1,0

Yhteensä = 1,30 m

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne}) \cdot t$$

S on siirtymäkiilasyvyys 1,60 m

Ri on routimattoman kerroksen p 1,30 m

Pohjamaan turpoama t 0,16

RNlask -2 mm

Kantavuus-routanousu

RAMBOLL

Kohde **Sassin lentopaikka, rullaustie**
 Projekti **D-työ Rakenne A** 28.3.2018 9:32
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta
1	20	0,40	50	120	37,1	Hk	a_i 1,0
2	37,1	0,25	50	222	43,8	LT2	1,7
3	43,8	0,25	200	263	93,1	KaM	0,9
4	93,1	0,25	200	559	139,7	KaM	0,9
5	139,7	0,20	280	838	191,1	KaM	0,9
6	191,1	0,05	2500	1147	233	AB	1,0

Yhteensä = 1,40 m

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 \text{ jne}) * t$$

S on siirtymäkiilasyvyys 1,60 m

Ri on routimattoman kerroksen p 1,40 m

Pohjamaan turpoama t 0,16

RN_{lask} 15 mm

Kantavuus-routanousu

RAMBOLL

Kohde **Sassin lentopaikka, rullaustie**
 Projekti **D-työ Rakenne B** 28.3.2018 9:54
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta
1	20	0,40	50	120	37,1	Hk	a_i 1,0
2	37,1	0,20	150	222	67,1	LT2	1,7
3	67,1	0,20	150	403	96,1	LT2	1,7
4	96,1	0,25	200	576	142,0	KaM	0,9
5	142,0	0,20	280	852	192,9	KaM	0,9
6	192,9	0,05	2500	1158	235	AB	1,0

Yhteensä = 1,30 m

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 \text{ jne}) * t$$

S on siirtymäkiilasyvyys 1,60 m

Ri on routimattoman kerroksen p 1,30 m

Pohjamaan turpoama t 0,16

RN_{lask} 10 mm

Kantavuus-routanousu



Kohde **Sassin lentopaikka, rullaustie**
 Projekti **D-työ Rakenne C** 28.3.2018 10:04
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta
1	20	0,20	50	120	30,0	Hk	a_i 1,0
2	30,0	0,20	50	180	37,9	Hk	1,0
3	37,9	0,25	150	227	75,7	LT2	1,7
4	75,7	0,25	150	454	109,1	LT2	1,7
5	109,1	0,30	280	655	189,3	KaM	0,9
6	189,3	0,05	2500	1136	231	AB	1,0

Yhteensä = 1,25 m

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 \text{ jne}) * t$$

S on siirtymäkiilasyvyys 1,60 m

Ri on routimattoman kerroksen p 1,25 m

Pohjamaan turpoama t 0,16

RNlask 5 mm

Kantavuus-routanousu



Kohde **Sassin lentopaikka, rullaustie**
 Projekti **D-työ Rakenne D** 28.3.2018 10:22
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta
1	20	0,20	50	120	30,0	Hk	a_i 1,0
2	30,0	0,20	50	180	37,9	Hk	1,0
3	37,9	0,25	380	227	111,6	LT1	1,7
4	111,6	0,25	380	669	208,2	LT1	1,7
5	208,2	0,20	280	1249	239,3	KaM	0,9
6	239,3	0,05	2500	1436	285	AB	1,0

Yhteensä = 1,15 m

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 \text{ jne}) * t$$

S on siirtymäkiilasyvyys 1,60 m

Ri on routimattoman kerroksen p 1,15 m

Pohjamaan turpoama t 0,16

RNlask 19 mm

Kantavuus-routanousu



Kohde **Sassin lentopaikka, rullaustie**
 Projekti **D-työ Rakenne E** 28.3.2018 11:01
 Laskija **Antti Laurila**

Kerros	E_A MPa	h m	E MPa	E_{max} MPa	E_Y MPa	Selitys	Materiaalin vastaavuus eristävyyden kannalta a_i	
1	20	0,40	50	120	37,1	Hk	1,0	
2	37,1	0,20	50	222	42,7	LT2	1,7	
3	42,7	0,20	50	256	46,0	LT2	1,7	
4	46,0	0,20	200	276	85,6	KaM	0,9	
5	85,6	0,15	1500	514	209,8	KaM (stab.)	0,9	
6	209,8	0,05	2500	1259	253	AB	1,0	
Yhteensä =		1,20	m					

Routanousu lasketaan tuotevaatimusten mukaisesti kaavalla

$$RN_{lask} = (S - a_1 * R_1 - a_2 * R_2 \text{ jne}) * t$$

S on siirtymäkiilasyvyys 1,60 m

Ri on routimattoman kerroksen p 1,20 m

Pohjamaan turpoama t 0,16

RN_{lask} 25 mm

