

KYÖSTI LAUKKANEN
PEKKA HALONEN
ERKKO PYY

Asfalttimassan kestävyys jäätymis-sulamista sekä veden ja kuormien yhteisvaikutusta vastaan

ASFADUR-PROJEKTI - LOPPURAPORTTI



Kyösti Laukkanen, Pekka Halonen, Erkko Pyy

Asfalttimassan kestävyys jäätymis- sulamista sekä veden ja kuormien yhteisvaikutusta vastaan

ASFADUR-projekti – Loppuraportti

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2012

Liikennevirasto

Helsinki 2012

Kannen kuva: Kyösti Laukkanen

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-162-7

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Kyösti Laukkanen, Pekka Halonen, Erkki Pyy: Asfalttimassan kestävyys jäätymis-sulamista sekä veden ja kuormien yhteisvaikutusta vastaan. Asfadur-projekti, loppuraportti. Liikennevirasto, väylänpito-osasto. Helsinki 2012. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2012. 122 sivua ja 13 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-162-7.

Avainsanat: asfalttipäällyste, tyhjätila, halkaisuvetolujuus, jäätymis-sulamiskestävyys, vedenkestävyys, paineisku, kyllästysaste, kuormitus, reikiintyminen, purkautuma

Tiivistelmä

Asfadur-projektissa kehitettiin sekä asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyden että veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen testimenetelmiä.

Veden useat erilaiset vaikutukset asfalttinäytteiden testaustuloksiin ovat merkittäviä kaikissa testimenetelmissä, joissa tutkitaan laboratorioissa säärasitusten jälkeen märkien asfalttinäytteiden lujuutta tai kestävyyttä, verrataan niitä vertailunäytteiden vastaaviin tuloksiin ja tehdään päätelmiä asfaltin vedenkestävyydestä, jäätymis-sulamiskestävydestä, kemikaalienkestävyydestä ym. toiminnallisista ominaisuuksista.

Asfalttinäytteen vedellä kyllästysasteella oli Asfadur-projektin tulosten perusteella erittäin merkittävä vaikutus asfaltin halkaisuvetolujuuskokeen tulokseen. Kun asfalttikoeappaleen vedellä kyllästysaste oli 100 %, vesi täytti asfalttinäytteen koko huokostilan. Tällöin huokosvesi tuki näytettä halkaisuvetolujuuskokeen lyhytaikaisen kuormituksen aikana, koska vesi on kokoonpuristumatonta. On huomattava, että halkaisu-vetolujuuskokeessa veden täyttämisen huokostilan hetkellinen, lujuustulosta lisäävä vaikutus antaa virheellistä tietoa asfaltin lujuudesta käyttötilassa, jossa vedellä kyllästysaste vaihtelee sääolosuhteiden mukaan eikä sillä ole mitään tekemistä sen vaikutuksen kanssa, jolla vesisäilytys voi mahdollisesti heikentää bitumin ja kiviaineksen välistä tartuntaa sekä asfaltin halkaisuvetolujuutta.

Asfalttimassan vedenkestävyyden määrittämiseen käytettävä eurooppalainen standardi SFS-EN 12697-12, menetelmä B sisältää systemaattisen virheen eikä anna siksi luotettavaa tietoa vedenkestävyydestä. Systemaattinen virhe johtuu vedenkestävyyuskokeen vesisäilytyksessä olleiden näytteiden ja vertailunäytteiden erilaisista vedellä kyllästysasteista halkaisuvetolujuuskokeen aikana. Vedenkestävyyden menetelmästandardin virhe tulisi korjata siten, että molempien näytesarjojen kaikkia näytteitä käsitellään vesisäilytyksen jälkeen siten, että niillä on yhtä suuri vedellä kyllästysaste halkaisuvetolujuuskokeessa. Vedellä kyllästysaste ei kuitenkaan saa olla lähellä 100 % tasoa. Samalla kun menetelmän sisältöä muutetaan, tulee tarkistaa myös asfalttinormeissa olevat asfalttimassan vedenkestävyyden vaatimusarvot.

Myös VTT:n kehittämässä dynaamisessa, nopeassa, sykliässä paineiskukokeessa asfalttinäyte, jonka huokostila oli täynnä vettä, kesti enemmän lyhytaikaisia kuormituksia kuin samanlainen kuiva näyte. Tulos oli samanlainen kaikissa paineiskukokeissa lämpötiloissa (+5...+20 °C) ja asfaltin pintapaineilla (1000...7000 kPa).

Projektin tulosten perusteella laadittiin asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyystestin menetelmäkuvaus (PANK 4306). Menetelmä sisältää 10 jäätymis-sulamissykliä ja niiden jälkeen näytteille tehtävät halkaisuvetolujuuskokeet. Halkaisuvetolujuuskoe tehdään sekä tutkimusnäytteille että vertailunäytteille samassa vedellä kyllästysasteessa, joka ei saa olla lähellä 100 % tasoa.

Kyösti Laukkanen, Pekka Halonen, Erkki Pyy: Asfaltmassans bestånd mot frys-tö-cykler samt mot samverkan av vatten och belastningar. Asfadur-projekt, slutrapport. Trafikverket, Trafikledshållning. Helsingfors 2012. Trafikverkets undersökningar och utredningar 20/2012. 122 sidor och 13 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-162-7.

Nyckelord: asfaltbeläggning, hålrum, indirekt draghållfasthet, frys-tö-beständighet, vattenkänslighet, tryckstöt, mätnadsgrad, belastning, hålskada, asfaltlossning

Sammanfattning

I projektet "Asfadur" utvecklades testmetoder för asfaltmassans beständighet mot frys-tö-cykler och mot samverkan av vatten och belastning. Jämförelsemetoden var vattenkänslighetsprovning enligt standarden EN 12697-12, metod B. Forskningen var inriktad mot stenrika och täta asfaltbetongmassor.

Vattnets ofta olika, samtidiga, alternativa och olikriktade inverkan på testresultat för asfaltprovstycken är betydelsefull för alla provningsmetoder, med vilka man undersöker hållfasthet eller beständighet hos våta asfaltprovstycken efter klimatpåfrestning i laboratoriet, jämför dem med motsvarande resultat för torra referensprovstycken, och gör slutledningar om asfaltens vatten-, frys-tö-, deformationsbeständighet eller andra funktionella egenskaper på basis av dessa resultat.

Asfaltprovstyckets vattenmätnadsgrad har enligt Asfadur-projektets resultat mycket stor inverkan på asfaltens indirekta draghållfasthet. När asfaltprovstyckets vattenmätnadsgrad var 100 % fyllde vattnet provstyckets hela hålrum och det inkompressibla vattnet stöttade provstycket vid den kortvariga belastningen under indirekta draghållfasthetsprovningen. Den tillfälliga förbättringen av indirekta hållfasthetsresultatet på grund av att vattnet fyller ut hela hålrummet har inget samband med de effekter, genom vilka lagring i vatten möjligen kan försvaga vidhäftningen mellan bitumenet och stenmaterialet samt asfaltens indirekta draghållfasthet.

Den europeiska standarden "EN 12697-12, metod B" för undersökning av vattenkänslighet hos asfaltmassa innehåller ett systematiskt fel och ger därför inte pålitlig kunskap om vattenkänslighet. Det systematiska felet beror på olika vattenmätnadsgrad hos de i vatten lagrade provstyckena och referensprovstyckena under indirekta draghållfasthetsprovningen. Standardmetodens fel borde korrigeras genom att behandla alla provstycken i båda serier efter lagringsperiod i vatten så att de har samma vattenmätnadsgrad under indirekta draghållfasthetsprovningen. Vattenmätnadsgraden får dock inte vara nära 100 %. I samband med ändringen av provningsmetoden skall också kraven i asfaltnormerna för asfaltmassans vattenkänslighet kontrolleras.

Också i den av VTT utvecklade dynamiska, snabba cykliska tryckstötsprovningen motstod ett asfaltprovstycke, vars hålrum var fylld med vatten, flera kortvariga tryckstötar än ett motsvarande torrt provstycke. Resultatet var det samma vid alla tryckstötsprovningar i temperaturintervallet +5...+20 °C och i tryckintervallet 1000...7000 kPa på asfaltytan.

På basis av Asfadur-projektets resultat utarbetades metodbeskrivningen PANK 4306 för frys-tö-provning av asfaltmassa. Metoden innehåller 10 frys-tö-cykler för provstyckena efterföljda av indirekt draghållfasthetsprovning. Både testprovstyckena och referensprovstyckena skall ha samma vattenmätnadsgrad vid indirekta draghållfasthetsprovningen. Vattenmätnadsgraden får inte vara nära 100 %.

Kyösti Laukkanen, Pekka Halonen, Erkko Pyy: Resistance of asphalt mixture to freeze – thaw-cycles and combined effect of water and loadings. Asfadur project, Final report. Finnish Transport Agency, Infrastructure Maintenance and Operations. Helsinki 2012. Research reports of the Finnish Transport Agency 20/2012. 122 pages and 13 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-162-7.

Keywords: Asphalt pavement, voids, indirect tensile strength, freeze-thaw resistance, water sensitivity, pressure impact, degree of saturation, loading, pothole, ravelling

Abstract

The objective of the project was to develop laboratory methods for testing resistance of asphalt mixture to freeze–thaw-cycles and the combine effect of water and loadings.

Degree of water saturation of the asphalt specimen was chosen as a parameter for the indirect tensile strength test. If the voids volume is full of water, its degree of water saturation is 100 %. It was noted that if the degree saturation was 100 %, the water in the voids may reinforce the asphalt specimen during the momentary loadings e.g. in the indirect tensile strength test because water is incompressible.

According to the European standard EN 12697-12 method B, water sensitivity testing has an inherent systematic error because in the indirect tensile strength test the degree of water saturation of wet specimens is too high and because the wet and dry specimens have totally different degrees of saturation. This systematic error apparently affects the water sensitivity test results of asphalt pavement, but its effect also depends on voids volume and voids shape of the pavement. However, the water sensitivity result is also affected by potential weakening of the adhesion between bitumen and aggregate during storage in water; Thus, the result of the water sensitivity test is affected by two simultaneous but divergent changes caused by water. The project proposed changes to the standard in order to eliminate the systematic error. At the same time of potentially changing the European standard method, the water sensitivity requirements should also be reviewed.

On the basis of the project results, a method description for the freeze-thaw resistance of asphalt mixture (PANK-4306) was authored. According to the description, after 10 cycles of freeze-thaw test it will be made indirect tensile strength tests where the degree of saturation of the study specimens and reference specimens are equal but the pores are not full of water.

The combined effect of water and loadings was studied in the laboratory using a device that subjected a water-saturated asphalt specimen in water immersion cyclic rapid short-term pressure impacts. The method simulated the pressure impacts caused by a lorry wheel on the top surface of asphalt pavement in late winter. Particular interest was drawn to the pressure impact test result according to which specimens that were during the loadings immersed in water and had pore volume full of water could withstand more rapid cyclic pressure impacts than dry specimens in air. The result was systematic in all pressure impact tests, at all of the temperatures studied (+5...+20 °C) and all asphalt surface pressures (1...7 MPa) used in the study. Actually in this test, the incompressibility of water in the pores of an asphalt specimen and the flow resistance of water in the pore volume substantially increased durability of a water-saturated asphalt structure during rapid momentary cyclic loadings.

More information about the project in English is in the chapter: “8. Summary”.

Esipuhe

Projektin ”Menettelytavan kehittäminen asfalttipäällysteen säänkestävyyden määrittämiseksi toistuvien jäätymis-sulamisvaiheiden avulla” (ASFADUR) tutkimukset sisälsivät asfalttipäällysteen jäätymis-sulamiskoemenetelmän kehittämisen, SMA-päällysteen jäätymis-sulamiskokeiden tulokset, tiesääasematietojen perusteella tehdyn selvityksen päällysteen pintakerrosten jäätymis-sulamissykliä määrittäen sekä SMA- ja AB-päällysteiden dynaamisten paineiskukokeiden tulokset ja niihin liittyvän menetelmäkehitystyön.

Projekti toteutettiin vuosina 2008–2011. Projektin rahoittivat Liikennevirasto, Helsingin, Espoon, Vantaan, Tampereen, Oulun, Jyväskylän ja Kotkan kaupungit, PANK ry, Infra ry, Nordkalk Oyj, Nynas Oy ja VTT.

Tutkimuksen ohjausryhmään kuuluivat:

Katri Eskola, Liikennevirasto, pj.
 Ville Alatyppö, Helsingin kaupunki
 Sauli Hakkarainen, Espoon kaupunki
 Jorma Ranta, Vantaan kaupunki
 Esa Rannisto, Tampereen kaupunki
 Matti Räinen, Oulun kaupunki
 Jaakko Ylinampa, Oulun kaupunki
 Kari Ström, Jyväskylän kaupunki
 Risto Lehtonen, Kotkan kaupunki
 Vesa Laitinen, PANK ry
 Heikki Jämsä, Infra ry
 Timo Blomberg, Nynas Oy
 Kari Kuusipuro, Nordkalk Oyj
 Eila Lehmus, VTT
 Kyösti Laukkanen, VTT, siht.

Tutkimuksen menetelmätekniistä kehitystyötä ohjasi pienryhmä, johon kuuluivat:

Katri Eskola, Liikennevirasto
 Vesa Laitinen, PANK ry
 Sami Similä, Destia Oy
 Timo Blomberg, Nynas Oy
 Pirjo Kuula-Väisänen, Tampereen teknillinen yliopisto
 Kyösti Laukkanen, VTT.

Menetelmätekniikan kehitystyön ohjaukseen osallistui lisäksi PANK ry:n Laboratorio-toimikunta.

Tutkimusraportin ovat laatineet dipl.ins. Kyösti Laukkanen, tutkimusins. Pekka Halonen ja fil.yo. Erkki Pyy VTT:stä.

Helsingissä kesäkuussa 2012

Liikennevirasto
 Väylänpito-osasto / Väylänpidon ohjaus ja kehittäminen

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	10
1.1	Tutkimuksen tausta	10
1.2	Tutkimuksen tavoite	12
1.3	Tutkimuksen toteutustapa.....	13
2	MENETELMÄT JA AINEISTO	15
2.1	Jäätymis-sulamissyklien määrä tiestöllä	15
2.2	Jäätymis-sulamiskestävyys	16
2.2.1	Yleistä.....	16
2.2.2	Asfaltin koostumus laboratoriotesteissä	16
2.2.3	Jäätymis-sulamiskoemenetelmä.....	24
2.2.4	Ultraäänimittaukset.....	27
2.3	Vertailukohteet tiestöllä.....	28
2.3.1	Vertailukohteiden päällysteet.....	28
2.4	Veden ja kuormitusten yhteisvaikutus	29
2.4.1	Yleistä.....	29
2.4.2	Vesipaineiskumenetelmän kehittäminen	30
2.4.2.1	Näytteet.....	30
2.4.2.2	Laitteen protoversio.....	31
2.4.2.3	Menetelmän protoversio	31
2.4.2.4	Laitte- ja menetelmävaihtoehdon valinta.....	34
2.4.3	Ylisuuren tyhjätilan vaikutus	34
2.4.3.1	Näytteet.....	34
2.4.3.2	Menetelmä	36
2.4.4	Jäätymis-sulamisen ja kuormitusten yhteisvaikutus	36
2.4.4.1	Näytteet.....	36
2.4.4.2	Menetelmä	37
2.4.4.3	Näytteiden lämpenemismittaukset.....	37
2.4.4.4	Tutkitut ominaisuudet.....	37
2.4.5	Esikuormitusten, veden ja paineiskujen yhteisvaikutus.....	38
2.4.5.1	Näytteet.....	38
2.4.5.2	Menetelmä	38
2.4.5.3	Esikuormitukset.....	38
2.4.5.4	Vesisäilytys.....	38
2.4.5.5	Koestus.....	39
2.5	Tartukekokeilu	39
2.6	Liukkaudentorjuntasuolan käyttö.....	40
3	TULOKSET	42
3.1	Jäätymis-sulamissyklien määrä tiestöllä.....	42
3.2	Jäätymis-sulamiskestävyystestien nykytila	48
3.2.1	Yleistä.....	48
3.2.2	Asfaltin jäätymis-sulamistestimenetelmät	48
3.2.3	Betonin jäätymis-sulamiskoemenetelmät.....	50
3.3	Asfaltin jäätymis-sulamiskestävyys.....	53
3.3.1	Jäätymis-sulamissykliin säätökokeiluja	53
3.3.2	Syklien lämpötilan valinta.....	57
3.3.3	Jäätymis-sulamiskestävyyskokeet (syklin pituus 12 h)	59
3.3.4	Jäätymis-sulamiskestävyyskokeet (syklin pituus 24 h).....	60

3.3.5	Halkaisuvetolujuus ja jäykkyys jäätymis-sulamisen jälkeen.....	64
3.3.6	Jäätymis-sulamiskestävyys käsityömenetelmällä	68
3.3.7	Jäykkyyden riippuvuus ultraäänen etenemisnopeudesta	69
3.4	Vertailukohteiden vauriot.....	71
3.5	Veden ja kuormituksen yhteisvaikutus	71
3.5.1	Yleistä	71
3.5.2	Menetelmän protoversio	72
3.5.3	Lämpötilan, veden ja kuormitusten yhteisvaikutus	74
3.5.4	Murtumismekanismi	75
3.5.5	Jäätymis-sulamisen ja kuormitusten yhteisvaikutus.....	77
3.5.6	Esirasituksen, veden ja paineiskujen yhteisvaikutus.....	80
3.6	Vedellä kyllästysasteen vaikutus paineiskunkestävyyteen	82
3.7	Deformaatiokestävyys	86
3.8	Vedenkestävyyden ja jäätymis-sulamiskestävyyden vertailu	88
3.8.1	Vedenkestävyys	88
3.8.2	Tartukkeen vaikutus jäätymis-sulamis- ja vedenkestävyyteen	90
3.8.3	Vertailunäytteen imeytyksen vaikutus halkaisuvetolujuuteen	92
4	TULOSTEN TARKASTELU	94
4.1	Tulosten vertailu tavoitteisiin	94
4.1.1	Jäätymis-sulamiskestävyyden testimenetelmän kehittäminen.....	94
4.1.2	Jäätymis-sulamiskokeen kesto aika.....	95
4.1.3	Jäätymis-sulamiskokeen käyttö eri laboratorioissa	96
4.1.4	Tutkimuksen uudelleen suuntaaminen	96
4.1.5	Veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen tutkiminen	97
4.1.6	Projektin loppuvaiheen menetelmämuutokset	98
5	YHTEENVETO	99
5.1	Yleistä	99
5.2	Suhteitustavoitteet ja näytevalmistus.....	100
5.3	Tutkimusmenetelmät.....	100
5.4	Tulokset	103
6	JOHTOPÄÄTÖKSIÄ	108
7	JATKOTOIMET	109
8	SUMMARY	111
8.1	General	111
8.2	Mix design and production of specimens.....	112
8.3	Study methods	113
8.4	Results	115
8.5	Conclusions	118
8.6	Further actions	119
8.6.1	Preparation of the RYM-SHOK research programme	119
8.6.2	Improving the reliability of the water sensitivity test.....	120
8.6.3	Improving the reliability of the freeze-thaw test.....	120
	KIRJALLISUUSVIITTEET	122

LIITTEET

- Liite 1 SMA 16/ Koskenkylä massojen koostumus jäätymis-sulamiskokeissa
- Liite 2 Koskenkylän kiviaineksen 0/16 mm rakeisuus
- Liite 3 SMA 16/ Patavuori massojen koostumus jäätymis-sulamiskokeissa
- Liite 4 VTT:n automaattinen jäädytys-sulatuslaite
- Liite 5 Asfalttinäytteen lämpötila jäätymis-sulamissykliä aikana
- Liite 6 Tiesääasemat jäätymis-sulamissykliä laskennassa
- Liite 7 Asfaltin pintalämpötiloja v. 2003-06 tiesääasemilla
- Liite 8 Referenssinäytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus tyhjättilasta
- Liite 9 Jäädytys-sulatuslaitteen toimivuuden varmistaminen
- Liite 10 Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymis-sulamiskestävyystuloksia
- Liite 11 SMA 16/ Koskenkylä massojen koostumus paineiskukokeissa
- Liite 12 AB 22/ Patavuori massojen koostumus syklisissä paineiskukokeissa
- Liite 13 Paineiskumenetelmän esikoe kuormitustason valintaa varten

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Asfalttipäällysteen kuntoa heikentävät perinteisen ajattelutavan mukaan nastarenkaiden aiheuttama kuluminen, routavauriot ja alhaisesta lämpötilasta johtuvat kutistumishalkeamat talvella, deformatuminen kesällä ja veden aiheuttama päällysteen rapautuminen. Veden aiheuttamien vaurioiden oli aiemmin arvioitu olevan vähäliikenteisten teiden pitkäaikaiskestävyyden ongelmana, kun taas vilkasliikenteisten teiden vaurioitumisen oli arvioitu tapahtuvan pääasiassa kulumalla tai deformatumalla.

Vuosina 2008 ja 2009 kevättalvella ilmennyt päällysteiden ylimmän kerroksen äkillinen reikiintyminen, purkaantuminen tai irtoilu alustasta olivat ilmiöitä, joita aiemmin ei ollut pidetty päällysteiden keskeisenä säilyvyysongelmana. Reikiintymisvaurioita esiintyi sekä vilkkaasti liikennöidyillä pääteillä että vähäliikenteisellä tiestöllä. Päällysteen vaurioituminen heikentää liikenneturvallisuutta.

Jos asfalttipäällysteen jäätymis-sulamiskestävyys on riittämätön, päällyste vaurioituu toistuvien jäätymis-sulamissykliä vaikutuksesta. Tällöin päällystekerros voi muuttua löyhäksi, irtaimeksi ainekseksi, kun päällysteen osa-aineiden välinen tartunta purkautuu tai päällystekerros voi irrota paikoitellen alustastaan. Vauriot näkyvät päällysteen reikiintymisenä tai irtoiluna alustastaan. Reikiintymisvaurioiden aiheuttajaa ei tunneta varmuudella.

Reikiintymisvaurioiden on arvioitu osittain johtuvan muuttuneista ilmastorasituksista. Ilmastoperäiset päällystevauriot aiheuttavat vuosittain suuria korjauskustannuksia ja päällystevaurioiden yleistyminen vaarantaa liikenneturvallisuutta.

Vaurion voivat aiheuttaa asfaltin huokosissa olevan veden tai suolaliuoksen toistuvat jäätymis-sulamisvaiheet tai päällysteen pintaan kohdistuvat raskaiden ajoneuvojen pyörien aiheuttamat paineiskut.

Ilmiö voi kuitenkin johtua monesta eri syystä tai useiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Mahdollinen reikiintymisvaurioiden aiheuttaja voi olla vesi, veden ja liikennekuormituksen yhteisvaikutus, veden ja toistuvien jäätymis-sulamissykliä yhteisvaikutus, päällysrakenteen puutteellinen kuivatus, liian alhainen sideainepitoisuus, heikkolaatuiset raaka-aineet, työvirheet tai useamman tekijän yhteisvaikutus. Yhteisvaikutus voi syntyä esim. siten, että jokin edellä mainituista tekijöistä heikentää päällysteen kestävyyttä jotain toista vauriotekijää vastaan.

Koska nämä vauriot yleistyivät äkillisesti kevättalvella pakkasjakson jälkeen, talviset sääolosuhteet olivat todennäköisesti ainakin myötävaikuttaneet vaurioitumiseen. Pakkasjakson jälkeen päällysteen ylimmän kerroksen lämpötila nousee ensin nollan yläpuolelle, jolloin ylimmän kerroksen huokosissa ollut jää sulaa. Päällysrakenteen alemmat kerrokset ovat tällöin edelleen jäässä, joten sulamisvesi ei pääse poistumaan alaspäin.

Vauriot ovat usein päällysteen sauman vieressä. Sauman vieressä tyhjätila on usein korkeampi kuin muussa päällysteessä, mistä johtuen vesi pääsee tunkeutumaan saumakohdissa päällysteen sisään helpommin kuin muualla.

Merkillepantavaa oli, että reikiintymisvauriot vuosina 2008–2009 todetussa laajuudessa ovat uusi ilmiö. Jotain oli siten muuttunut aiempaan tilanteeseen verrattuna. Olivatko muutoksen syinä ilmastonmuutos, raaka-aineiden heikentyminen, rakennuskustannusten minimointi, työmenetelmien puutteet, työvirheiden yleistyminen, laadunvalvonnan väheneminen vai useamman tekijän yhteisvaikutus.

Tämän tyyppinen vaurioituminen ei ollut ainoastaan Suomen ongelma, sillä myös monissa muissa maissa oli ilmennyt samanlaisia ongelmia. Reikiintymis- ja purkaantumisriskin arvioimiseksi tai poistamiseksi päällysteen ennakkosuunnittelun yhteydessä ei ollut löydetty toimivaa menettelytapaa kotimaassa eikä ulkomailla.

Asfaltin vedenkestävyyden testimenetelmää (ilman jäätymisrasitusta) kehitettiin samaan aikaan CEN:n ad-hoc ryhmässä ”Adhesion” yhteistyössä rakennusteollisuuden kanssa. CEN-ryhmän toimesta tutkittiin eurooppalaisena yhteistyönä yhdeksää erilaista vedenkestävyyden testimenetelmää. Jotta Asfadur-projektissa vältettiin päällekkäisyys CEN:in tutkimukseen, rajattiin pelkän vedenkestävyyden tutkiminen pääosin Asfadur-projektin ulkopuolelle. Vedenkestävyyden menetelmä (standardi SFS-EN 12697-12, menetelmä B) oli Asfadur-projektissa kuitenkin mukana vertailumenetelmänä, koska se oli yleisessä käytössä päällystemassojen ennakkokokeissa.

Asfadur-projektissa haettiin ratkaisua reikiintymisongelmaan pyrkien kehittämään tutkimusmenetelmiä, jotka jäljittelevät päällysteiden talviajan rasitustekijöitä, jotka saattaisivat aiheuttaa reikiintymistä. Tutkittavat ominaisuudet olivat päällysteen jäätymis-sulamiskestävyys sekä veden ja kuormituksen yhteisvaikutus.

Tutkimuksen lähtökohtana oli tarve kehittää luotettava menettelytapa asfalttipäällysteiden säänkestävyyden arviointiin. Tutkimuksen toteutusaikana käytössä olevien asfalttipäällysteiden sään- ja vedenkestävyyden tutkimusmenetelmien (esim. SFS-EN 12697-12) toistettavuus ja erotuskyky oli todettu epätyytyttäväksi. Asfaltin säänkestävyysongelmien ratkaisun perusedellytys oli kuitenkin, että käytettävissä olisi tarkka ja riittävän nopea menetelmä säänkestävyyden arviointia ja toteamista varten.

Tästä syystä tutkimus rajattiin projektin ensimmäisessä vaiheessa asfaltin jäätymis-sulamisen tutkimusmenetelmän kehittämiseen, menetelmän testaamiseen, erottelukykyyn ja toistettavuuden selvittämiseen.

Projektin toisessa vaiheessa suoritettuna paineiskumenetelmä-tutkimuksen avulla pyrittiin selvittämään mahdollisuuksia yhdistää veden ja liikennekuormituksen yhteisvaikutus asfaltin laboratoriokokeessa ja kehittämään koemenettely, jota voidaan käyttää päällystemassan koostumuksen valinnan ennakkosuunnittelussa. Vesipaineiskututkimuksen lähtökohdaksi valittiin hypoteesi, jonka mukaan päällysteiden reikiintyminen voi aiheutua liikennekuormien ja veden yhteisvaikutuksesta. Reikiintymisen oletettiin etenevän siten, että pakkaskauden jälkeen päällysteen lämpötila nousee ensin päällysteen yläosassa, jonka huokosissa oleva jää sulaa vedeksi samaan aikaan, kun päällysteen alemmat kerrokset ovat vielä jäässä. Raskaiden ajoneuvojen renkaiden arvioitiin aiheuttavan tiepäällysteiden pintakerrokseen voimakkaita paineiskuja, kun ne ylittävät suurella nopeudella päällysteen kohdan, jossa päällysteen huokostila on joko kokonaan tai osittain veden täyttämä.

- Jos huokostila on ilman täyttämä, dynaaminen paineisku kohdistuu päällysteen runkoon, joka voi puristua kokoon, samalla kun huokostilassa oleva ilma puristuu kokoon. Tästä seuraa asfaltin murtumisriski.

- Jos huokostila on kokonaan veden täyttämä, paineiskun aikana vesi voi siirtää painetta eteenpäin huokostilassa. Koska huokosissa oleva vesi ei puristu kokoon, se voi estää hetkellisesti asfaltin kokoonpuristumista lyhytkestoisissa kuormitus-tilanteissa. Paineiskun syntymiseen ja leviämiseen asfaltissa vaikuttaa merkittäväällä tavalla lämpötila, kuormitusajan pituus, kuormituksen suuruus, asfaltin huokostilan suuruus ja muoto sekä huokostilassa oleva vesi.
- Jos huokostila on vain osittain veden täyttämä, asfalttiin kohdistuva isku kohdistuu päällysterakenteeseen, jonka huokostila on ollut veden vaikutuksen alaisena, mutta jossa voi syntyä myös asfaltin kokoonpuristumisesta tai joustamisesta aiheutuvia vaurioita, koska huokostilan osittain sisältämä ilma puristuu kokoon eikä tue asfalttirunkoa. Myös tällöin huokostilan suuruus, muoto ja rakenne vaikuttavat vaurioitumiseen, sillä niistä riippuu veden pääsy huokosiin ja sen virtausvastus huokosissa.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Projekti jakaantui kahteen vaiheeseen. Projektin ensimmäinen vaihe kohdistui päällysteen jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimiseen ja laboratoriokoemenetelmän kehittämiseen. Ensimmäisen vaiheen tavoitteina oli:

- kehittää laboratoriokoemenetelmä, joka soveltuu asfaltin jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimus- ja testaustarkoituksiin. Erityistä huomiota tuli kiinnittää menetelmän tarkkuuteen, riittävään nopeuteen ja mahdollisuuksiin käyttää sitä useassa eri laboratoriossa,
- selvittää kehitettävän koemenetelmän olennaiset parametrit (SMA-näytteen valmistustapa, riittävä jäätymis-sulamissyklien määrä, suolaliuoksen tai veden vaikutusero jäätymis-sulamiskestävyyden kannalta, näytteen lämpötilan muutosnopeus jäätymis-sulamissyklien aikana ja kokeen kokonaiskesto-aika),
- selvittää SMA:n bitumipitoisuuden muutosten tai poikkeamien ja tyhjätilavaatimusten ylitysten vaikutus jäätymis-sulamiskestävyyteen,
- selvittää SMA:n jäätymis-sulamissyklien määrän vaikutus päällystenäytteen dynaamisen jäykkäysmoduulin muuttumiseen ja selvittää ultraäänimenetelmän soveltuvuus näytteen jäykkäysmoduulin muuttumisen arvioimiseen,
- selvittää kehitettävän jäätymis-sulamismenetelmän toistettavuus kolmella asfaltityypillä (SMA, AB, PAB-B),
- selvittää jäätymis-sulamiskoemenetelmän ja asfaltin vedenkestävyyden testausmenetelmän (SFS-EN 12697-12, menetelmä B) välinen yhteys.

Koska projektin ensimmäisessä vaiheessa kehitetty jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimusmenetelmä ei tuonut parannusta massareseptien vertailun tarkkuuteen ja suhteituskokeiden erottelukykyyden vedenkestävyysskokeeseen verrattuna, päätettiin projektin toisen vaiheen resursseja suunnata uudella tavalla.

Projektin toisessa vaiheessa päätettiin kehittää uusi tutkimusmenetelmä, joka ottaisi huomioon veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen asfalttipäällysteiden reikiintymisen aiheuttajana: Projektin jäljellä olevat resurssit suunnattiin siksi asfaltin dynaami-

sen vedenpaineiskunkestävyyden tutkimusmenetelmän kehittämiseen. Dynaamisten paineiskututkimusten avulla pyrittiin selvittämään laboratoriossa veden ja päällysteeseen kohdistuvan kuormituksen yhteisvaikutus asfalttinäytteen purkaantumiseen ja reikiintymiseen.

1.3 Tutkimuksen toteutustapa

Projektin ensimmäisessä vaiheessa käytetty VTT:n jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimuslaitteisto oli käytössä jo projektin alkaessa. Projektin toisen vaiheen dynaamisia paineiskukokeita varten VTT kehitti projektin aikana kokeiden suoritukseen tarvittavat laite- ja menetelmävalmiudet.

Destia Oy ja Lemminkäinen Infra Oy suhteittivat tutkimuksen asfalttimassat, valmisivat näytteet ja tutkivat niiden tyhjätilat. VTT suoritti muilta osin tutkimuksen laboratorioskokeet (ellei muuta mainittu) ja raportoi tulokset.

Projektissa tutkittiin kivimastiksiasfaltti- ja asfalttibetoninäytteitä, joiden materiaali-koostumus vastasi yleensä kyseisen päällysteen suhteituksen mukaista optimikoostumusta. Näytteiden tyhjätila jätettiin kuitenkin näytevalmistuksen yhteydessä korkeammaksi kuin suhteituksen mukainen optimi. Korkeammalla tyhjätilalla pyrittiin varmistamaan, että vesi pystyi varmasti tunkeutumaan näytteeseen.

Asfadur-projektin Menetelmätekniinen pienryhmä asetti kunkin koestuserän laboratoriotutkimuksille eräkohtaisia sisältötavoitteita, päätti tutkittavien asfalttimassojen koostumukset sekä otti kantaa kunkin koestuserän tutkimusparametrien valintaan ja tutkimuksen suuntaamiseen projektin aikana. Tutkimuksen suuntauksen muutoksiin liittyvät asiat esim. dynaamisen paineiskukoeimenetelmän kehittäminen tutkimuksen vaiheessa 2 vietiin ohjausryhmän hyväksyttäväksi ennen muutosten toteuttamista. Dynaaminen paineiskukoetutkimus suoritettiin useassa koestuserässä. Kunkin erän tutkimuksille asetettiin tavoitteet menetelmäteknisessä pienryhmässä.

Ensimmäisessä koestuserässä pyrittiin esikokeilujen avulla selvittämään, pystytäänkö dynaamisen paineiskulaitteen protoversiolla rikkomaan SMA-asfalttinäyte (D 150 mm, h 60 mm), kun näytteen lämpötila oli +5 °C ja yksittäisen näytteen koestus tuli toteuttaa 2 tunnissa. SMA-massa oli Korson rampin tartukekokeilun mukaista massaa, mutta laboratorionäytteissä tyhjätilan tuli olla massan suhteituksen mukaista optimiarvoa korkeampi, jotta vesi pääsisi varmasti tunkeutumaan päällysteen huokosiin (tyhjätilatavoite 6–7 %, sallittiin 6–8 %, IPK-menetelmä).

Toisen koestuserän näytteet olivat oli SMA-massaa, jonka tyhjätilatavoite valittiin erittäin korkeaksi (tyhjätila noin 8 %, vaihteluväli 8–10 %, IPK-menetelmä). Kuormituskäyrän muoto muutettiin puolisinikäyrän muotoiseksi ensimmäisessä erässä käytetyn ”kanttiaallon” asemasta.

Kolmannen koestuserän näytteet valmistettiin AB 22-massasta, jonka tyhjätilatavoite valittiin massan suhteituksen mukaista optimiarvoa korkeammaksi (tyhjätilatavoite 6–7 %, sallittiin 6–8 %, IPK-menetelmä). Koestuserän avulla tutkittiin jäätymis-sulamiskestävyysskoeken ja dynaamisen kuormituskokeen yhteisvaikutus asfalttibetonin vaurioitumiseen. Jäätymis-sulamiskoemenetelmää muutettiin siten, että näytteet jäädettiin ilmassa ja sulatettiin vedessä. Näytteet olivat syklien aikana ai-

emmasta poiketen ritilän päällä ilman näytepurkkeja (projektin aiemmissa jäätymsulamiskestävyyskokeissa ne olivat koko ajan nesteupotuksessa näytepurkeissa).

Neljännän koestuserän näytteet valmistettiin AB 22-massasta, jonka koostumus ja tyhjätilatavoitteet olivat samat kuin erässä 3. Neljännän koestuserän näytteillä pyrittiin selvittämään näytteille laboratoriossa aiheutetun esikuormitusvaurion ja näytteiden vedessä säilytysajan pituuden sekä dynaamisen paineiskukokeen yhteisvaikutus AB-massan vaurioitumiseen.

2 Menetelmät ja aineisto

2.1 Jäätymis-sulamissykliä määrätään tiestöllä

Jäätymis-sulamissykliä määrätään tiestöllä selvitetään yhdeksän tiesääseman keräämien viiden talven lämpötilatietojen avulla. Selvityksen avulla pyrittiin saamaan tietoa sääolosuhdemuutosten vaikutuksista jäätymis-sulamissykliä määrätään.

Tutkimuksessa käytettiin taulukossa 17 esitettyjen tiesääsemanien tallentamaa aineistoa. Tiesääsemanien sijainti kartalla on esitetty liitteessä 6 ja asemien tallentamat asfaltin talviajan pintalämpötilatiedot v. 2003-09 liitteessä 7.

Päällysteiden pintalämpötilatietojen avulla laskettiin jäätymis-sulamissykliä lukumäärä ylimmän asfalttikerroksen kolmella vaihtoehtoisella paksuudella (2 cm, 3 cm ja 5 cm) eri talvina käyttäen aiemmin kehitettyjä asfalttikerroksen jäätymis- ja sulamissyvyysmalleja [1]. Yksi jäätymis-sulamissykli tarkoitti tässä laskelmassa, että valitun paksuinen asfalttikerros ensin jäätty kokonaan ja sulii sen jälkeen kokonaan.

Laskelmassa käytettiin jäätymis- ja sulamissyvyyskaavoja pyrkien selvittämään, kuinka monta kertaa valittu asfaltin kerrospaksuus jäätyy ja sulaa kunkin talven aikana. Jäätymissyvyys kunkin jäätymisvaiheen aikana laskettiin kaavalla 1 ja sulamissyvyys kunkin sulamisvaiheen aikana laskettiin kaavalla 2.

Jäätymissyvyyskaava:

$$z = k \times \sqrt{F} \quad (1)$$

Sulamissyvyyskaava:

$$z = k \times \sqrt{T} \quad (2)$$

Kaavoissa 1 ja 2:

z = jäätymis- tai sulamissyvyys [cm]

k = kerroin, jonka arvoksi asfaltille valittiin 1,0

F = pakkasmäärän kertymä

T = lämpöastesumman kertymä.

Pakkasmäärän kertymä jäätymisvaiheessa (F) laskettiin kaavalla 3 ja vastaavasti lämpöastesumman kertymä sulamisvaiheessa (T) laskettiin kaavalla 4.

$$F = a \times \sum_{i=1}^n (T_f - T_i) \quad (3)$$

$$T = a \times \sum_{i=1}^n (T_i - T_f) \quad (4)$$

jossa

a = tiesääsaman lämpötilan havaintovälin pituus (h)

T_f = jäätymispiste $^{\circ}\text{C}$

T_i = havaintovälin i keskimääräinen tien pintalämpötila $^{\circ}\text{C}$

F = pakkasmäärän kertymä

T = lämpöastesumman kertymä.

Kun asfaltin pintalämpötila oli alle nollan, käytettiin jäätymisvaiheen kaavoja 1 ja 3. Kun pintalämpötila on nollan yläpuolella, käytettiin sulamisvaiheen kaavoja 2 ja 4.

Laskentamenetelmä otti huomioon asfalttikerroksen yläpuolella olevan ilman vaikutuksen kerroksen jäähtymiseen, jäätymiseen, sulamiseen ja lämpenemiseen, mutta se ei ottanut huomioon asfalttikerroksen alapuolella olevan kerroksen lämpötilan vaikutusta tulokseen. Koska asfaltin alapuolisen kerroksen vaikutusta pakkasmäärän kertymään ei otettu huomioon ja koska lämpötila-aineistossa oli ajanjaksoja, joilta havaintoja puuttui, on näin laskettu tulos jäätymis-sulamissykliä määrätystä vain suunta-antava.

2.2 Jäätymis-sulamiskestävyys

2.2.1 Yleistä

Asfaltin jäätymis-sulamiskestävyuden tutkimusmenetelmää kehitettiin laboratorion keinoilla, joissa selvitettiin menetelmän keskeisten muuttujien valintaperusteet ja soveltuva vaihteluväli (minimi- ja maksimilämpötila, jäätymis-sulamissykliä lukumäärä, yksittäisen syklin pituus ja kokeessa käytettävä neste). Pääosa laboratorion kokeista tehtiin VTT:n automaattiohjauksella varustetulla jäädytys-sulatuslaitteella.

Automaattisella laitteella suoritettujen kokeiden vaihtoehtona kokeiltiin jäätymis-sulamiskokeiden suoritusnäytteenä. Lisäksi kerättiin tieto mahdollisimman vastaavilla koostumuksilla tielle tehdyistä päällysteistä seurantahavaintoja varten.

Tutkimuksen sisältö rajattiin ennen projektin aloitusta asfalttipäällysteelle soveltuvan jäätymis-sulamiskokeiden kehittämiseen. Siksi tutkimus ei sisällä jäätymis-sulamista kestävästä asfalttipäällysteen reseptin kehittämistä, mutta sen avulla pyrittiin kehittämään keinoja tällaisten koostumusten valintaa varten.

2.2.2 Asfaltin koostumus laboratorion kokeissa

Laboratoriossa tehdyissä jäätymis-sulamiskokeissa tutkittiin SMA 16 asfalttinäytteitä. Massojen perusvaihtoehdot olivat Patavuoren tai Koskenkylän mursketta käyttäen valmistetut SMA16-massan tilavuussuhteituksen mukaiset optimikoostumukset. Lisäksi tutkittiin Koskenkylän kiviaineksen ns. heikennetty koostumus, jossa käytettiin täytejauheena lentotuhkaa kalkkifillerin asemasta ja sideainepitoisuutta alennettiin 0,2 prosenttiyksikköä optimikoostumukseen verrattuna.

Näiden massojen koostumustietojen yhteenveto on esitetty taulukossa 1 ja laboratorion analyysitulokset liitteissä 1 - 3.

Näytteet poikkesivat tavanomaisista asfalttinäytteistä siten, että asfalttilaatat oli tiivistetty tavanomaista alhaisemmalla tiivistystyömäärällä pyrkien tavanomaista korkeampaan tyhjätilaan 6–7 % (sallittiin 6–8 %).

Näytevalmistuksessa käytetyn bitumin ominaisuudet on esitetty taulukossa 2. Sideaineen ominaisuudet tutki Neste Oil Oyj:n laboratorio yhteistyössä Nynas Oy:n kanssa.

Taulukko 1. Asfalttimassojen koostumukset jäätymsulamiskestävyystutkimusten laboratoriokokeissa (projektin vaihe 1).

		Patavuori optimi	Koskenkylä optimi	Koskenkylä heikennetty
Kiviaines		Patavuori KaM	Koskenkylä KaM	Koskenkylä
#16 mm läpäisy	%	95	92,4	
# 2 mm läpäisy	%	21	21,1	
# 0,063 mm läp.	%	10	9,5	
Kuulamyly, ka			5,5	
Vedenadsorptio	%		0,2	
Täytejauhe		Kalkkifilleri	Kalkkifilleri Sipoo	Lentotuhka
Täytejauhepit.	%	9,0	6,0	
Kuitumerkki			EKI-12	EKI-12
Kuitupitoisuus	%	0,35	0,3	0,3
Bitumin toimittaja		Nynas Oy	Nynas Oy	Nynas Oy
Bitumilaji		50/70	50/70	50/70
Bitumipitoisuus	%	5,6	6,0	5,8
Päällystelaji		SMA 16	SMA 16	SMA 16

Taulukko 2. Jäätymsulamiskestävyystutkimusten laboratoriokokeissa käytetty bitumi ja sen ominaisuudet.

Nynas 50/70 bitumin analyysi (Reg. no 00892749)

- Tunkeuma, 25 °C 69 0,1 mm
- Pehmenemispiste 47,4 °C
- Murtumispiste, Fraass -18 °C
- Viskositeetti, 60 °C 169 Pas
- Viskositeetti, 135 °C 319 mm²/s
- Leimahduspiste, COC 322 °C

RTFOT

- Massan muutos 0,03 m-%
- Pehmenemispiste 54,8 °C
- Viskositeetti, 60 °C 642 Pas
- Jäännöstunkeuma 55 %
- Viskositeettisuhde 3,8

BBR

Lämpötila, °C	-18	-24
Jäykkyys, MPa	236	524
m-arvo	0,344	0,262

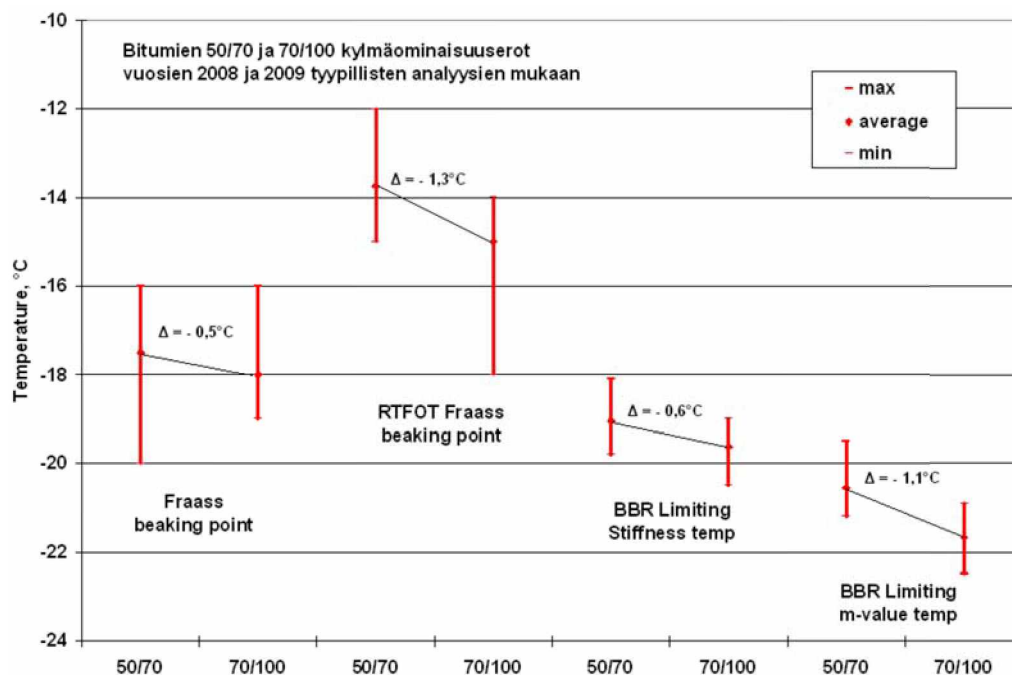
- Kriittinen lämpötila, LST -19,3 °C
 - Kriittinen lämpötila, LmT -21,2 °C
- LST on jäykkyyden kriittinen lämpötila (S = 300 MPa) ja LmT on m-arvon kriittinen lämpötila (m-arvo 0,300).

Analyysitulokset olivat tyypillisiä arvoja bitumille 50/70.

Liikenneviraston urakoissa (Etelä-Suomessa) käytettiin tutkimuksen toteutusaikana SMA-päällysteissä sideaineena bitumia 70/100. Tämä bitumilaji oli valittu käyttöön sideaineen kylmäominaisuuksien perusteella asfaltin pakkaskatkojen välttämiseksi.

Jos näissä urakoissa olisi käytetty bitumia 50/70, se olisi parantanut massan deformaatiokestävyyttä ja samalla mahdollistanut muutaman kymmenyksen sideainepitoisuuden lisäyksen, joka taas lisäisi päällysteen kestävyyttä ja erityisesti sen vedenkestävyyttä.

Nynas Oy oli tehnyt vertailun vuosina 2008–09 toimittamiensa bitumien 50/70 ja 70/100 kylmäominaisuuksien analyysituloksista. Näiden bitumilajien kylmäominaisuuserot analyysimenetelmästä riippuen olivat tuona aikana välillä 0,5–1,3 °C testausmenetelmästä riippuen, kuva 1. Nynas Oy:n selvityksen mukaan tällä erolla ei voida perustella bitumin 70/100 käyttövaatimusta, jos toisessa vaakakupissa on vähemmän veden ja pakkasen aiheuttamia päällystevaurioita. Vaurioiden väheneminen saavutettaisiin tällöin pienellä sideainepitoisuuden lisäyksellä [3].



Kuva 1. Bitumien Nynas 50/70 ja 70/100 kylmäominaisuuserot v. 2008–09 [3].

Kiviainesten mineraalikoostumukset

Laboratoriossa valmistetut asfalttinäytteet sisälsivät Koskenkylän tai Patavuoren murskettä. Tiestölle tehdyissä vertailuosuuksissa oli myös Koskenkylän, Patavuoren ja Kytäjän murskettä. Niiden mineraalikoostumuksesta oli saatavissa seuraavia tietoja:

Koskenkylä

Petrograafisen kuvauksen mukaan (Varsto n:o 11865) kivilaji oli hienorakeista kvartsi-maasälpäliusketta, jonka mineraalikoostumus oli:

- kalimaasälpä 40 %
- kvartsi 30 %
- plagioklaasi 20 %
- saussuriitti 5 %
- muut mineraalit 5 %.

Petrograafisen kuvauksen mukaan Koskenkylän kiviaines ei sisällä haitallisessa määrin vaarallisia mineraaleja. (Kari Lappalainen 2010).

Patavuori

Kiviaines oli (Kivimieskalenterin 2010) mukaan hienorakeista, lohkopinnaltaan tummaa emäksistä vulkaniittia. Vulkaniitissä oli havaittavissa sekä rakenteellista että koostumuksellista vaihtelua. Päämineraalit olivat amfibolit (49 %) ja plagioklaasi (47 %). Muita esiintyviä mineraaleja olivat pyrokseenit 2 %, malmimineraalit, epidootti 0,2 % ja kvartsi.

Ohuthietulokset TTY, 2009: Sarvivälke (amfiboliryhmän mineraali) 47.8 %, plagioklaasi 32,8 % kvartsi 6,2, glaukofaani 3 % (= amfiboliryhmän mineraali) ja opaakki 2 % (Pirjo Kuula-Väisänen 2010).

Kytäjä

Kytäjän Haaramäen kiviaines oli emäksistä vulkaniittia. Kiviaineen päämineraaleja olivat plagioklaasi (55 %) ja amfibolit (30 %). Muita esiintyviä mineraaleja olivat kvartsi, epidootti, tilaniitti ja apatiitti.

Kiviaines oli intermediäärinen vulkaniitti, jonka mineraalit olivat: plagioklaasi 58 %, sarvivälke 39 %, malmimineraalit 1,2 %, titaniitti 1,2 %, epidootti ja 0,4 % biotiitti (Pirjo Kuula-Väisänen 2010 ja Kivimieskalenteri 1999).

Mineraalikoostumus vaikutti merkittävästi kiviaineen ja bitumin väliseen tartuntaan. Sekä Patavuori että Kytäjä olivat metavulkaniitteja, kun taas Koskenkylä oli graniitti. Mineralogisesti nuo kivet olivat ainakin Koskenkylään verrattuna täysin erilaisia. Kiven ja bitumin välisen tartunnan kannalta tummat vulkaniitit ovat ilmeisesti parhaita mahdollisia, kun taas Koskenkylän kiviaines sisälsi tartuntaa heikentäviä mineraaleja.

Yleisenä tietona on, että monet suomalaiset kivet (erityisesti rakennuskivinä käytetyt) käyttäytyvät lujuustesteissä samoin eli lujuudet kasvavat jäädytys-sulatustestien jälkeen jonkin verran.

Bitumin ja kiviaineen välinen tartunta vaikuttaa halkaisuvetolujuuteen. Asia voisi liittyä emäksisten kivien ja bitumin välisen tartunnan paremmuuteen [2].

Asfalttinäytteet ja niiden tutkiminen

Jäädytys-sulatuskokeen aikana näytteet olivat yleensä upotettuina veteen tai suola-liuokseen sekä jäädytys- että sulatussykliä aikana. Jäätymis-sulamiskokeessa käytetyn nesteen ja syklimäärän esivalintaa varten tutkitut koesarjat on esitetty taulukossa 3. Näiden näytteiden tutkimustulosten perusteella muut vaiheen 1 projektisuunnitelman mukaiset massakoostumukset korvattiin projektin Menetelmätekniikan pienryhmän päätösten perusteella taulukoissa 4 ja 5 esitetyillä massakoostumuksilla.

Projektin vaiheen 1 jäätymis-sulamiskokeissa tutkitut asfalttikoostumukset olivat SMA 16 massaa, jonka kiviaines oli joko Koskenkylän tai Patavuoren kalliomursketta. Sideaine oli bitumia 50/70, jonka tilavuussuhteituksen mukainen optimipitoisuus oli Koskenkylän mursketta käytettäessä 6,0 % ja Patavuoren mursketta käytettäessä 5,6 %. Koskenkylän mursketta sisältäviä massoja valmistettiin sekä kiviaineksen optimibitumipitoisuudella (6,0 %) että 0,2-posenttiyksikköä alennetulla bitumipitoisuudella (5,8 %). Täytejauhe oli aluksi kalkkifillieriä, myöhemmin osin myös lentotuhkaa.

Taulukko 3. Jäätymis-sulamiskokeessa käytetyn nesteen ja syklimäärän esivalintaa varten tutkitut näytteet (SMA 16 Koskenkylä, täytejauhe kalkkifillieri).

Kalliomurske	Bitumilaji	Bitumipit. *)	Tyhjätilatavoite **)	Jäädytysvaihe	Sulatusvaihe	Jäädytys-sulatussyklejä	Sykl. jälk. HVL 10°C	Rinnakkaisnäytt.
		%	%			kpl		kpl
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	3 % NaCl	3 % NaCl	6	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	3 % NaCl	3 % NaCl	10	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	3 % NaCl	3 % NaCl	20	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	3 % NaCl	3 % NaCl	50	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	1 % NaCl	1 % NaCl	6	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	1 % NaCl	1 % NaCl	10	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	1 % NaCl	1 % NaCl	20	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	1 % NaCl	1 % NaCl	50	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	vedessä	vedessä	6	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	vedessä	vedessä	10	x	5 + 5
Koskenkylä	50/70	6,0	6 - 7	vedessä	vedessä	20	x	5 + 5
Näytteitä yht.								110

*) Suhteituksen mukainen optimipitoisuus

**) Sallitaan tyhjätila 6 - 8 %, kun tavoite on 6 - 7 %.

Laboratorionäytteiden tyhjätilatavoite oli 6–7 % ja sallittu vaihteluväli 6–8 %. Asfaltinormien mukainen SMA 16 ajoratapäällysten tyhjätilavaatimus suhteitusluokissa A ja B oli yksittäiselle näytteelle ≤ 6 % ja keskiarvolle 2,0–5,0 %. Saumanäytteille sallittiin normeissa tyhjätilavaatimuksen ylärajaan 2 prosenttiyksikön korotus, joten saumoissa yksittäisen näytteen suurin sallittu SMA16-päällysten tyhjätila oli ≤ 8 %.

Uusien tiepäällysteiden tyhjätila mitataan kultakin päällystekaistalta yhdestä ajourasta päällystetutkalla menetelmällä PANK-4122. Päällystetutka mittaa asfaltin dielektrisyttä mittaustaaajuudella (vähintään) 10 tulosta juoksumetriä kohden. Dielektrisyystulokset muunnetaan tyhjätila-arvoiksi poranäytetulojen avulla. Tuloksista lasketaan tyhjätilojen keskiarvot 10 m matkalta. Tuloksina ilmoitetaan kultakin mittaustaistalta 10 m matkoille laskettujen tyhjätilojen keskiarvot ja keskihajonnat sekä yksittäisen näytteen tyhjätilavaatimuksen alittavien ja ylittävien 10 m keskiarvojen osuudet prosentteina kaistan pituudesta.

Käytännön asfalttitoissa tiekohteissa hyvin onnistuneen SMA-päällysteen tyhjätila on olennaisesti alhaisempi kuin laboratoriokokeissa käytetty tyhjätila. Laboratoriokoe-näytteiden tyhjätila ei kuitenkaan ylittänyt yksittäiselle saumanäytteelle tiekohteessa normien mukaan sallittua suurinta tyhjätilaa.

Jäätymis-sulamiskokeen näytteiden tyhjätila jätettiin korkeammaksi kuin yleensä laboratoriomassoja suhteitettaessa tai niiden ominaisuuksia tutkittaessa. Tämän valinnan perusteluina oli:

- veden täytyy päästä tunkeutumaan päällysteeseen, jotta vesi ja pakkanen voisivat vaikuttaa bitumin ja kiviaineksen välisiin sidoksiin ja rajapintoihin,
- tiellä asfaltin reikiintymistä esiintyy erityisesti levityskaistojen välisissä saumoissa, urapaikkausten tai reikäpaikkausten reunoissa eli yleisesti kohdissa, joiden tyhjätila saattaa jäädä korkeammaksi kuin ajouran keskialueella, jonka tyhjätila mitataan laatumittausten yhteydessä,
- ulkomailla käytetyissä jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimusmenetelmissä käytetään yleensä korotettua tyhjätila (esim. Lotman/SHRP ja SATS/BS).

Asfalttinäytteet valmistivat Destia Oy:n ja Lemminkäinen Infra Oy:n laboratoriot. Asfalttimassat tiivistettiin laboratorion keinujuvällä laatoiksi. Laatoista porattiin näytteet (D 100 mm), joiden molemmat päät sahattiin siten, että näytteen korkeudeksi tuli 60 mm. Näytteiden valmistajat määrittivät näytteistä tiheydet ja tyhjätilat.

Näytteiden valmistus tahdistettiin siten, että laattojen valmistus aloitettiin keskiviikkoisin ja poranäytteet toimitettiin VTT:lle seuraavana maanantaina. VTT järjesti poranäytteet kahteen ryhmään (tutkimusnäytteet ja referenssinäytteet) siten, että molempiin ryhmiin kuuluneiden näytteiden tyhjätilat (IPK eli imeytys-pintakuivamenetelmä) olivat keskimäärin mahdollisimman yhtä suuret.

Projektin alkuvaiheissa tehtyjen jäätymis-sulamiskokeiden perusteella todettiin, etteivät nesteputuksessa näytepurkeissa olleet asfalttinäytteet ehtineet kunnolla jäätyä ja sulaa 12 tunnin jäätymis-sulamissykliä aikana ja tulokset viittasivat siihen, etteivät alhaiset syklimäärät (6 - 20 kpl) tällä sykli pituudella saaneet aikaan niin merkittäviä vaurioita, jotta niiden perusteella voitaisiin todeta asfaltin jäätymis-sulamiskestävyys.

Projektin Menetelmätekniikan pienryhmän ja PANK Laboratoriotuimikunnan kokouksissa tehtyjen päätösten perusteella tehtiin alkuperäisestä tutkimussuunnitelmasta poikkeavia SMA16 /Koskenkylä päällysteen jäätymis-sulamiskokeita neljällä koesarjalla siten, että näissä kokeissa oli yksittäisen jäätymis-sulamissyklin pituus 24 h, syklien maksimimäärä 50 kpl ja näytteistä tutkittiin halkaisuvetolujuuden lisäksi myös jäykkyysmoduuli. Näissä kokeissa tutkittavien koesarjojen sisältö oli taulukon 4 mukainen.

Taulukko 4. Syklimäärän vaikutuksen selvittäminen neljällä SMA16-sarjalla.

		A	B	C	D
jäädytys-sulatussyklin pituus	h	24	24	24	24
syklien lukumäärä/koe	kpl	50	50	10	10
näytteen alin ja yli lämpötila	°C	-20 / 20	-20 / 20	-20 / 20	-20 / 20
neste, johon näytteet upotettu		3 % NaCl	vesi	3 % NaCl	vesi
jäädytys-sulatuskok. jälkeen		jäykkyyssmoduulikoe +15 °C:ssa			
moduulikokeen jälkeen		halkaisuvetolujuuskoe +10°C:ssa			

Epäsuoraan dynaamiseen vetoon perustuva jäykkyyssmoduuli tutkittiin samoista näytteistä kuin halkaisuvetolujuus. Jäykkyyssmoduulimittausten yhteydessä tehtiin näytteistä lisäksi ultraäänimittauksia, joilla pyrittiin selvittämään, erottaako ultraäänimittaus SMA-näytteen mahdollisia jäätymis-sulamisvaurioita näytteistä.

Näistä kokeista saatujen lupaavien tulosten perusteella päätettiin myöhemmin, että projektin vaiheen 1 jäljellä olleet kokeet korvattiin taulukon 5 lisäkokeilla.

Uusintakokeiden näytekostumukset

Jäädytys-sulatuslaitteen toimintahäiriön vuoksi uusittiin kahden SMA 16 massan jäätymis-sulamiskokeet. Uusintakokeissa tutkittiin syklimääriä 10 kpl ja 50 kpl käyttäen taulukon 6 mukaiset koesarjat:

- ”Patavuori KF, Bit opt, Vedessä”,
- ”Koskenkylä LT Bit 5,8 Vedessä”.

Uusintakokeisiin valmistettiin ja tutkittiin vain jäätymis-sulamiskokeeseen menevät näytteet, koska laitehäiriö ei vaikuttanut referenssinäytteiden tuloksiin (referenssinäytteet säilytettiin huoneilmassa lämpötilassa +20 °C). Jäätymis-sulamiskokeessa käytettiin nesteinä vain vettä. Näytteet olivat vesiupotuksessa sekä jäädytys-että sulatusvaiheen aikana. Näillä koostumuksilla oli aiemmin tutkittu sekä märkinä että kuivina halkaistut näytteet ja näitä tuloksia käytettiin vertailuaineistona.

Taulukko 5. Vaiheen 1 viimeiset jäätymis-sulamiskokeet (SMA 16).

Kalliomurske	Bitumilaji	Bitumipit. *)	Täytejauhe **)	Tyhjätilatavoite ***)	Jäädytys- ja sulatusvaihe	Jääd.-sulatussyklejä	Dyn. jäykk. mod. 15°C	Ultraääni	Sykl. jälk. HVL 10°C	Rinnakkaisnäytt.
		%		%		kpl				kpl
Patavuori	50/70	5,6	KF	6 - 7	3 % NaCl vedessä	50	x	x	x	5 + 5
										5 + 5
Koskenkylä	50/70	5,8	LT	6 - 7	3 % NaCl vedessä	50	x	x	x	5 + 5
										5 + 5
Koskenkylä	50/70	5,8	LT	6 - 7	3 % NaCl vedessä	10	x	x	x	5 + 5
										5 + 5
Patavuori	50/70	5,6	KF	6 - 7	3 % NaCl vedessä	10	x	x	x	5 + 5
										5 + 5
Näytteitä, yht.										80 kpl

*) Tilavuussuhteituksen perusteella optimibitumipitoisuus oli 5,6 % Patavuoren ja 6,0 % Koskenkylän kiviaineksilla.

**) KF = kalkkifilleri, LT = lentotuhka (samaa toimituserää kuin aiemmissa näytteissä).

***) Tyhjätilatavoite 6 - 7 % (sallittiin 6 - 8 %).

Taulukko 6. Uusintakokeiden näytteet.

Kallio- murske	Bitumi- laji	Bit. pit.*)	Täyte- jauhe**)	Tyhjätila- tavoite ***)	Jäädytys- ja sulatus- vaihe	Näytelämpötila min/max	Jääd.- sulatus- syklejä	Dyn. jäykk. mod. 15°C	Ultra- ääni	Sykl. jälk. HVL 10°C	Rinnak- kais- näytt.
		%		%			kpl				kpl
Pata- vuori	50/70	5,6	KF	6 - 7	vedessä	-20±2,5/+20±2,5	10 50	x	x	x	5 5
Kosken- kylä	50/70	5,8	LT	6 - 7	vedessä	-20±2,5/+20±2,5	10 50	x	x	x	5 5
Näytteitä, yht.											20 kpl

*) - ***) Alaviitteet samat kuin taulukolla 5.

SMA 16 massa Patavuoren murskeella sisälsi täytejauheena kalkkifilleriä ja bitumia optimipitoisuuden, joka oli 5,6 %. Koskenkylän kiviainesta käyttäen valmistetussa massassa täytejauhe oli lentotuhkaa ja bitumipitoisuus 5,8 % (0,2 %-yks. alle optimin).

Lentotuhkalla oli merkittävä lujittumistaipumus. Lujittumisen aikana lentotuhkan lämpötilan tulee olla Ruduksen Lentotuhkaohjeen mukaan vähintään +5 °C. Kylmemmässä lujittumista ei tapahdu, mutta rakenteen lämpötilan noustua ko. arvon yläpuolelle lujittuminen käynnistyy jossain määrin uudelleen. Vesi heikentää lentotuhkarakenteen lujuutta ja siksi se tulee suojata mahdollisimman pian. [Lentotuhkaohje]. Asfaltissa lentotuhkahiukkaset ovat kuitenkin sekoittuneina bitumiin, mistä syystä veden vaikutus asfalttimassan joukossa olevaan lentotuhkan ominaisuuksiin vähenee olennaisesti.

Vedenkestävyyskokeen näytteet

Jäädytys-sulatuskokeen tuloksia verrattiin vedenkestävyyskokeen tuloksiin. SMA16-massan vedenkestävyys tutkittiin kahdella sellaisella koostumuksella, joilla oli tutkittu myös jäätyminen-sulamiskestävyys. Näytevalmistus poikkesi standardin SFS-EN 12697-12 menetelmän B mukaisesta menetelmästä siten, että näytteiden tyhjätila jäätettiin korkeammaksi kuin standardin mukaisessa tavanomaisessa vedenkestävyyskokeen näytevalmistuksessa, taulukko 7.

Taulukko 7. Vedenkestävyyskokeen SMA 16 -näytteet.

Kallio- murske	Bitumi- laji	Bitumi- pit.*)	Täyte- jauhe **)	Tyhjätila- tavoite ***)	Poranäyte- määrä
		%		%	kpl
Patavuori	50 / 70	5,6	KF	6 - 7	20
Koskenkylä	50 / 70	5,8	LT	6 - 7	20
Näytteitä, yht.					40

*) - ***) Alaviitteet samat kuin taulukolla 5.

Tartukekokeilu/Korson ramppi

Syksyllä 2010 tehtiin Liikenneviraston tilauksesta kenttäkokeilu tartukkeen vaikutuksesta SMA-päällysteen ominaisuuksiin. Koealueiden sijainti ja rakentaminen on esitetty kohdassa 2.5.

Koetien päällystemassan sideaineen tartukepitoisuus valittiin Akzo Nobelin laboratoriossa Ruotsissa tehtyjen rullapullokoekokeiden peusteella [12]. SMA-massojen veden-

kestävyys- ja jäätymsulamiskestävyys tutkittiin VTT:n laboratoriossa ja ne on raportoitu erillisessä tutkimusselostuksessa [14] ja ne esitetään myös Asfadur-projektin raportissa (kohta 3.8.2). Korson liittymän tartukekokeilukohde muodostui siten yhdeksi Asfadur-projektin laboratoriokokeiden seurantakohteeksi.

Laboratorionäytteet valmistettiin asfalttiasemalla samaan aikaan ja samalla materiaalikoostumuksella kuin massoja valmistettiin Korson koekohteisiin. Tyhjätilatavoitteiden kohdalla tiekohteen päällysteet poikkesivat laboratorionäytteistä. Tiekohteen päällysteet tiivistettiin Asfalttinormien tyhjätilatavoitteiden mukaan. Laboratorionäytteiden tyhjätila säädettiin korkeammalle tasolle (tavoite 6–7 %, sallittiin 6–8 %).

Laboratorionäytteiden koostumus oli taulukon 8 mukainen:

Taulukko 8. Tartukekokeilun laboratoriotutkimusten SMA16- näytekostumukset.

Kalliomurske	Bitumilaji	Bit. pit.*)	Täytejauhe**)	Tartuke	Tartukepit.	Tyhjätilatavoite***)	Testi	Testin jälk. HVL 10°C	Pora- näytteitä
		%			% bitumista	%			kpl
Koskenkylä	50/70	6,0	KF	Wetfix AP17	0,4	6 - 7	Vedenkesto SFS-EN 12697-12	x	5+5
Koskenkylä	50/70	6,0	KF	Wetfix AP17	0,4	6 - 7	Jäädytys-sulatus 10 sykli (-20/+20°C)	x	5+5+5
Koskenkylä	50/70	6,0	KF	Ei		6 - 7	Vedenkesto SFS-EN 12697-12	x	5+5
Koskenkylä	50/70	6,0	KF	Ei		6 - 7	Jäädytys-sulatus 10 sykli (-20/+20°C)	x	5+5+5
YHTEENSÄ									50 kpl

*) Sama bitumipitoisuus ja täytejauhe kuin koetiellä.

***) Laboratoriokokeissa tyhjätilatavoite 6-7 % (sallittiin 6-8 %).

2.2.3 Jäätymsulamiskoemenetelmä

Ennen jäätymsulamissykliä aloitusta tutkimusnäytteet imeytettiin alipaineella eksikkaattorissa. Jäätymsulamiskokeissa asfalttinäytteet jäädytettiin ja sulatettiin useita kertoja. Jäätymsulamissyklit toteutettiin kahdella vaihtoehtoisella menetelmällä:

- Menetelmä A: Näytteet jäädytettiin kylmässä ilmassa ja sulatettiin vedessä.
- Menetelmä B: Näytteet jäädytettiin ja sulatettiin muovipurkeissa vesi- tai suolaliuokseen upotettuina (1 näyte/purkki).

Molemmat menetelmät voidaan toteuttaa joko automaattisella ohjauksella varustetulla jäädytys-sulatuslaitteella tai käsityönä (esim. kylmähuoneen tai pakastarkun) avulla.

Suurin osa jäätymsulamiskokeista tehtiin menetelmällä B käyttäen automaattista jäädytys-sulatuslaitetta, jossa tutkimusnäytteet olivat sekä jäädytys- että sulamisvaiheen aikana upotettuina joko veteen tai 1–3 % suolaliuokseen. Vesi oli vesijohtovettä ja suola veteen liuotettua liukkaudentorjuntasuolaa (NaCl). Ennen upotusta näytteiden tyhjätilat oli imeytetty alipaineessa täyteen samaa ”upotusnestettä”.

Referenssinäytteet säilytettiin jäätymsulamiskokeen ajan huoneilmassa (20–22 °C). Ne imeytettiin alipaineessa ennen halkaisuvetolujuuskoetta. Jäätymsulamiskokeen

missykleissä olleiden näytteiden ja niiden referenssinäytteiden halkaisuvetolujuus tutkittiin lämpötilassa 10 °C (SFS-EN 12697-23). Molempien näytesarjojen kaikki näytteet olivat halkaisuvetolujuuskokeen aikana samassa 100 % kyllästysasteessa (huokoset täynnä vettä tai suolaliuosta). Jäädytys-sulamiskestävyys laskettiin kaavalla 5.

$$F = 100 \times \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (5)$$

jossa

F = asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyys [%]

σ_1 = jäätymis-sulamissykleissä olleiden näytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvo

σ_2 = saman ikäisten vertailunäytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvo.

Jäädytys-sulamiskestävyuden tutkiminen automaattisella laitteella

Tutkimuksessa käytetty, automaattisesti toimiva VTT:n jäädytys-sulatuslaitteisto koostuu jäädytys-sulatusarkusta, sen lämpötilan ohjausyksiköstä, ulkoisesta neste-säiliöstä, ja mikrotietokoneesta, ks. liite 4.

Näytteet olivat jäätymis-sulamissykliä aikana muovipurkeissa vesi- tai suolaliuosu-potuksessa. Purkkien pohjalla oli muoviritilä, jotta näyte ei koskettanut purkin pohjaa. Näytteiden yläpinnan upotussyvyys oli aluksi 20 mm ja myöhemmissä kokeissa 10 mm.

Jäädytys-sulatusarkun näytealtaan pohjalla oli ritilä, jolle näytepurkit asetettiin. Jäädytys-sulatuslaitteen kannessa oli tuulettimet, joilla kierrätettiin ilmaa arkun sisällä. Vesipurkeissa olleet näytteet jäädytettiin jäädytysvaiheen aikana arkun kylmän sisäilman avulla. Sulatusvaiheen ajaksi arkun näytealtaaseen pumpattiin vettä ulkoisesta vesisäiliöstä. Tämä vesi sulatti purkeissa olevan jään ja jäätyneet näytteet ja lämmitti ne sulamisvaiheen tavoitelämpötilaan.

Näytteiden lämpötilamuutoksia ohjattiin mikrotietokoneohjelmalla ja yhteen ylimääräiseen näytteeseen asennetulla lämpötila-anturilla. Lämpötilanohjausnäytteen ja jäädytys-sulatusarkun sisäilman lämpötila tallennettiin jatkuvatoimisesti tietokoneen muistiin.

Jäädytys-sulamiskestävyuden tutkiminen käsityönä

Jäätymis-sulamiskestävyys voidaan tutkia myös käsityönä ilman automaattista laitetta. Lemminkäisen laboratoriossa käsityönä tehtyjen jäätymis-sulamiskokeiden näytteet porattiin laatasta. Niiden päitä ei sahattu. Näytteet (D 100 mm, h 70 mm) olivat upotettuina samanlaisiin muovipurkkeihin kuin automaattisesti ohjatussa kokeessa. Purkeissa koko testin ajan nesteupotuksessa olleita näytteitä siirrettiin käsityönä päivittäin pakkahuoneesta (-20 °C) huoneenlämpötilaan. Jäätymis-sulamissykliä pituus oli 24 h, josta jäätymisvaihe kesti 16 h ja sulamisvaihe 8 h. Syklimäärä oli 10 kpl. Viikonlopun ajan tutkimusnäytteet olivat jäässä.

Käsityömenetelmän sulatusolosuhde poikkesi automaattisen menetelmän sulatusolosuhteesta siten, että käsityömenetelmässä vesiupotuksessa oleva näyte ja sitä ympäröivä purkissa oleva vesi sulatettiin huoneilmassa (purkkia ympäröi ilma). Automaattisessa laitteessa näyte purkit olivat sulatusvaiheessa vesiupotuksessa (vettä ei kierrätetty sekoittamalla).

Purkkien upotuksella suureen vesiastiaan sulatusvaiheessa ja vettä kierrättämällä voitaisiin tarvittaessa nopeuttaa sulamista. Myös käsityömenetelmää käytettäessä tulee varmistaa lämpötilamittauksin, että näytteen sisällä oleva lämpötila on jäätymis-sulamissykliä aikana menetelmäkuvauksen lämpötilan ohjealueen mukainen, liite 5.

Jäätymis-sulamiskoemenetelmän kehitys tutkimuksen aikana (menetelmät A ja B)

Jäätymis-sulamiskoemenetelmää kehitettiin tutkimuksen aikana kokeillen erilaisia jäätymis-sulamissykliä pituuksia, lämpötilojen muutosnopeuksia, minimi- ja maksimilämpötiloja, upotusnesteitä ja näytteiden peitesyvyyskokoja.

Suurin osa jäätymis-sulamiskokeista tehtiin automaattisesti toimivalla jäätymis-sulamislaitteella menetelmän B mukaisesti. Näytteet olivat koko menetelmän B mukaisen jäätymis-sulamiskokeen aikana upotettuna nesteeseen, joka oli vesijohtovettä tai suolaliuosta. Liuoksina kokeiltiin 1- ja 3-prosenttisia NaCl-suolaliuoksia. Erilaisten kokeilujen jälkeen päädyttiin projektin vaiheen 1 lopulla seuraavaan jäätymis-sulamiskoemenetelmän toteutustapaan:

- Asfalttimassasta valmistettiin laattoja, joiden paksuus oli 70–75 mm. Laatoista porattiin ja sahattiin asfalttinäytteet (D 100 mm, h 60 mm, rinnakkaisnäytteitä 5 kpl).
- Kun asfalttimassan valmistuksesta oli kulunut viisi päivää, jäätymis-sulamiskokeeseen menevät näytteet imeytettiin alipaineessa eksikkaattorissa menetelmän SFS-EN 12697-12 mukaisesti.
- Sen jälkeen jäätymis-sulamiskokeeseen menevät näytteet asetettiin muovipurkkeihin, joiden pohjalla oli muoviritilä. Purkkien tyyppi oli Superfos Unipak 5141, sisämitat h = 150 mm, D(pohja) = 130 mm, D(yläreuna) = 155 mm.
- Purkit täytettiin vedellä siten, että näytteiden yläpinnan peitti 10 mm paksu vesikerros. Purkit suljettiin muovikansilla, asetettiin jäädytys-sulatuslaitteeseen ja jäätymis-sulamiskoe aloitettiin.
- Näytteet olivat vesiupotuksessa näytepurkeissa sekä jäädytys- että sulatusvaiheen ajan. Jäädytysvaiheessa näytealtaassa purkkeja ympäröivä vesi pumpattiin ulkoiseen vesisäiliöön ja purkeissaan nesteupotuksessa olleet näytteet jäädytettiin kylmän ilman välityksellä. Sulatusvaiheen alkaessa ulkoisesta vesisäiliöstä pumpattiin noin +20 °C lämpötilassa oleva vesi jäädytys-sulatuslaitteen altaaseen. Huoneenlämpöinen vesi sulatti purkeissa olleen veden ja asfalttinäytteet.
- Yhden jäätymis-sulamissyklin pituus oli 24 h.
- Yhden massakoostumuksen jäätymis-sulamiskokeessa oli 3–4 kpl viiden näytteen sarjoja. Yhdelle sarjalle tehtiin 10 jäätymis-sulamissykliä toiselle sarjalle 50 sykliä ja kolmas ja mahdollinen neljäs sarja olivat vertailunäytesarjoja, jotka säilytettiin syklien ajan huoneenlämpötilassa ritilällä.
- Kun valittu syklimäärä oli toteutettu, näytteet otettiin jäädytys-sulatuslaitteesta (viimeisen sulatussyklin lopussa).
- Märkinä koestettavat vertailunäytteet imeytettiin samana päivänä eksikkaattorissa ja temperointiin ennen halkaisuvetoluuskoetta vesiupotuksessa lämpötilaan +10 °C. Märkinä tutkittavat näytteet otettiin halkaisuvetoluuskokeeseen suoraan vesiupotuksesta.

- Useiden jäätymis-sulamiskokeiden yhteydessä tutkittiin lisäksi neljäs vertailunäytesarja, jonka näytteiden halkaisuvetolujuus tutkittiin kuivana, (koska vedenkestävyysskokeessa SFS-EN 12697-12) vertailunäytteet halkaistaan kuivina).
- Jäätymis-sulamiskokeessa olleille näytteille ja vertailunäytteille tehtiin sen jälkeen jäykkyyssmoduulikoe SFS-EN 12697-26C (15 °C), ultraäänikoe ja halkaisuvetolujuuskoe SFS-EN 12697-23 (10 °C).

Projektin loppuvaiheessa tehtiin jäätymis-sulamiskokeita automaattisella laitteella myös menetelmällä A, jossa ei käytetty näytenäytteitä, vaan näytteet olivat koko testin ajan laitteen näytealustalla ritilän päällä. Jäätymisvaiheessa näytteitä ympäröi kylmä ilma ja sulamisvaiheessa huoneilman (+20...+22 °C) lämpöinen vesi.

Automaattisella laitteella on yhden jäätymis-sulamissyklin kesto aika 12 h menetelmällä A ja 24 h menetelmällä B. Menetelmät A ja B on esitetty yksityiskohtaisesti projektin aikana laaditussa menetelmäkuvaussessa PANK 4306. Jäätymis-sulamiskokeen näytteiden lämpötilan sallittu vaihteluväli on esitetty liitteessä 5.

2.2.4 Ultraäänimittaukset

Ultraäänimenetelmä perustuu siihen, että äänen (pulssin) etenemisnopeus kiinteässä materiaalissa (esim. betonissa) riippuu materiaalin tiheydestä, homogeenisuudesta ja elastisista ominaisuuksista. Materiaalin laatua (ja eheyttä) sekä jäykkyyttä voidaan arvioida äänen (pulssin) etenemisnopeuden avulla.

Sauvamaaisessa kappaleessa tapahtuvan pitkittäissuuntaisen aallon (pulssin) etenemisnopeus voidaan esittää kaavan 6 avulla.

$$v = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho}\right) \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

Kaavassa:

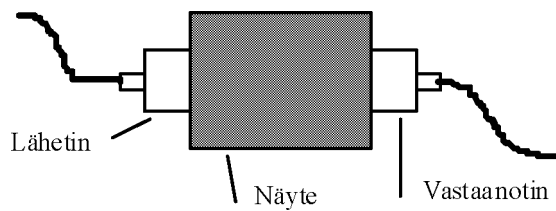
E = dynaaminen moduuli

ρ = tiheys

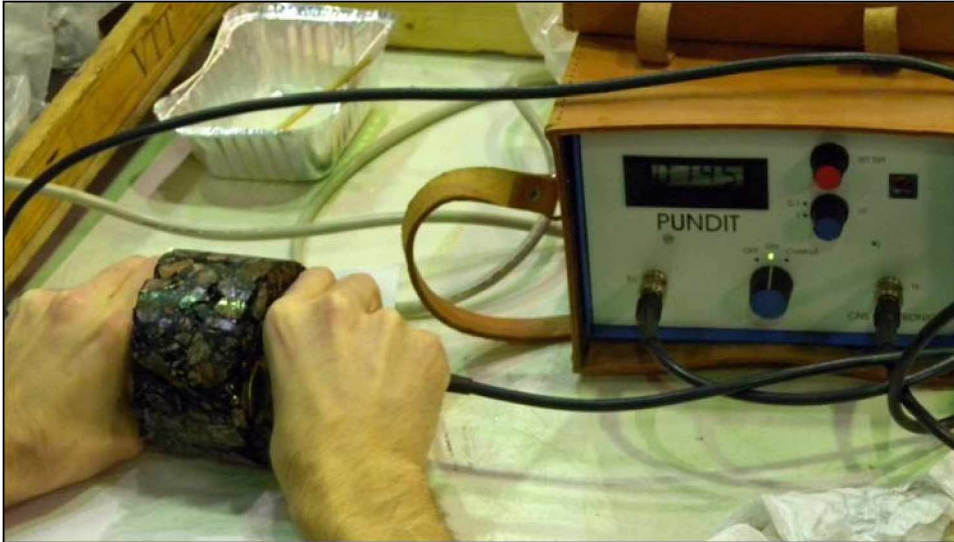
ν = Poisson luku

v = nopeus.

Ultraäänimittauksen toimintaperiaate on seuraava. Mittalaite lähettää lähetin-kappaleeseen korkeataajuisen pulssin (tai pulssijonon, taajuus n. 50 kHz), joka muunnetaan lähettimessä sähköisestä värähtelystä mekaaniseksi suunnatuksi värähtelyksi pietsosähköisen elementin avulla. Lähettimestä lähtenyt aaltoliike kulkee näytekappaleen läpi ja saapuu vastaanottimeen, jossa mekaaninen värähdysliike muunnetaan takaisin sähköiseen muotoon. Mittalaitteen elektroniikka laskee pulssin kulkuajan näytteessä. Lähetin-/vastaanotinparit kalibroidaan aina ennen mittausta tunnetun kappaleen avulla. Lähetin-/vastaanotinkappaleen kosketus näytteen kanssa varmistetaan ”liisterin” avulla. Mittausjärjestelyn periaate on esitetty kuvassa 2 (kuvassa näyte on kyljellään) ja toteutus kuvassa 3.



Kuva 2. Ultraäänimittausjärjestelyn periaate.



Kuva 3. Ultraäänien kulkunopeuden mittaus asfalttinäytteestä. Mittausanturit näytteen molemmilla pohjapinnoilla.

2.3 Vertailukohteet tiestöllä

Jäätymis-sulamiskestävyystutkimusten laboriokoetuloksille pyrittiin saamaan vertailuaineisto samaan aikaan toteutettuihin päällystysurakoihin sisältyneistä päällysteistä, joilla oli mahdollisimman sama koostumus. Vertailukohteista tiestöllä kerättiin havaintoja päällysteiden mahdollisista jäätymis-sulamisvaurioista. Niistä ei kerätty kohdekohtaisesti tietoa jäätymis-sulamissykliä määristä.

Vertailukohteiden asfalttien koostumukset on esitetty taulukossa 9. Ne poikkesivat osittain laboriokoetusten koostumuksista, mitkä on kuvattu kohdassa 2.2.2.

Vertailukohteiden olosuhdetietoina pyrittiin selvittämään myös kohteiden suolausmääriä.

2.3.1 Vertailukohteiden päällysteet

Vertailukohteet/Koskenkylän murske

Urakkakohteissa toteutunut massaresepti poikkesi tilaajan urakkavaatimuksista johdun jäätymis-sulamiskestävyyskokeiden reseptistä siten, että bitumityyppinä oli 70/100 ja kuituna käytettiin Viatop-granulaattikuitua, taulukko 9. Tällä reseptillä oli

päällystetty mm. useita urakan U2/2008-kohteita (esim. Lahdenväylää, Mt. 140 jne) ajanjaksolla 15.7.–3.11.2008.

Asfaltin kiviaineksena oli Koskenkylän kalliomurske ja bitumipitoisuus 6,0 %. Kiviaineksen koko tuotantoerän kuulamylykeskiarvo oli 5,6 (5,3–5,8) ja kiintotiheys 2680 kg/m³ (lajite 11/16 mm). Massaan lisättiin Viatop Premium selluloosakuitua. Vuonna 2008 käytettiin täytejauheena seosta, joka sisälsi kalkkifilleriä 5–6 % ja Naantalin lentotuhkaa 2–3 %. Vuoden 2009 kohteessa oli täytejauheena pelkkä kalkkifilleri.

Laboratorionäytteet poikkesivat tielle levitetystä massoista kuidun osalta, sillä laboratorionäytteet sisälsivät EKI-selluloosakuitua.

Taulukko 9. Tiekohteiden vertailupäällysteiden koostumus (SMA 16/90...100).

Kohde n:o	Tie-luokka	Päällystys-pituus	Massa-tyyppi	Massa-määrä	Työ-menetelmä	Kivi-aines	Täytejauhe	Bitumi-laji	Bit.pit.	Kuitu
		m		kg/m ²					%	
Päällystysvuosi 2008										
1	mt	3559	SMA 16	90	TJYR / LTA	Koskenkylä	KF 5-6% + LT (Naantali 2-3%)	50/70 Nynas	6,0	Viatop Premium
2	mt	2898	SMA 16	90	LJYR					
3	kt	4298	SMA 16	90	LJYR	Kytäjä	LT 9,0 %	50/70	5,8	
4	vt	3400	SMA 16	100						
5	vt	4300	SMA 16	100		Patavuori	LT 8,5 %	50/70	5,5	
Päällystysvuosi 2009										
6	mt	779	SMA 16	100	LJYR	Koskenkylä	KF	50/70 Nynas	6,0	Viatop Premium
7	vt	8774	SMA 16	100		Kytäjä	LT 9,0 %	50/70	5,8	
8	vt	640	SMA 16	100		Patavuori	LT 8,5 %	50/70	5,5	
YHTEENSÄ		28648								

Vertailukohteet/Patavuoren murske

Kahdessa vertailukohteessa SMA 16/100 -päällysteiden kiviaineksena oli Patavuoren murske, kiviaines lentotuhkaa ja bitumipitoisuus 5,5 %, taul. 9.

Laboratoriokokeissa käytettiin Patavuoren mursketta sisältävien massojen täytejauheena kalkkifilleriä ja bitumipitoisuutena 5,6 %, taul. 1.

Vertailukohteet/Kytäjän murske

Kahdessa vertailukohteessa massan kiviaines oli Kytäjän mursketta, joka ei ollut mukana laboratoriokokeissa. Täytejauhe oli lentotuhkaa. Kytäjän kiveä käytettäessä bitumipitoisuus oli tiekohteissa 5,8 %.

2.4 Veden ja kuormitusten yhteisvaikutus

2.4.1 Yleistä

Veden ja raskaiden ajoneuvojen renkaiden aiheuttamien kuormitusten yhteisvaikutus oli arvioitu on erääksi mahdolliseksi asfalttipäällysteiden reikiintymisvaurioiden aiheuttajaksi. Tämän ilmiön tutkimiseksi ei ollut käytettävissä olemassa olevaa laboratoriokoemenetelmää.

VTT kehitti projektin aikana uuden tutkimusmenetelmän ja siihen soveltuvan laitejärjestelyn, jonka avulla pystyttiin aiheuttamaan veteen upotetun asfalttinäytteen yläpintaan dynaamisia, syklisesti toistuvia, nopeita vesipaineiskuja. Menetelmän avulla tutkittiin laboratorio-olosuhteissa veden ja kuormituksen yhteisvaikutusta asfalttipäällysteeseen. Näissä kokeissa tutkittiin myös tartukkeen ja jäätymis-sulamisykliä vaikutusta vesipaineiskujen kestävytyteen.

2.4.2 Vesipaineiskumenetelmän kehittäminen

2.4.2.1 Näytteet

Vesipaineiskukokeen kehitysvaiheen ensimmäisissä kokeissa käytettiin menetelmän ”viritysnäytteinä” Destia Oy:n toimittamia, (samaa aikaan käynnissä olleen ns. Korsoson rampin) tartuketutkimuksen SMA-massasta 26.9.2010 valmistettuja näytteitä. Näytteisiin käytetty asfalttimassa oli valmistettu Destian Maantiekylän asfalttiaseamalla. Osa näytteistä sisälsi tartuketta ja osa oli ilman tartuketta valmistettua referenssimassaa.

SMA-näytteiden (D150, h 60 mm) koostumustiedot on esitetty taulukossa 10 ja näytekohtaiset tyhjätilatiedot taulukossa 11. Laboratoriokokeen näytteissä oli tilavuussuhteituksen mukainen optimikoostumus, mutta niiden tyhjätila jätettiin näytevalmistuksen yhteydessä tavanomaista korkeammaksi, jotta vesi pääsisi tunkeutumaan tehokkaasti näytteisiin. Näytteitä oli säilytetty noin kuukauden ajan huoneenlämpötilassa ennen VTT:lle toimittamista (25.10.2010) ja sen jälkeen niitä säilytettiin +5 °C:ssa. Tartuketutkimuksen koalueiden rakentamista on kuvattu kohdassa 2.5.

Taulukko 10. Vesipaineiskukokeen esikoenäytteiden koostumustiedot.

	Sis. Tartuketta	Ei sis. Tartuketta
Tunnus	W	R
Päällystelaji	SMA 16	SMA 16
Kiviaines	Koskenkylä	Koskenkylä
Bitumi	50/70 Nynas	50/70 Nynas
Bitumipit.	5,90 %	5,90 %
Tartuke	Wetfix AP17	Ei tartuketta
Tartukepitoisuus	0,4	-
Kuitu	granuloitu	granuloitu
Kuitupitoisuus	0,35	0,35
Tyhjätila	5,8 - 7,3	5,4 - 6,9

Taulukko 11. Näytekohtaiset tiheydet ja tyhjätilat (SFS-EN 12697-8).

	Näyte			Massan tiheys	Pääll. Tiheys	Tyhjä- tila
	D [mm]	h [mm]				
R 1	149,4	60,2	SMA16	2431	2299	5,4
R 2	149,4	60,1	SMA16	2431	2266	6,8
R 3	149,4	59,9	SMA16	2431	2262	6,9
W 4	149,4	59,9	SMA16	2431	2271	6,6
W 5	149,4	60,1	SMA16	2431	2270	6,6
W 6	149,4	59,9	SMA16	2431	2270	6,6
W 7	149,4	60,2	SMA16	2431	2260	7,0
W 8	149,4	60	SMA16	2431	2291	5,8
W 9	149,4	59,8	SMA16	2431	2253	7,3

W = tartuketta sisältävä näyte ja R= referenssinäyte.

2.4.2.2 Laitteen protoversio

Vesipaineiskukokeita varten VTT kehitti tutkimuslaitteen ensimmäisen protoversion, jossa asfalttinäytettä pystyttiin kuormittamaan vesiupotuksessa syklisellä puristuskuormituksella. Puristusmännän (D 96 mm) ja näytteen yläpinnan välissä kokeiltiin erilaisia kumitiivisteitä, joiden avulla pyrittiin tehostamaan vesipaineiskujen vaikutuksen leviämistä puristusvaiheissa näytteen veden täyttämään huokostilaan. Puristusmääntään kiinnitettiin jouset, joiden avulla mäntä pystyttiin nostamaan lepovaiheen aikana irti kumitiivisteestä, kuva 4.

Kun kumitiivistettä ei käytetty, mäntää ei nostettu irti asfaltin pinnasta lepovaiheen aikana. Laitteiston kuormitus syklien erilaiset suoritustapavaihtoehdot ohjelmoitiin koetta automaattisesti ohjaavaan tietokoneeseen ja sopivat syklit haettiin kokeilemalla.



Kuva 4. Vesipaineiskunkestävyyden kuormituslaite (protoversio).

Laitte kuormitti asfalttinäytettä yksiakselisella dynaamisella kuormituksella. Laitteen kuormitusmännän halkaisija oli 96 mm. Kun käytettiin halkaisijaltaan 150 mm olevia näytteitä, ympäröi kuormitus aluetta 27 mm leveä asfalttinen sivutuki. Kuormitus syklien toimintaa testattiin aluksi ilman asfalttinäytettä teräs vasten teräspintaa tai teräs vasten kumitiivistettä:

- ilman vesiupotusta,
- vesiupotuksessa ilman tiivistettä ja
- vesiupotuksessa tiivisteiden kanssa.

2.4.2.3 Menetelmän protoversio

Kumitiiviste asfaltin ja kuormitusmännän välissä

Kuormitusmännän reuna-alueen ja asfaltin välissä kokeiltiin esikoesarjan aluksi erilaisia kumitiivisteitä, joiden avulla muodostettiin näytteen yläpinnan päälle pieni vesisäiliö, josta puristettiin kuormitusmännän avulla vettä asfalttinäytteen huokostilaan näytteen yläpinnan kautta.

Kuormitus toteutettiin kumitiivistettä käytettäessä seuraavasti:

- kuormitus syklin alussa ajettiin kuormituslevyn alapinta 1 mm etäisyydelle asfalttinäytteen päällä olevasta kumitiivisteestä,
- sen jälkeen ajettiin kuormituslevy kiinni kumitiivisteeseen ja jatkettiin saman tien puristusta voimaohjattuna valitulla voimalla, kunnes asetettu voimataso saavutettiin. Puristusvaiheessa puristettiin paineiskulla kumitiiviste avulla muodostetusta vesisäiliöstä vettä asfaltin yläpinnan huokosiin. Kun kumitiiviste puristui kokoon, paine lisäsi suoraan näytteen huokostilan vesipainetta ja aiheutti myös suoraan puristavan kuormituksen näytteen reuna-alueilla,
- lepovaiheessa kuormitusmäntä nostettiin 3 mm etäisyydelle kumitiivisteestä, jolloin kumitiiviste avulla täyttyi uudelleen vedellä,
- sen jälkeen samanlainen kuormitus sykli toistettiin useita kertoja,
- kuormitukset lopetettiin, kun mitattu puristusmännän siirtymä saavutti ennalta valitun raja-arvon.

Ensimmäisissä dynaamisen paineiskun asfalttikokeissa käytettiin seuraavia koestusparametrejä:

- Kuormitus syklin muoto oli ns. ”kanttiaalto”,
- Asfalttinäytteen ja veden lämpötila oli kokeen alussa +5 °C (veden lämpötilan muutoksia kokeen aikana mitattiin termoelementtilankalämpömittarilla). Näytteen kuormitus sykli nostivat näyteastian veden ja siinä olevan näytteen lämpötilaa. Näytteen lämpötilan nousun välttämiseksi säädettiin puristuslaitteen kaapissa olevan ilman lämpötila alhaisemmaksi kuin näytteen koestuslämpötila. Ilman lämpötila valittiin siten, että näytteen lämpötila pysyi kuormituksen aikana +5 °C:ssa,
- Yksittäisen näytteen testaukseen sai kulua enintään noin 2 h (max 3000 sykliä),
- Näyte pyrittiin ajamaan murtoon valitussa ajassa toistuvilla vesipaineiskuilla. Näytteen murtamiseen tarvittava vesipaineiskujen määrä pyrittiin selvittämään kokeellisesti,
- Koe suunniteltiin siten, että näytteen vaurioituminen saadaan aikaan suoraan vesipaineiskuilla, jotta ei tarvittaisi referenssinäytettä eikä erillistä lujuuskoetta (esim. halkaisuvetolujuus) vesipaineiskurasituksen jälkeen,
- Aluksi aloitettiin alhaisella paineella (500 kPa) ja kun se ei saanut näkyviä muutoksia aikaan, painetta nostettiin rajaa, jossa näyte rikkoontui (enältä valitussa lämpötilassa ja koestusajassa) tai sen kokoonpuristuma kuormitus suunnassa saavutti valitun raja-arvon 12 mm.

Kapea kumitiiviste

Esikokeissa kokeiltiin ensin kapeaa rengasmaista kumitiivistettä. Kumimatosta leikatun tiivisterenkaan ulkohalkaisija oli 100 mm, sisähalkaisija 85 mm ja paksuus 6 mm. Kumitiiviste oli syklin aikana näytteen ja kuormitusmännän reuna-alueen välissä.

Puristusvaiheen aikana kuormitusmäntä puristi vettä kumitiivisterenkaan sisäpuolelta päällysteen yläpinnan huokosiin. Kuormituksen lepovaiheen aikana mäntä nostettiin irti kumitiivisteestä, jotta kumitiivisterenkaan sisäpuolelle jäävä vesitasku täyttyi uudelleen edellisen kuormituksen jälkeen.

Kapea kumitiiviste ei pysynyt kuitenkaan lepovaiheen aikana kunnolla paikoillaan, vaikka se oli tuettu sivusuunnassa metallirenkaalla. Kumitiivisteen liikkuminen esti mäntää liikkumasta suunnitellulla tavalla ja aiheutti riskin voima-anturin vaurioitumisesta näytteen vaurioitumisasteen kasvaessa. Tästä syystä tämän tyyppisestä kapeasta kumitiivisteestä jouduttiin luopumaan.

Leveä kumitiiviste

Sen jälkeen kokeiltiin leveän kumitiivisteen soveltuvuutta koejärjestelyyn. Kumitiivisteen sivusuuntaisen liikkeen estämiseksi muutettiin kumitiivisteen mittoja siten, että sen ulkoläpimitta oli 150 mm (= asfalttinäytteen läpimitta) ja sisäläpimitta 75 mm. Kumitiiviste oli siten asfalttinäytteen ja kuormitusmännän reuna-alueen välissä ja ulottui asfalttinäytteen yläpinnan reunaan asti. Kumitiivisteen sivusuuntainen siirtyminen estettiin tiivisteen ulkoreunoihin kiinnitetyillä kulmarauodoilla, kuva 5. Muutoin kumitiiviste oli vapaasti asfalttinäytteen päällä.



Kuva 5. Vesipaineiskukokeessa käytetty leveä kumitiiviste ja sen sivutuet.

Aksiaaliset vesipaineiskut aiheuttivat leveään kumitiivisteeseen syklistä vaakasuuntaista venymistä ja kutistumista kuormitusmännän reuna-alueella, jossa mäntä puristi voimakkaasti kumitiivistettä asfalttia vasten. Puristusvaiheen aikana kumitiivisteen muodonmuutokset vaakasuunnassa, veden nopea virtaus kumitiivisteen ja asfaltin pinnan välissä sekä männän reuna-alueen puristusvoimat muodostivat renkaan muotoisen uran asfaltin pintaan männän reuna-alueiden kohdalle.

Jotta näyte pysyisi paikallaan vesiastiassa leposyklin aikana, jouduttiin se tukemaan sivusuunnassa metallisilla tukipaloilla, jota estivät näytteen muodonmuutoksen sivusuunnassa. Näytekorkeuden muutosta ei pystytty mittaamaan kovin tarkasti vesipaineiskujen määrän funktiona, koska kumitiivisteen paksuuden muutos oli mukana puristusleukojen siirtymätuloksissa.

Kuormitus ilman kumitiivistettä

Seuraavaksi kokeiltiin vesipaineiskukokeen suoritusta vesiupotuksessa olleelle näytteelle ilman kumitiivistettä. Tällöin pystyttiin puristusleukojen siirtymän perusteella

määrittämään näytekorkeuden muutos vesipaineiskujen määrän funktiona. (Siirtymäantureita ei käytetty, koska siirtymä oli huomattavan suuri kokeen aikana).

Syklin lepovaiheen pituus oli 1,5 s. Lepovaiheen aikana mäntä puristi pienellä voimalla (50 N) näytteen yläpinnan kuormitusalueella, jotta näyte pysyi paikallaan. Laite oli ohjelmoitu siten, että se ylläpiti kuormitusvaiheen aikana maksimivoimaa 0,2 s ajan. Yhden vesipaineiskusyklin kokonaispituus oli noin 2,5 s.

2.4.2.4 Laite- ja menetelmävaihtoehdon valinta

Edellä kuvattujen kokeiden tulosten perusteella projektin menetelmäteknisen pienryhmän kokouksessa päätettiin, että

- Korson rampin tartuketutkimuksen massojen dynaamisissa paineiskukokeissa käytetään laitevaihtoehtoa, jossa näytteen ja kuormitusmännän välissä ei ole kumitiivistettä ja laite kuormittaa vesiupotuksessa olevaa näytettä suoraan kuormitusmännän dynaamisilla puristuksilla.
- Kokeessa käytettävän sylinterin muotoisen asfalttinäytteen korkeus on 60 mm, asfalttinäytteen pohjan läpimitta 150 mm ja ympyrän muotoisen kuormitusalueen läpimitta 96 mm.
- Männän kuormitusalueen ulkopuolelle jäävä asfalttinäytteen reuna-alue muodostaa näytteelle sivusuuntaisen tuen, kun näytettä kuormitetaan aksiaalisesti nopeilla kuormitusykleillä.
- Yksittäisen kuormitusyklin pituudeksi valittiin kokeiden perusteella 2,5 s ja tällöin 3000 syklin testaus kesti noin 2 h.
- Asfalttinäytteen koestuslämpötilaksi valittiin ensimmäisissä kokeissa +5 °C ja vesipaineiskujen enimmäismääräksi rajattiin 3000 kpl.

2.4.3 Ylisuuren tyhjätilan vaikutus

2.4.3.1 Näytteet

Vesipaineiskukokeen toisen koestuserän avulla pyrittiin selvittämään, mikä vaikutus ylisuurella tyhjätillä olisi SMA-päällysteen vesipaineiskunkestävyyteen. Koestuserän näytteiden tyhjätilat olivat taulukon 12 mukaiset. Massan koostumus oli seuraava:

- kiviaines Koskenkylä
- # 0,063 mm läpäisy noin 5 % (edellisissä näytteissä oli hienoainesta 10–11 %) ja
- bitumipitoisuus noin 5,2–5,4 %.
- tyhjätilatavoite (IPK) oli noin 8 % tai vähän yli (vaihteluvälin tavoite 8–10 %),
- valmistettiin 3 asfalttilaattaa, joista saatiin yhteensä 18 näytettä
- näyte koko D 150, h 60 mm.

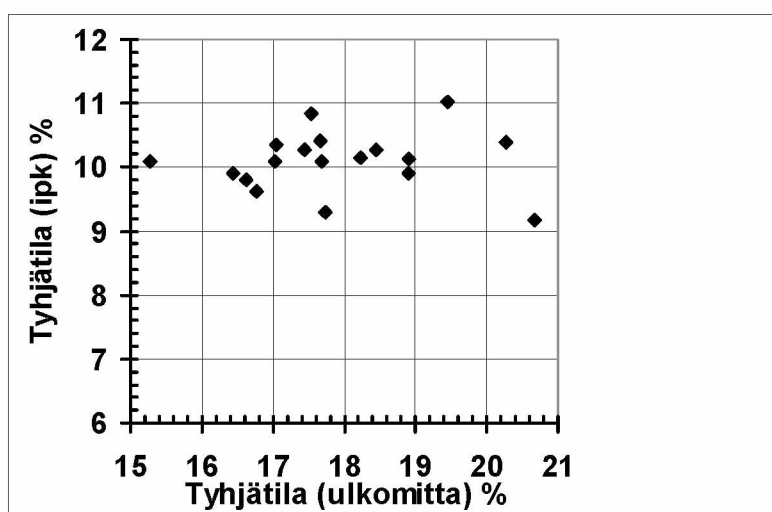
Taulukko 12. Toisen valmistuserän SMA-näytteiden tyhjätilat (päällysten tiheys IPK ja ulkomittamenetelmä)

näyte	päällysteen tiheys		tyhjätila	
	ipk	ulkomitta	ipk	ulkomitta
1	2228	2066	9,9	16,4
2	2231	2062	9,8	16,6
3	2200	1992	11,0	19,5
4	2223	2005	10,1	18,9
5	2223	2095	10,1	15,3
6	2246	1962	9,2	20,7
7	2217	2052	10,4	17,0
8	2205	2039	10,8	17,5
9	2222	2022	10,1	18,2
10	2215	2036	10,4	17,7
11	2223	2052	10,1	17,0
12	2219	2042	10,3	17,4
13	2243	2035	9,3	17,7
14	2235	2059	9,6	16,8
15	2223	2036	10,1	17,7
16	2228	2006	9,9	18,9
17	2219	2017	10,3	18,4
18	2216	1972	10,4	20,3

Valitun tavanomaista korkeamman tyhjätilan omaavien tasalaatuisten näytteiden valmistaminen laboratoriossa osoittautui vaikeaksi. Valmistettujen näytteiden tyhjätila vaihteli:

- välillä 9,2–11,0 %, kun näytteen kappaleitiheys määritettiin IPK-menetelmällä,
- välillä 15,3–20,3 %, kun kappaleitiheys määritettiin ulkomittamenetelmällä, taulukko 12, kuva 6.

SMA-näytteiden tyhjätilatulos riippui siten määrittämenetelmästä. Jos päällysteen kappaleitiheyden arvona käytetään Asfalttinormien SMA-päällysteille edellyttämää IPK-menetelmän mukaista tulosta, näytteiden tyhjätilan vaihteluväli olisi 9,2–11 %. Näytteet eivät siten täyttäneet enää SMA-päällysteen tyhjätilavaatimusta, kuten tässä kokeessa oli tarkoituskin.



Kuva 6. SMA-näytteiden tyhjätilan riippuvuus päällystenäytteen kappaleitiheyden määrittämenetelmästä (2. valmistuserä).

Jos päällysteen kappaleitiheyden arvona käytetään ulkomittojen mukaista tulosta, jota Asfalttinormit edellyttävät käytettäväksi avoimelle asfaltille, näytteiden tyhjätilan vaihteluväli olisi 16–21 %. Tällöin tyhjätila vastaisi normien avoimelle asfaltille asettamaa tyhjätilavaatimusta. Tämän valmistuserän näytteiden rakeisuuskäyrä oli myös lähellä Asfalttinormien AA 16 -massan yleistä ohjealuetta.

2.4.3.2 Menetelmä

Esikoesarjan tulosten perusteella päätettiin projektin pienryhmän kokouksessa, että tutkimusta jatketaan siten, että kokeillaan vesipaineiskun suoritusta ("kanttiaallon" asemasta) puolisiniaallon muotoisella kuormituksella, koska se vastaisi paremmin ajoneuvon renkaan aiheuttamaa päällysteen pintapaineen muutostapaa. Kokeiluun oli käytettävissä edellisestä koesarjasta yli jääneitä näytteitä. Kokeilun jälkeen päätettiin käyttää jatkossa puolisiniaallon muotoista kuormitusta.

Toisen koestuserän SMA-näytteitä koestettiin syklisellä puolisiniaallon muotoisella kuormituksella vesipaineiskukokeessa ilman kumitiivistettä kahdessa lämpötilassa +5 ja +20 °C sekä vesiupotuksessa että ilman vettä. Paine asfalttinäytteen yläpinnassa valittiin siten, että se vastasi kuorma-auton renkaan aiheuttamaan kuormituspainetta tien pinnalla. Koska lämpötila ja pintapaine oli valittu tässä koesarjassa etukäteen, lisättiin kuormitusyökylien kokonaismäärää (kokeen kestoajaa), jotta päällysteeseen syntyi vähintään 9 mm korkeuden muutos (15 % näytekorkeudesta). Koesarjan loppuvaiheessa muutamissa tapauksissa koe lopetettiin jo ennen tämän syklimäärän saavuttamista (tällöin kokoonpuristuma oli noin 7–8 mm eli 12–13 % näytekorkeudesta). Yhden kuormitusyökylin pituus oli noin 2,5 s, jolloin esim. 10000 syklin koestusaika oli noin 6,9 h.

Huoneenlämpötilassa (+20 °C) tutkituille näytteille haettiin sopiva kuormituspainetta kokeellisesti. Kokeilujen perusteella valittiin tässä lämpötilassa pintapaineelle kaksi vaihtoehtoa 1000 kPa ja 2000 kPa. Näistä ensin mainittu on lähellä kuorma-auton paripyörän ja jälkimmäinen Supersingle-renkaan aiheuttamaa painetta asfaltin yläpinnassa.

Viileinä (+5 °C) tutkituille näytteille käytettiin samaa korkeaa kuormituspainetta kuin esikokeessa (7000 kPa).

2.4.4 Jäätymis-sulamisen ja kuormitusten yhteisvaikutus

2.4.4.1 Näytteet

Kolmannen koestuserän näytteet valmistettiin asfalttibetonista AB 22. Näytteiden koostumus oli seuraava:

- kiviaines Malmgård
- # 0,063 mm läpäisy noin 6 %
- Täytejauhe: lentotuhka
- Bitumi 50/70 Nynas
- Bitumipitoisuus 4,9 %.
- Tyhjätila: tavoite 6–7 % (sallittiin 6–8 %),

Asfalttibetonin tyhjätila jätettiin tavanomaista korkeammaksi, jotta vesi pääsisi tunkeutumaan päällysteeseen. Koostumus on esitetty liitteessä 12.

2.4.4.2 Menetelmä

Koestuserän näytteiden avulla tutkittiin jäätymis-sulamiskokeen ja dynaamisen kuormituskokeen yhteisvaikutus asfalttibetonin vaurioitumiseen. Jäätymis-sulamiskoemenetelmää muutettiin siten, että näytteet olivat jäätymissyklin aikana aiemmasta poiketen ritilän päällä ilmassa (aiemmin ne olivat koko ajan vesiupotuksessa).

2.4.4.3 Näytteiden lämpenemismittaukset

Aiemmissä kokeissa oli todettu, että alipaineessa imeytetyt ja sen jälkeen vesiupotuksessa koestetut näytteet kestivät kauemmin nopeita kuormituspulsseja kuin kuivat näytteet, vaikka veden oletetaan yleisesti heikentävän bitumin ja kiviaineksen välistä tartuntaa. Puristusmännän tuhansia kertoja toistuva syklinen puristusliike saattaisi aiheuttaa kitkaa männän ja asfaltin rajapinnassa. Kitka muuttuu kosketuspinnassa lämmöksi. Märässä dynaamisessa kokeessa asfalttinäyte on kokonaan ja puristusmännän alaosa osittain veden alla, jolloin vesi saattaa jäähdyttää puristusmännän ja asfalttinäytteen kosketuspintaa. Jos kuivassa dynaamisessa kokeessa näyte lämpenisi enemmän, lisääntyisi asfaltin deformatiivisuus.

Kolmannen koestuserän tutkimusten alussa tutkittiin näytteiden lämpenemistä termoelementtiantureilla sekä vesiupotuksessa että kuivassa ilmassa suoritetussa dynaamisessa paineiskukokeessa. Mittausten perusteella todettiin, että näytteiden lämpötilamuutoksilla märässä ja kuivassa dynaamisessa kokeessa ei ollut merkittävää eroa, vaan molemmissa kokeissa näytteen lämpötila pysyi lähellä valittua lämpötilan säätöarvoa (säätöarvo +20 °C, vaihtelu alle 1 °C).

2.4.4.4 Tutkitut ominaisuudet

Kolmannen koestuserän näytteille tehdyt tutkimukset on esitetty taulukossa 13. Tutkimuksilla selvitettiin:

- asfalttibetonin kestävyys merkkiä ja kuivia dynaamisia vesipaineiskuja vastaan
- asfalttibetonin kestävyys jäädytys-sulamiskokeen ja märän dynaamisen vesipaineiskun yhteisvaikutusta vastaan
- asfalttibetonin jäätymis-sulamiskestävyys (jäätymis-sulamiskoe + halkaisuvetolujuuskoe)
- asfalttibetonin vedenkestävyys standardin mukaisella vedenkestokokeella (korkeammalla tyhjätalalla).

Taulukko 13. AB22- asfalttibetoninäytteille tehdyt tutkimukset.

Esikoe	Koestus	Näytekoko		Testinäytteet kpl	Ref. Näytteet kpl	Ref. näytt. Säilytys	Näytteitä YHT (kpl)
		D (mm)	h (mm)				
Ei	Kuiva dyn. kuormituskoe	150	60	3			3
Ei	Märkä dyn. kuormituskoe (T 20°C, paine 2000 kPa)	150	60	3			3
Jäätymis-sulaminen 10 sykliä (jäädytys ilmassa, sulatus)	Märkä dyn. kuormituskoe (T 20°C, paine 2000 kPa)	150	60	3			3
Jäätymis-sulaminen 10 sykliä (jäädytys ilmassa, sulatus)	Halkaisuvetolujuus (T 10°C)	100	60	5	5 kpl imeytys ennen halkaisua	säilytys + 5°C	10
Ei	Tavanomainen vedenkestokoe	100	60	5	5 kpl (kuivat)	säilytys + 20°C	10

2.4.5 Esikuormitusten, veden ja paineiskujen yhteisvaikutus

2.4.5.1 Näytteet

Lemminkäinen Infra Oy valmisti tutkimuksessa käytetyt neljännen koestuserän AB 22-näytteet. Niiden koostumus ja tyhjätilan tavoitearvo olivat samat kuin edellisellä koestuserällä. Näytteet varastoitettiin VTT:llä valmistuksen jälkeen lämpötilaan +5 °C. Näytteiden tyhjätilat on esitetty tulosten yhteydessä.

2.4.5.2 Menetelmä

Näytevalmistuserän avulla pyrittiin selvittämään kuiville näytteille suoritetun dynaamisen esirasituksen vaikutus asfaltin (AB22) vedenpaineiskunkestävyyteen. Neljännen koestuserän AB 22 näytteiden esikuormitus- ja koestusmatriisi on esitetty taulukossa 14. Näytteiden esikäsittelyn alkaessa niitä oli säilytetty yksi kuukausi lämpötilassa +5 °C.

Taulukko 14. Näytteiden (A-L) esikäsittelyvaiheet ja koestukset (AB 22).

Kokeen vaihe (Näyte A-L)	A	B	D	E	F	G	H	K	L	Olosuhde
Esikuormituslämpötilan valinta (kuivat näytteet)	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	p= 2 MPa, T= 5 °C tai 10 °C kuivana
Näytteelle kuiva dyn. paineiskokee, kunnes kokoonpuristuma 3,5 mm			Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä			p= 2 MPa, T= 20 °C kuivana, kokoonpuristumaan 3,5 mm
Vesi-imeytys eksikkaattorissa			Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	
Näyte 28 vrk vesiupotuksessa			Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Ei	
Näytteelle märkä dyn. paineiskokee			Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	p= 2 MPa, T= 20 °C märkänä
Näytteelle kuiva dyn. paineiskokee			Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	p= 2 MPa, T= 20 °C kuivana

Esikäsittelyjen jälkeen näytteille tehtävää dynaamista kuormitusta jatkettiin, kunnes kokoonpuristuma oli 8 mm. Koestusparametrit olivat: paine näytteen pinnassa 2000 Pa, näytteen lämpötila +20 °C, kuormitussyklin pituus 2,5 s ja kuormituskäyrän muoto puolisiniaalto.

2.4.5.3 Esikuormitukset

koesarjan aluksi tehtiin kaikille näytteille esikuormitus kuivalla dynaamisella paineiskukokeella, jonka tarkoitus oli aiheuttaa näytteeseen alkuvaurio ennen dynaamista vesipaineiskukoetta. Esikuormituskokeeseen soveltuva lämpötila haettiin kokeilemalla. Esikuormitusrajaksi valittiin 3,5 mm edellisen koesarjan tulosten perusteella. (p = 2000 kPa, T = 20 °C, syklin pituus 2,5 s). Yhden näytteen esikuormituskokeen maksimikesto-aika oli rajattu enintään yhteen päivään.

2.4.5.4 Vesisäilytys

Kolmen rinnakkaisnäytteen huokostila imeytettiin eksikkaattorissa täyteen vettä ja upotettiin sen jälkeen veteen noin 28 vrk ajaksi.

2.4.5.5 Koestus

AB 22-näytteitä on käytettävissä 9 kpl, jotka tutkittiin seuraavasti

- 2 kpl oli varattu esikuormitusrajan valintakokeeseen,
- muille näytteille oli päätetty tehdä kuiva dynaaminen paineiskukoe, kunnes kokoonpuristuma oli valitun esikuormitusrajan 3,5 mm mukainen,
- 3 näytettä tuli säilyttää esikuormituksen jälkeen 28 vrk vesiupotuksessa ja tehdä niille sen dynaaminen kuormituskoe märille näytteille,
- 2 näytettä imeytettiin ilman vesiupotusta. Sen jälkeen tehtiin dynaaminen kuormituskoe märille näytteille,
- 2 näytettä ei imeytetty eikä säilytetty vedessä, vaan niille tehtiin dynaaminen paineiskukoe kuiville näytteille.

Sen jälkeen, kun kuiville näytteille on aiheutettu paineiskukokeella esikuormitusrajan mukainen kokoonpuristuma, tehtiin märkinä koestettaville näytteille (D-H) vesiimeytys. Imeytetyistä näytteistä osa säilytettiin sen jälkeen noin 28 vrk vesiupotuksessa ja osa koestettiin märkinä dynaamisella paineiskukokeella heti imeytyksen jälkeen. Vesiupotuksessa olleille näytteille tehtiin märkinä dynaaminen paineiskukoe vesisäilytyksen jälkeen. Yksittäisten näytteiden vesikäsitteilyjen aloitusajankohdat porrastettiin siten, että näytteet voitiin koestaa märkinä dynaamisella kokeella heti vesikäsitteilyjen päättyessä. Odotusajan ennen vesikäsitteilyjen aloitusta näytteet varastoitettiin +5 °C lämpötilassa ilmasäilytyksessä. Näytteet koestettiin yksi näyte kerrallaan.

2.5 Tartukekoilu

Tartukkeen vaikutusta SMA-päällysteen vedenkestävyyteen ja jäätymis-sulamiskestäväyyteen selvitettiin sekä käytännön tiejohteessa Korson risteyksen ramppiin tehdyillä koepäällysteillä ja samaan aikaan tehdyillä laboratoriokokeilla. Koetiekohte sijaitsi Lahden moottoritien vt 4 Helsingin suuntaan vievään ajorataan liittyvällä rampilla Korson liittymässä Vantaalla, kuva 7.

Tartukekoilu ei kuulunut alkuperäiseen tutkimussuunnitelmaan. Se otettiin mukaan Asfadur-projektiin, koska se ajoittui sopivasti samaan ajankohtaan kuin Asfadur-projektin näytevalmistuksen aloitus ja koska kenttäkohteesta saatiin samalla vertailukohte laboratoriokokeille.



Kuva 7. Koetien päällystemassojen levitys yöllä kahdella levittimellä (Korson ramppi Lahden väylälle Helsingin suuntaan).

Sekä koetien että laboratorionäytteiden asfalttimassat valmistettiin Destia Oy:n Maantiekylän asfalttiasemalla samalla materiaalikoostumuksella kuin koetien massat. Koetiellä päällysteen tyhjätilatavoite oli Asfalttinormien mukainen. Tutkimusprojektia varten laboratorionäytteitä valmistettiin korkeammalla tyhjätilalla veden tunkeutumisen varmistamiseksi.

Tartuketta sisältävä massa levitettiin rampin keskilinjan ajosuunnassa oikealle puolelle. Ilman tartuketta massa valmistettu levitettiin sen viereen samalle paaluvälille rampin keskilinjan vasemmalle puolelle. Levitystyössä käytettiin samanaikaisesti kahta asfaltinlevitintä, joista toinen levitti rampin vasemman ja toinen oikean puolen massaa. Saumakohta tehtiin tällä tavoin kuumana, jotta siitä tulisi kestävämpi.

Vertailtavien päällysteiden koostumukset (tartukkeen kanssa ja ilman) on kuvattu kohdassa 2.2.2 taulukossa 8. Tartukkeen maahantuoja laati koetien rakentamisesta selostuksen [13].

2.6 Liukkaudentorjuntasuolan käyttö

Suolan käyttömääriä pyrittiin selvittämään Liikenneviraston tietokannoista, koska päällysteiden reikiintymistä oli todettu erityisesti liukkaudentorjuntakaudella ja vähän sen jälkeen. Liikenneviraston seurantajärjestelmistä ei kuitenkaan ollut saatavissa tie- eikä tieosakohtaista tietoa suolan käyttömääristä.

Suolan käyttömäärien seurantatieto on alueurakkakohtaista eikä sitä tilastoida erikseen tiekohtaisesti. Suolan käyttömäärä riippuu tien talvihoitoluokasta. Kohde n:o 1 kuului vilkasliikenteisten 1-ajorataisten teiden talvihoitoluokkaan I ja muut kohteet kuuluivat 2-ajorataisten teiden talvihoitoluokkaan Is.

Taulukossa 15 on esitetty talvisuolan käyttömäärät talvihoitoluokittain Uudenmaan EY:n alueella ja neljän taulukossa 16 esitetyn seurantakohteen talvisuolan käyttömäärä laskettuna alueurakoiden keskimääräisten suolausmäärien perusteella.

Taulukon 16 perusteella voidaan todeta, että alueurakkakohtaisten keskiarvojen perusteella suolausmäärät ovat Asfadur-projektin seurantakohteissa vuosittain noin 8–10 tonnia/ajorata-km.

Taulukko 15. Talvisuolan käyttömäärät talvihoitoluokittain Uudenmaan ELY:ssä talvella 2007–08.

	Talvisuola yht	Is 2-ajorat.	Is	I	Ib	II-III	Hiekoitus-hiekan suola
t	29562	11013	5856	5732	5765	992	204
%	100,0	37,3	19,8	19,4	19,5	3,4	0,7

Taulukko 16. Talvisuolan käyttömäärät neljässä Asfadur-projektin seurantakohteessa arvioituina urakkakohtaisten suolausmäärien keskiarvojen perusteella.

Päällystys-vuosi	Kohde n:o	Tie-luokka	Talvihoito-luokka	Urakkakohtaiset suolausmäärät talvikausittain			
				2008/09 t/ajorata-km	2008/09 t/tie-km	2009/10 t/ajorata-km	2009/10 t/tie-km
2008	1	mt	I	9,2		8,6	
2008	2	mt	Is	8,8	17,6	7,6	15,2
2008	3	kt	Is	10	19,9	9,4	18,7
2009	6	mt	Is			7,6	15,2

3 Tulokset

3.1 Jäätymis-sulamissyklien määrä tiestöllä

Kuvissa 8–16 on esitetty tiepäällysteiden jäätymis-sulamissyklien määrät viitenä talvena yhdeksällä tiesääsemalla (asemien havaintoaineiston perusteella kohdan 2.1 mukaan laskettuna). Tiepäällysteiden jäätymis-sulamissyklien määriä verrattiin pakkasmäärätilastoihin:

- Talvi 2005–06 oli pakkasmäärätilastojen perusteella lähinnä ns. ”aiemmin keskimääräistä talvea” vastaava (lähes kerran viidessä vuodessa toistuva pakkasmäärä 17700 h °C).
- Talvi 2008–09 oli keskimääräistä leudompi (pakkasmäärä 8700 h °C).
- Talvi 2007–08 oli kerran 50–100 vuodessa toistuva leuto talvi (pakkasmäärä 970 h °C).

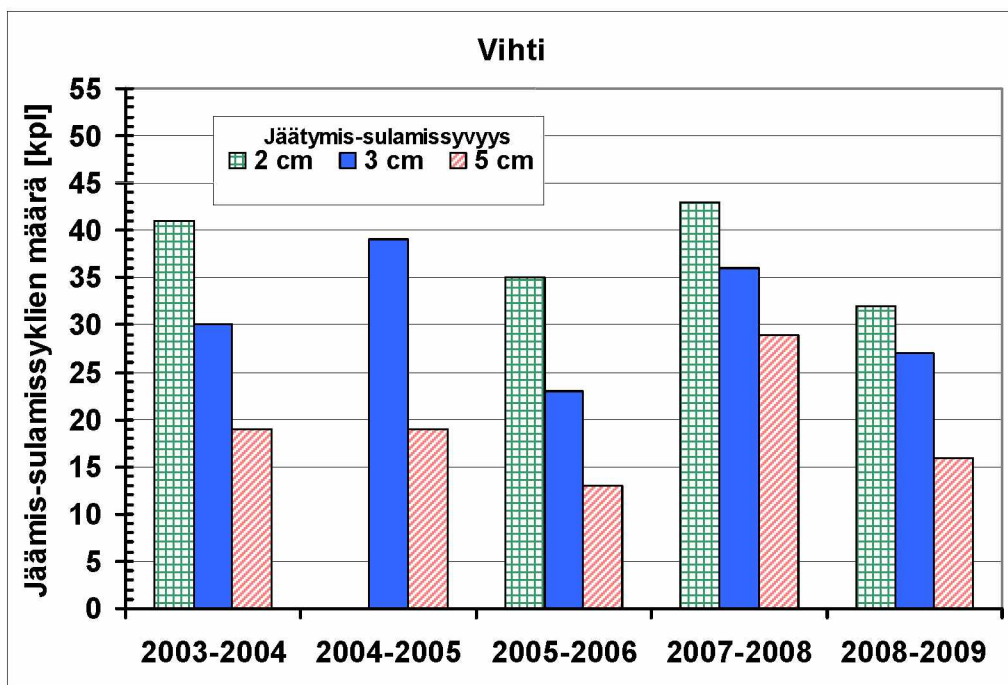
Jäätymis-sulamissyklit laskettiin määrittämällä (kohdassa 2.1 esitettyjen) jäätymis- ja sulamiskaavojen avulla valitun paksuisten asfalttikerrosten jäätymis-sulamiskertojen lukumäärät kunkin talven aikana. Laskenta on suoritettu kolmella vaihtoehdoisella jäätymis-sulamissyvyydellä (2 cm, 3 cm ja 5 cm päällysteen yläpinnasta). Taulukon 17 mukaan jäätymissulamissyklien määrissä havaitaan huomattava alueellinen ja vuotuinen vaihtelu, mutta myös yhteys pakkasmäärä tilastoihin.

- Vähiten jäätymis-sulamissyklejä oli talvella 2005/06 tämän aineiston lähes kaikilla sääasemilla ja kaikilla kolmella jäätymis-sulamissyvyydellä. Tämä oli edellä esitettyjen pakkasmäärätilastojen mukaan ns. ”aiemmin keskimääräistä talvea” vastaava.
- Eniten jäätymis-syklejä oli kaikilla tämän otoksen sääasemilla jompana kumpana otoksen kahdesta viimeisestä talvesta vuosina (2007/08 tai 2008/09), kun jäätymissyvyys oli 5 cm. Nämä talvet olivat pakkasmäärän perusteella edellä esitetyn mukaan kaksi leudointia tässä esitetyistä.
- Myös kahdella muulla jäätymissyvyydellä kaikilla näillä sääasemilla oli edellä mainittuina ”kahtena leudompana talvena” suurempi jäätymis-sulamissyklien määrä kuin ”normaalitalvena” 2005–06, taul. 17.

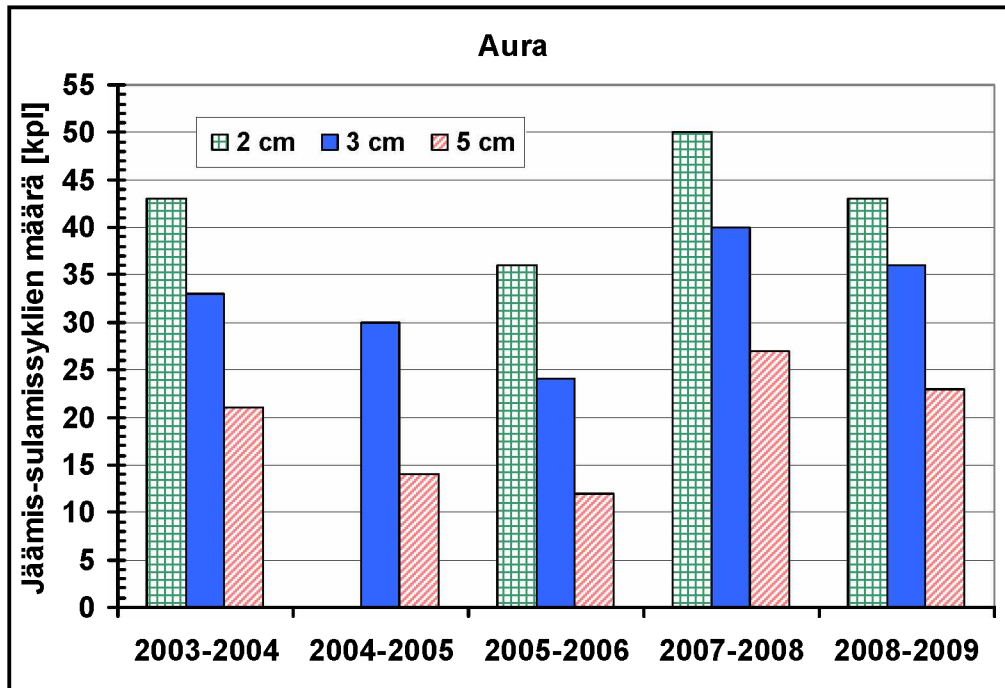
Esitetyt jäätymis-sulamissykliin määrät ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, koska laskelmissa käytetyt roudan syvyyden tunkeutumiskaavat eivät ota huomioon riittävästi jäätyvän kerroksen alapuolella olevan kerroksen lämpötilan, materiaalin ja kosteuden vaikutusta asfaltin jäätymis- ja sulamisnopeuksiin. Käytetty tilastotietokanta sisälsi lisäksi useita mittausten tallennuskatkoja eikä siksi soveltunut erityisen hyvin jäätymis-sulamissykliin määrän laskemiseen.

Taulukko 17. Päälystekerrosten jäätymis-sulamissykliä lukumäärä viitenä talvena.

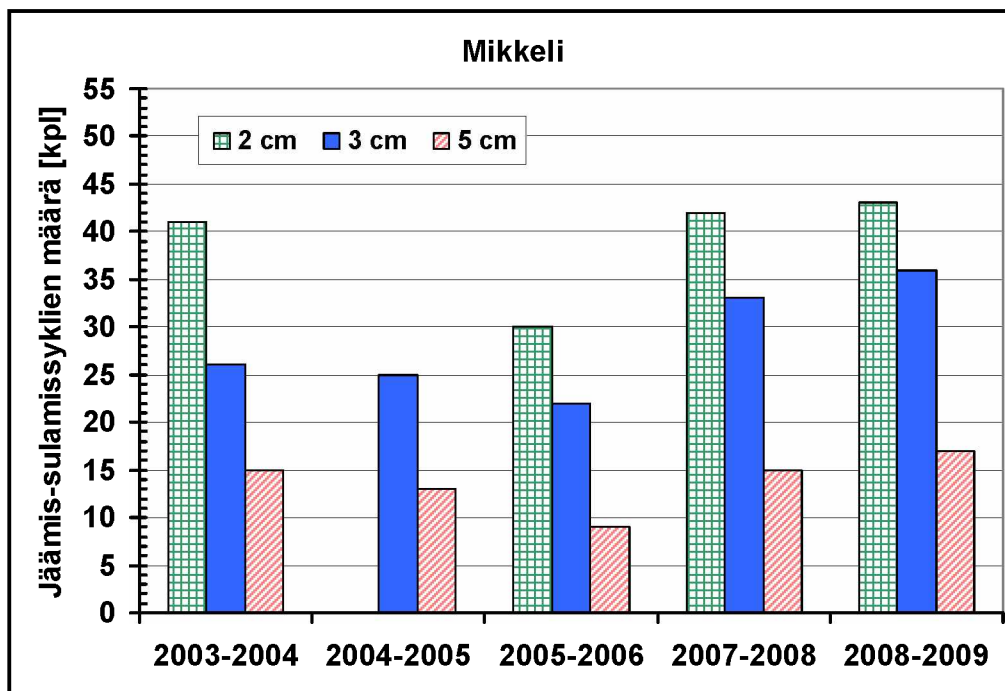
Asema ID	Asema Nimi	Jäätymis-sulamissykliä lukumäärä (4 talvea, 3 jäätymis-sulamissyvyyttä ja 5 talvea)														
		Jäätymis-sulamissyvyys 2 cm				Jäätymis-sulamissyvyys 3 cm					Jäätymis-sulamissyvyys 5 cm					
		2003-2004	2005-2006	2007-2008	2008-2009	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2007-2008	2008-2009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



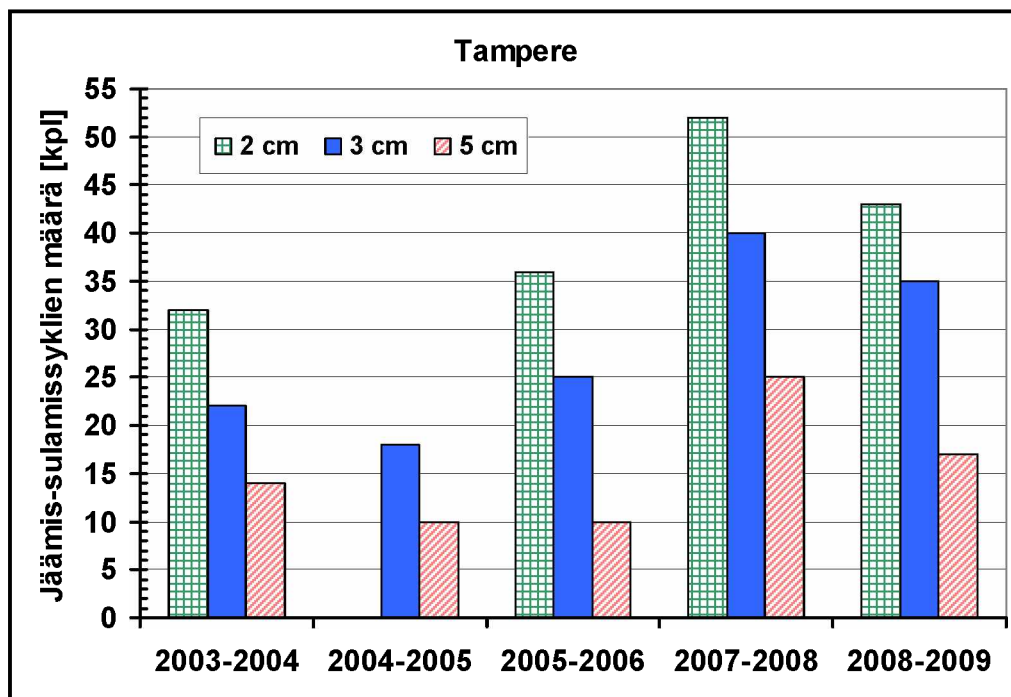
Kuva 8. Jäätymis-sulamissykliä määrä Vihdissä viitenä talvena.



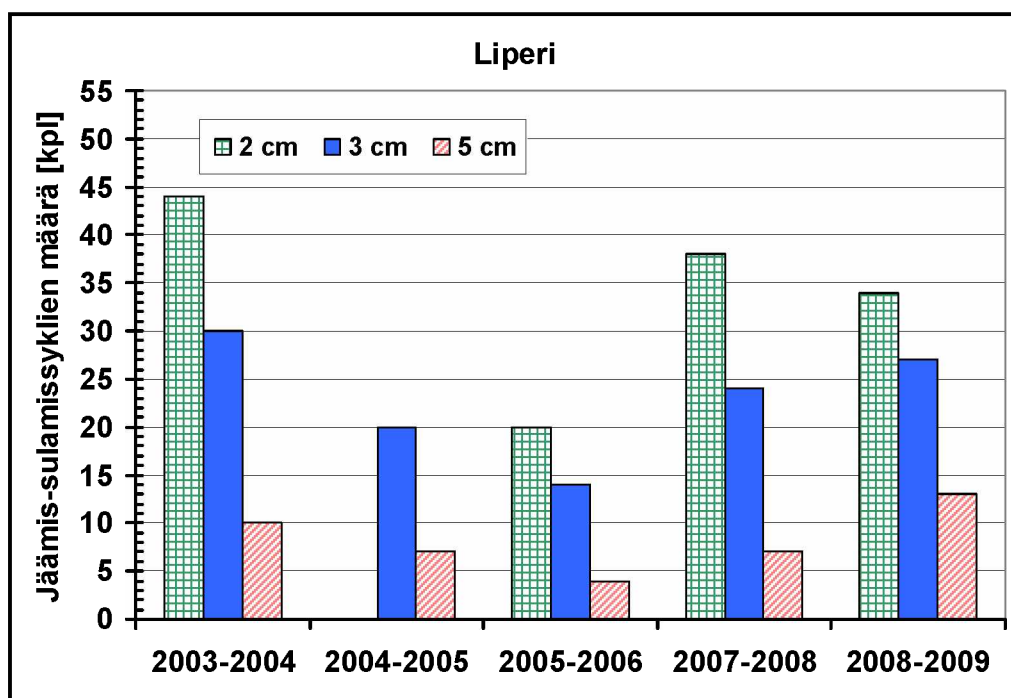
Kuva 9. Jäätymis-sulamissykliä määrä Aurassa viitenä talvena.



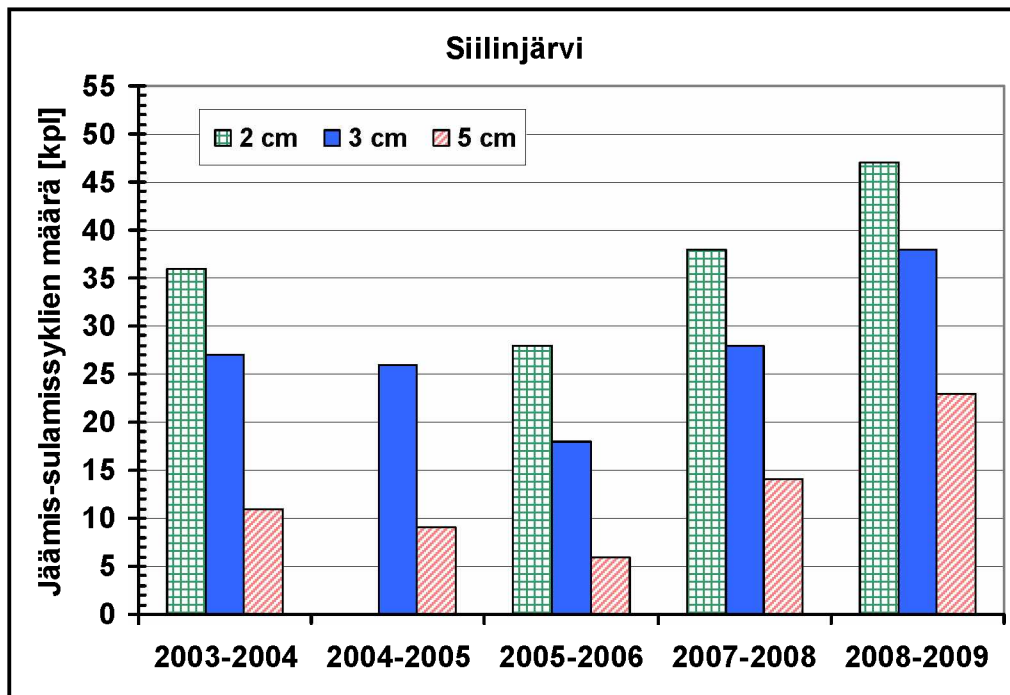
Kuva 10. Jäätymis-sulamissykliä määrä Mikkeliissä viitenä talvena.



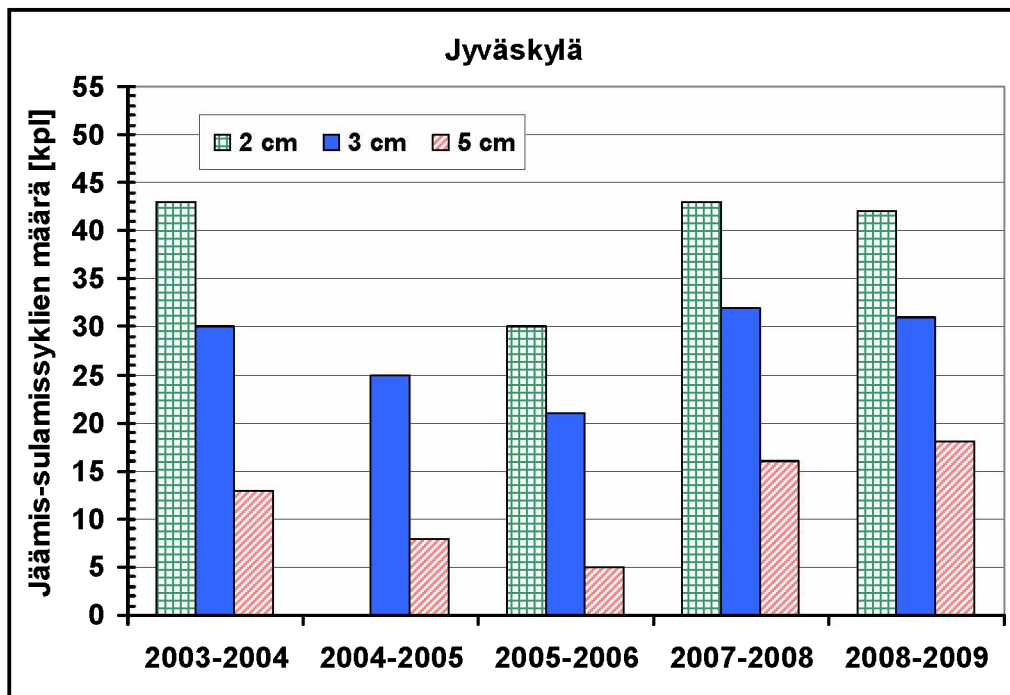
Kuva 11. Jäätymis-sulamissyklien määrä Tampereella viitenä talvena.



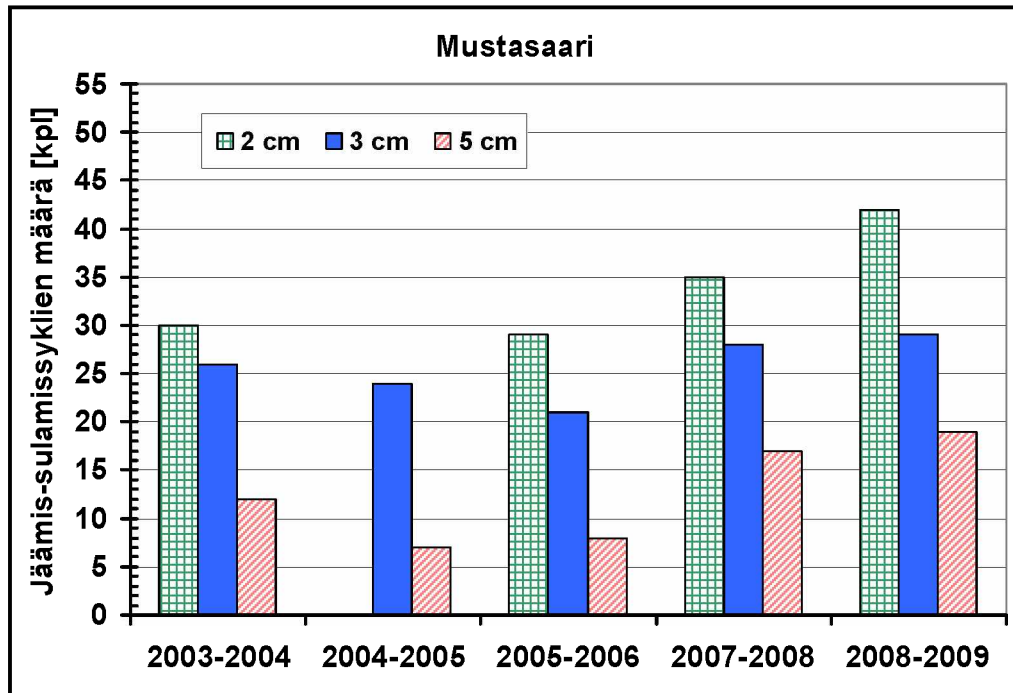
Kuva 12. Jäätymis-sulamissyklien määrä Liperissä viitenä talvena.



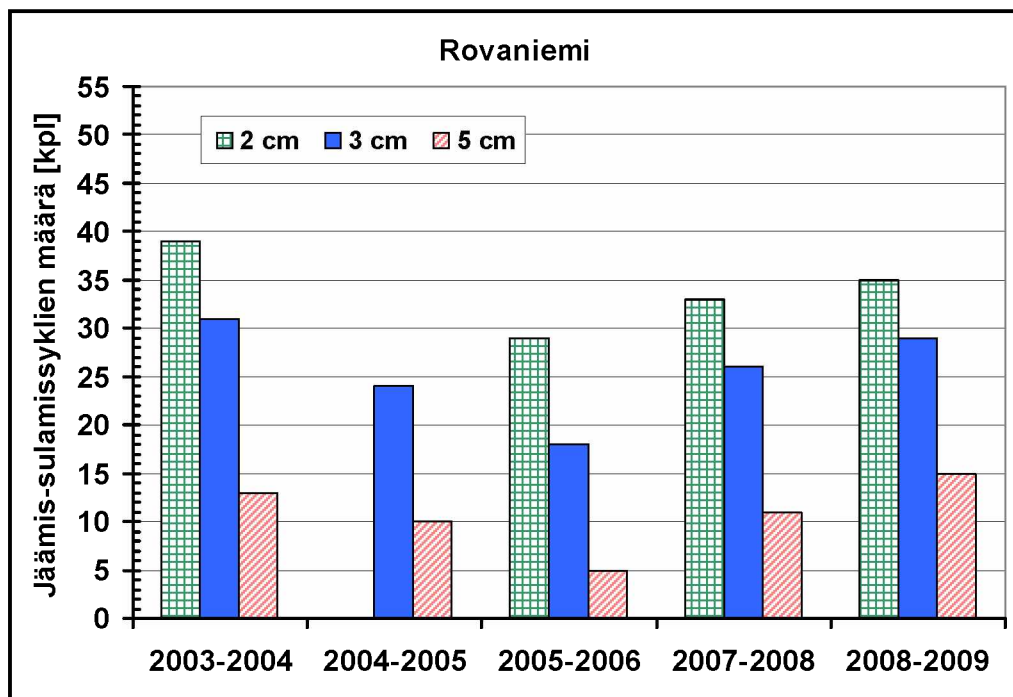
Kuva 13. Jäätymis-sulamissyklien määrä Siilinjärvellä viitenä talvena.



Kuva 14. Jäätymis-sulamissyklien määrä Jyväskylässä viitenä talvena.



Kuva 15. Jäätymis-sulamissyklien määrä Mustasaarella viitenä talvena.



Kuva 16. Jäätymis-sulamissyklien määrä Rovaniemellä viitenä talvena.

3.2 Jäätymis-sulamiskestävyystestien nykytila

3.2.1 Yleistä

Lämpötilan alentuessa tien tai kadun päällysteen pituussuuntainen kutistuminen saattaa aiheuttaa asfalttiin halkeamia (pakkaskatkoja). Alempien kerrosten routiminen voi rikkoa päällysteen. Asfaltin tai asfalttikerroksen rakoihin, huokostilaan tai kerrosten väliin päässeän veden toistuva jäätyminen ja sulaminen voivat aiheuttaa veden jäätymlaajenemisen vuoksi vaurioita. Raskas liikenne aiheuttaa paineiskuja päällysteeseen ja sen huokostilassa olevaan veteen ja voi rikkoa päällysteen.

Asfaltti- ja betonimateriaalien rakenteilla on useita samankaltaisuuksia (molemmat esim. koostuvat kiviaineksesta ja kiviainesrakeet toisiinsa liimaavasta sideaineesta) ja molempien materiaalien tutkimiseen käytetään monia samankaltaisia menetelmiä tai laitteita. Näistä syistä raportissa on käsitelty suppeasti myös betonin jäätymis-sulamiskestävyuden tutkimista.

3.2.2 Asfaltin jäätymis-sulamistestimenetelmät

Näytteiden tyhjätila

Asfaltin jäätymis-sulamisoimaisuuksiin vaikuttavat mm. massan raaka-aineiden ominaisuudet, sideainepitoisuus ja tyhjätila. Jos vesi ei pääse tunkeutumaan päällysteen huokosiin, kestää se suurella todennäköisyydellä hyvin sekä vettä että jäätymis-sulamisrasitusta. Tästä syystä vedenkestävyystesteissä käytetään usein korkean tyhjätilan omaavia massoja.

Tutkimuksen aikana käynnissä olleessa CEN:in vedenkestävyystestin kehitysprojektissa oli erityisesti panostettu englantilaisen SATS-menetelmän (EN 12697-45) soveltuvuuden selvittämiseen. USA:ssa on Superpave suhteituksessa vedenkestävyystestinä käytössä SHRP-projektissa käytetyn Lotman-menetelmän muunnos AASTO T 283. Se sisältää mm. yhden jäädytysyksen (-18 °C). Näissä menetelmissä edellytetään näytevalmistuksessa käytettävän huomattavan korkeita tyhjätiloja:

- SATS-menetelmässä tyhjätila 6–10 %
- AASHTO T 283 menetelmässä tyhjätila (imeytys-pintakuiva) 6,5–7,5 %.

Jäätymis-sulamiskokeiden päällystenäytteiden korkea tyhjätila ei vastannut Asfalttinormien mukaisia uusien tiepäällysteiden tyhjätilavaatimuksia. Tiepäällysteen mahdollisesti liian korkea tyhjätila saattaa olla seurausta liian ohuesta kerrospaksuudesta suhteessa maksimirakokoon tai tiivistystyön ongelmista, joita voi esiintyä esim. levityskaistojen saumojen läheisyydessä.

Kevättalvina todettu päällysteen reikiintyminen ilmenee usein päällysteen saumojen läheisyydessä. Suomen Asfalttinormit sallivat päällystesaumojen kohdilla 2 prosenttiyksikköä korkeamman tyhjätilan kuin siihen liittyvällä uudella päällysteellä. Tällöin esim. SMA-päällysteen yksittäisen saumanäytteen tyhjätilavaatimus on ≤ 8 % normien mukaan. Tämä on vastaa Asfadur-tutkimuksen useimpien jäätymis-sulamiskokeiden näytesarjojen suurinta sallittua yksittäisen näytteen tyhjätilaa ja samaa tasoa kuin esim. menetelmän AASHTO T 283 mukainen sallittu arvo.

Suolapitoisuus

Aiempien jäätymis-sulamiskoetutkimusten perusteella tiedetään, että laimeilla (1–3 %) suolaliuoksilla on huomattavasti suurempi vaikutus betonin ja eräiden kiviainesten lujuuden alenemiseen kuin tislattulla vedellä, väkevämmillä tai jopa kyllästetyillä suolaliuoksilla.

Betoninäytteiden jäätymis-sulamisen tunnetaan paremmin monien tutkimusten perusteella. Heikki Kukon (2008) mukaan:

- Betoninäytteessä tapahtuu veden jäätyminen vaiheittain useissa eri lämpötiloissa. Se, missä lämpötiloissa eri jäätymisvaiheet tapahtuvat, riippuu betonin huokoskoosta ja huokosjakautumasta. Nämä eri jäätymisvaiheiden lämpötilat tulisi tietää, kun valitaan jäätymis-syklarä lämpötiloja ja kestoja.
- Jäädytysvaiheen lopussa tulisi näytteen lämpötilan olla vakiintunut tietyllä tavoitetasolla. Menetelmä on epästabiili, jos näytteen lämpötila muuttuu nopeasti, kun jäätymissykli päättyy. Jäätymissyklarä alin lämpötila vaikuttaa betonin pakkasvaurioitumiseen, joten on tärkeää, että syklien päättyessä näyte on aina samassa minimilämpötilassa.
- Jäätymissyklarä lopussa näytteen lämpötila ei saa olla em. "jäätymisvaiheen lämpötilan" kohdalla, koska näyte on silloin muutostilassa, jossa jäätymislaajeneminen kasvattaa painetta huokosissa.
- Jäätymisvaiheiden lämpötilat voidaan selvittää kylmäkalorimetrillä, jolla saadaan selville, kuinka paljon näytteen sisältämää vettä jäätyy, missäkin lämpötilassa. Tämä tieto voidaan käyttää hyväksi syklien parametrivalinnoissa.

Suolaveden jäätyispaine huokosissa voi olla alhaisempi kuin puhtaan veden aiheuttama paine, koska osa suolaliuksesta pysyy pitkään nestemäisenä liuksesta erottuvan veden jäätyessä. Tällöin osittain jäätyneistä huokosista voi pusertua huokospaineen vaikutuksesta suolaliuosta joko tien pinnalle tai alempiin rakennekerroksiin. Suolaliuksen ja asfaltin huokosen sisäpinnan välinen tartuntavetolujuus on pienempi kuin puhtaan veden ja asfaltin välinen tartuntavetolujuus. Tämä voi vähentää jäätymisvaurioita, koska tartunnan irtoaminen voi pienentää jäätyispainetta paikallisesti. Sen sijaan suolaveden aiheuttamaa rasitusta lisää suolan vaikutus asfaltin osaiineisiin ja niiden väliseen tartuntaan. Suola saattaa myös "rikastua" huokosiin peräkkäisten jäätymis-sulamissyklarä vaikutuksesta.

Puhdas vesi jäätyy "yksinkertaisemmin" kuin suolaliuos. Puhdas vesi jäähtyy ensin nolnaan, jäätyy sen jälkeen nolna-asteisena, jonka jälkeen jään lämpötila alkaa alentua. Myös vettä käyttäessä tulisi jäätymissyklarä päättyä menetelmäkuvauksessa ilmoitettavassa lämpötilassa.

Puhdas vesi voi aiheuttaa suuremman huokospaineen näytteen sisällä, koska kaikki huokosissa oleva vesi jäätyy. Huokospaineen nousu alentaa kuitenkin myös puhtaan veden jäätyislämpötilaa.

Peet Höbedan (1998) kirjallisuusselvityksen mukaan kiviaineksen (oletettavasti myös asfaltin) vedenkyllästysaste kasvaa, jos jäätymis-sulamiskokeessa käytetään laimeaa suolaliuosta veden asemasta. Myös liuosten osmoottiset erot tehostavat suolaveden imeytymistä. Eri tutkimuksissa jäätymis-sulamiskokeilla saadut tulokset suolapitoisuuden vaikutuksesta asfalttinäytteen lujuuteen ovat erilaisia. Ainakin osittain tämä

johtuu käytettyjen menetelmien ja tutkittujen materiaalien eroista (materiaalien kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet, tyhjätila ja kosteustila).

Syklilien lukumäärä

Jäätymis-sulamissyklilien lukumäärä on vaihdellut eri tutkimuksissa välillä 1–1000 kpl. Kirjallisuusselvityksissä ei anneta selviä suosituksia, mikä syklimäärä tulisi valita. Syklimäärän kasvattaminen pidentää tutkimusaikaa ja lisää kustannuksia. Menetelmässä käytettävä syklimäärä on osittain riippuvainen sallitusta lujuuden alenemasta ja tuloksetta vaadittavasta varmuustasosta.

Kosteuskäsittelyt tutkimuksen aikana

Yleensä jäätymis-sulamiskokeeseen menevät näytteet imeytetään ennen syklejä alipaineessa tai vesiupotuksessa. Sen jälkeen joissakin menetelmissä sekä jäädytystä sulatussyklit tapahtuvat nesteupotuksessa ja toisissa menetelmissä näyte jäädytetään ilmassa ja sulatetaan vedessä.

Syklilien jälkeen sekä asfaltin jäätymis-sulamissykleissä olleille että kuivina säilytetyille vertailunäytteille tehdään yleensä halkaisuvetolujuuskoe, toisinaan sen vaihtoehto on jäykkyysmoduulikoe. Samalle näytteelle tehtyjen jäykkyysmoduulikokeiden perusteella tiedetään, että peräkkäisten moduulikokeiden välillä tehtävissä temperointivaiheissa märkä näyte kuivuu ja sen jäykkyys kasvaa, ellei näytteen kuivumista estetä esim. tiiviillä muovikelmulla.

Asfadur-projektissa myös kuivina säilytetyt näytteet imeytettiin eksikkaattorissa ennen niiden halkaisua, jotta näytesarjojen kosteustilaerot eivät vaikuttaisi tulokseen. Muissa asfaltin jäätymis-sulamistutkimuksissa kuivat näytteet on yleensä halkaistu kuivina kuten myös asfaltin vedenkestävyysstandardissa SFS-EN 12697-12 menetelmä B.

Jos referenssinäytteet ovat halkaisuvetolujuuskokeen aikana eri kosteustilassa kuin jäätymis-sulamiskokeessa olleet näytteet, märkien näytteiden huokosissa oleva vesi vaikuttaa tutkimustuloksiin. Näytteen ”vedellä kyllästysasteen” vaikutus halkaisuvetolujuuskokeen tuloksiin voi riippua mm. näytteen lujuustasosta, huokostilan määrästä, muodosta ja kiviaineksen mineraalikoostumuksesta.

3.2.3 Betonin jäätymis-sulamiskoemenetelmät

SFS 5447

Standardin SFS 5447 mukainen betonin jäätymis-sulamiskoemenetelmä:

- Ennen jäätymis-sulamiskoetta koekappaleet kyllästetään vedellä standardin SFS 4475 kohdan 6 mukaisesti.
- Jäädytysvaihe: koekappaleiden lämpötila alennetaan lämpötilaan -20 °C ja annetaan olla siinä lämpötilassa 1 h ajan.
- Sulatusvaihe: laitteistoon lasketaan vesijohtovettä, jonka lämpötila on alle 40 °C siten, että vesi peittää koekappaleet. Sulatusvaiheen on oltava niin pitkä, että näytteet saavuttavat $+20\text{ °C}$ lämpötilan.
- Sulatusvaiheen jälkeen vesi lasketaan pois ja aloitetaan uusi jäädytysvaihe.
- Jäätymis-sulamissyklimäärä esim. 50 tai 100 kpl.

SFS 5449

Standardin SFS 5447 mukainen betonin pakkas-suolakestävyuden koemenetelmä:

- Esikäsitteily aloitetaan, kun koekappaleet ovat 28 d ikäisiä, jos ikä tiedetään.
- Vesi-imeytys normaalipaineessa vesialtaassa 7 d ajan.
- Jäädytysvaihe: näytteet 8 h ajan upotettuna kylläiseen NaCl-liuokseen, jonka lämpötila on -15 °C.
- Sulatusvaihe: näytteet 16 h ajan upotettuna vesijohtoveteen, jonka lämpötila on $+20 \pm 2$ °C. Liuoksen tilavuus on vähintään 8-kertainen koekappaleiden yhteistilavuuteen verrattuna.
- Näytteiden tilavuuden muutokset mitataan ensin 10 ja sen jälkeen 25 syklin välein.
- Tuloksena ilmoitetaan näytteiden tilavuuden muutokset, veden imeytyminen ja tiheys.

Betonin sisäisen pakkasvaurioitumisen CEN-testausohjeet on julkaistu SFS:n julkaisemassa CEN:in teknisessä raportissa CEN/TR 15177:2006 (E). Se sisältää kolme menetelmää:

- Slab test eli Laattakoe (on periaatteessa vanha Borås/SS-137244, jossa mitataan kuitenkin tässä tapauksessa sisäinen vaurioituminen).
- Beam test eli palkkikoe, joka poikkeaa tietyiltä osin suomen vanhasta SFS 5447:stä.
- CIF-test, joka on tietyiltä periaatteiltaan samanlainen kuin Slab test, mutta käytettävä laitteisto erilainen ja testipinta alaspäin.

Slab-testissä ja CIF-testissä voi olla testiliuoksena joko de-ionisoitu vesi tai suolaliuos. Slab testin ja CIF-testin vaatimukset Suomessa on esitetty Betoninormien 2004 liitteessä 5. (Laattakoe SS-137244 ja CIF-koe: suhteellinen dynaaminen kimmokerroin).

Asiakirjan CEN/TR 15177 mukaan betonin

- jäätymis-sulamiskestävyys tarkoittaa toistuvien jäätymisten ja sulamisten kestävyyttä, kun nesteenä on pelkkä vesi
- jäätymis-sulamiskestävyys liukkaudentorjuntasuolan kanssa tarkoittaa toistuvien jäätymisten ja sulamisten kestävyyttä, kun myös liukkaudentorjuntasuola on vaikuttavana aineena

Jäätymis-sulamiskestävyuden vaatimukset SFS 5447:

- taivutus- tai halkaisuvetolujuuksien suhde ≥ 67 %
- suhteellinen dynaaminen kimmokerroin ≥ 75 %.

Pintarapautuminen määritetään eri menetelmien (3 kpl) mukaisesti (CEN/TS 12390-9), vaikka ovatkin osin samanlaisia **Slab-testin** ja **CIF-testin** tapauksessa.

Lisäksi pintarapautumiselle on ko. standardissa "**Cube test**", jota meillä ei ole ollut käytössä, mutta se voisi sopia myös vettä läpäiseville materiaaleille, koska koekappaleet (esim. kuutiot) ovat kannellisessa teräsastiassa, jossa on testiliuos ja astiat ovat jäädytys-sulatusarkussa/kaapissa.

Betonin tapauksessa vanhaa SFS 5449 suola-pakkaskoetta on arvosteltu mm. siksi, että nopea siirtäminen aivan eri lämpötiloissa olevien liuosten välillä aiheuttaa betoniin lämpötilashokkivaikutuksen, joka ei vastaa luonnonolosuhteita.

Kaikissa CEN/TS 12390-9 pintarapautumakokeissa testiliuoksena voi olla joko de-ionisoitu vesi tai suolaliuos (ainakin Cube testissä on mainittu, että suola voi olla muutakin kuin natriumkloridia).

Suolaliuoksen väkevyys on betonin pakkas-suolakokeissa yleensä 3 %.

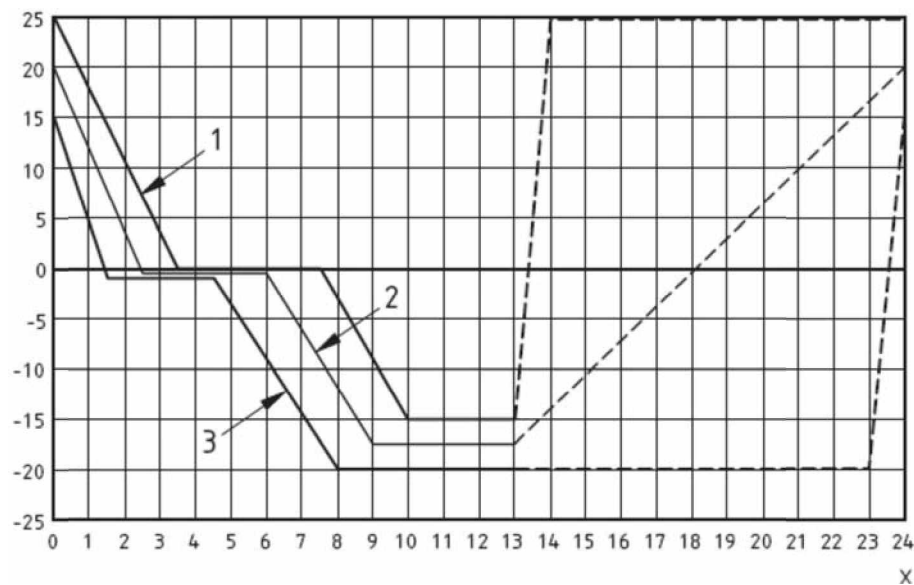
ASTM C672

Betonin jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimiseen käytetään USA:ssa yleisesti standardimenetelmää ASTM C 672, jolle on ominaista:

- näyte on betonilaatta, jonka paksuus on > 75 mm
- laatan yläpinnan päällä on kokeen aikana 6 mm syvä suolaliuos (3 %-NaCl)
- suositellut syklit: jäädytys $-17,8 \pm 2,8$ °C nesteupotuksessa 16 - 18 h ajan
- sulatus $+23 \pm 3$ °C ilmassa 6 - 8 h ajan
- laattoja siirretään käsin syklin eri vaiheiden välissä.

Valmisteilla oleva EN-menetelmä

CEN TC227 valmisti tutkimuksen käynnissäoloaikana testimenetelmää hydraulisesti sidottujen massojen jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimiseksi. Koekappaleet ovat lieriöitä (D 100 - 160 mm, h 100–320 mm. Näytteet ovat testin ajan veteen upotettui- na, peitesyvyys 10 mm. Lämpötila on jäädytysvaiheessa $-17,5 \pm 2,5$ °C ja sulatusvaiheessa (20 ± 3 °C). Yksi jäätymis-sulamissykli kestää 24 h, kuva 17.



Kuva 17. Vertailunäytteen sallittu lämpötila-alue jäätymis-sulamiskokeen aikana (luonnos CEN TC227 WG4/ TG 5).

3.3 Asfaltin jäätymis-sulamiskestävyys

3.3.1 Jäätymis-sulamissykliä säätökokeiluja

SMA-näytteen jäätyksen etenemistä jäätyssyklin aikana selvitettiin esikoelun- teisesti laboratoriokokeella. Näytteet olivat sekä jäätymis- että sulamisvaiheiden ai- kana kannellisissa muoviastioissa ritilöiden päällä upotettuina purkeissa olevaan ve- teen tai suolaliuokseen (1 % tai 3 % NaCl-liuos). Vesi oli vesijohtovettä.

Menetelmävalinnalla (jäätyminen ja sulaminen nesteupotuksessa) arvioitiin tutki- muksen suunnitteluvaiheessa olevan mm. seuraavia vaikutuksia:

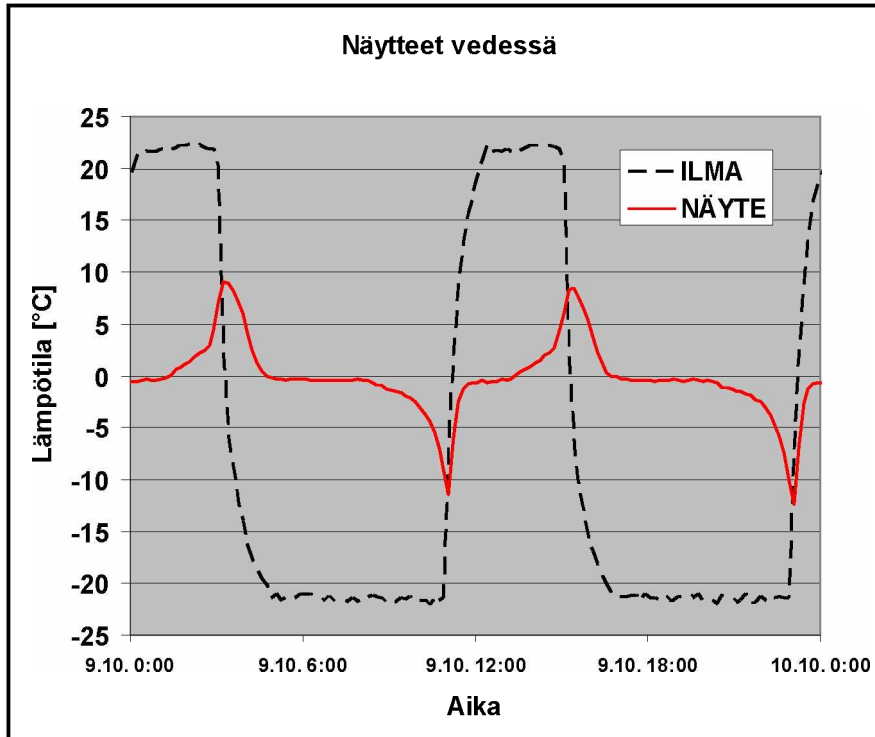
- Jäätyminen nesteupotuksessa on rankempi kuin jäätyminen ilmassa huokosissa syntyvän jäätympaineen vuoksi, koska huokokset ovat täynnä vettä tai suolaliuosta.
- Näytteiden jäätyminen nesteupotuksessa hidastaa näytteiden lämpötilan muutosnopeutta ja pienentää näytteiden pintaosien lämpötilagradienttia jäädytysvaiheessa.

Sulamisvaiheiden ajaksi jäädytys-sulatuslaitteen näytealtaaseen pumpattiin huoneenlämpöistä vettä, jonka pinta ulottui lähes näyteastioiden yläreunan tasalle. Sulaminen tapahtui näyteastioita ympäröivän veden välityksellä. Jäätymis-sulamiskokeen aikana näytteiden lämpötila mitattiin jatkuvatoimisesti yhteen näytteeseen porattuun reikään asennetun lämpötila-anturin avulla.

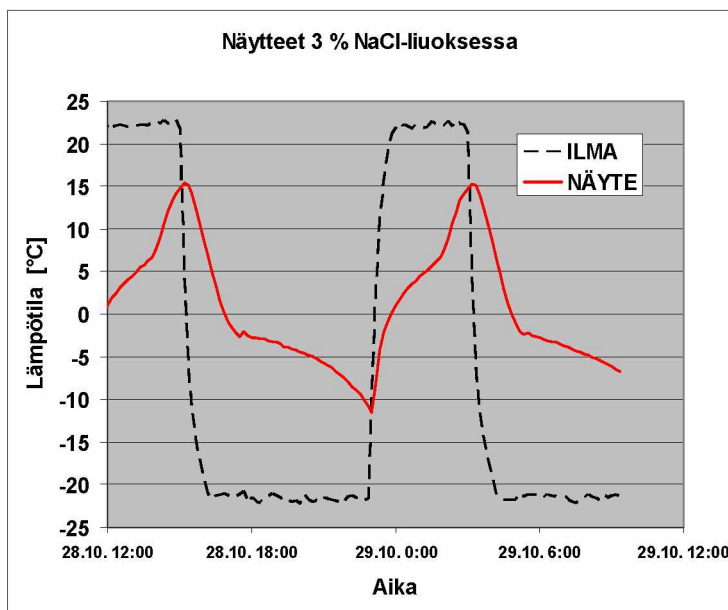
Kuvan 18 mukaan (5 h) jäätymisvaiheen alkaessa vesiupeutuksessa purkeissa olleiden näytteiden lämpötila aleni noin yhdessä tunnissa $9 \rightarrow 0$ °C. Sen jälkeen pääosa nolla-asteisesta vedestä jäättyi nolla-asteiseksi jääksi muutaman tunnin aikana (käyrän vaakasuora osuus). Sen jälkeen lämpötila alkoi laskea hitaasti, kun vielä nesteinä ollut vesi jäättyi ja aiemmin muodostuneen jään lämpötila aleni. Kun lämpötila alkoi alentua lineaarisesti, oli kaikki näytepurkissa ollut vesi jäätynyt. Jäätyssyklin lopussa oli näytteen lämpötila noin -12 °C. Jäädytys-sulatuslaitteen sisäilman lämpötila oli sulamisvaiheen ajan noin +21...+22 °C ja jäätymisvaiheen ajan noin -22 °C. Sulamisvaiheen (7 h) aikana näytteen lämpötila nousi noin +9 °C:een ennen kuin uusi jäätymis-vaihe alkoi.

Kuvassa 19 on esitetty vastaavat lämpötilakäyrät, kun näytteet oli upotettu 3-% suolaliuokseen. Lämpötilakäyrän mukaan näytepurkissa olevassa liuoksessa alkoi muodostua jäätä, kun näytteen lämpötila aleni noin -2,5 °C lämpötilaan.

Suolaliuoksessa muodostui jäätä ilman, että näytteen keskipisteen lämpötilan aleneminen pysähtyi jäätymisvaiheen ajaksi.

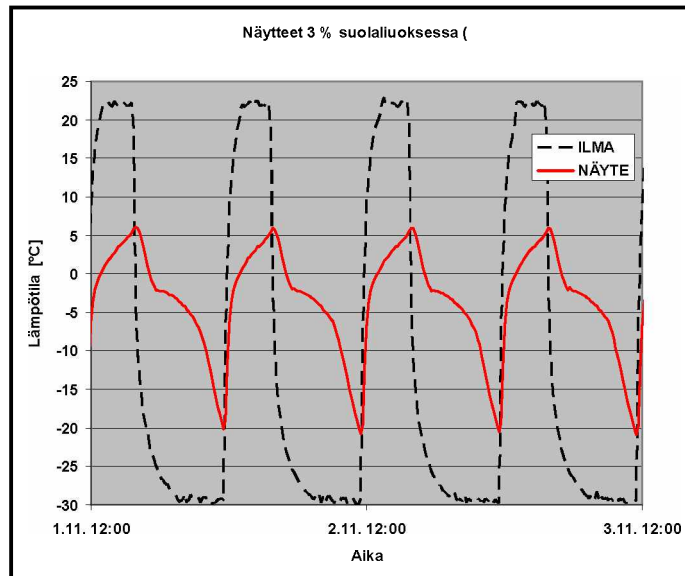


Kuva 18. Näytteen keskipisteen lämpötila ja näytealtaan ilman lämpötila syklien aikana, kun neste oli vettä (jäätymis-sulamissyklin pituus 12 h).



Kuva 19. Näytteen keskipisteen lämpötila ja näytealtaan ilman lämpötila syklien aikana, kun neste oli 3- % suolaliuos (jäätymis-sulamissyklin pituus 12 h, alin ilman lämpötila -22 °C).

Kuvassa 20 on esitetty vaihtoehtoiset suolaliuokseen upotettujen näytteiden lämpötilat jäätymis-sulamissykliä aikana, kun ilman lämpötila jäätymisvaiheessa oli -30 °C. Tällöin näytteiden lämpötilat ehtivät alentua lämpötilaan -20 °C ennen lämmityssyklin alkamista.



Kuva 20. Näytteen keskipisteen lämpötila ja näytealtaan ilman lämpötila syklien aikana, kun neste oli 3 % suolaliuos (jäätymis-sulamissykli 12 h, alin ilman lämpötila -30 °C).

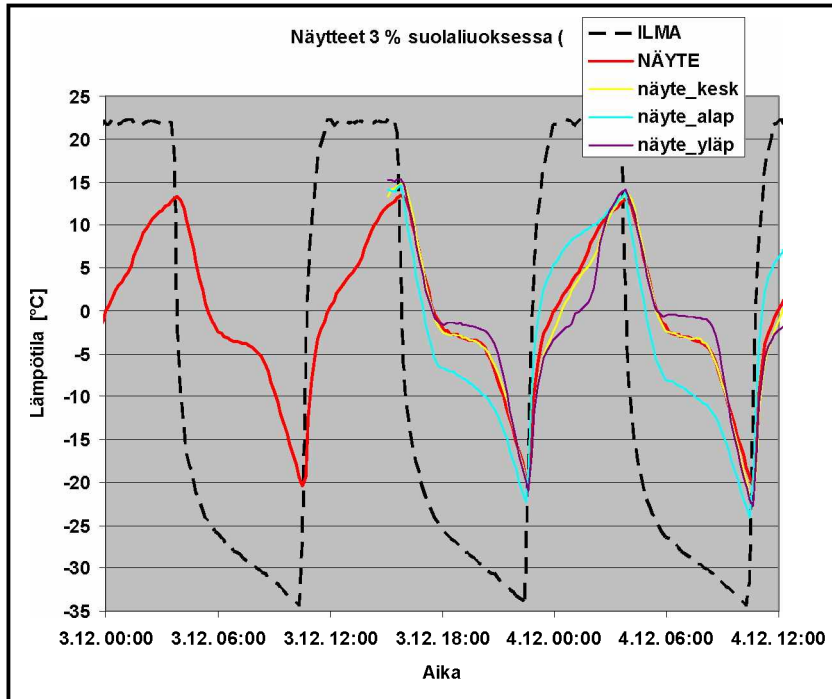
Jäätymisnopeuden, näytteiden minimi- ja maksimilämpötilan säätöä varten tehtiin 3 % suolaliuoksella esikokeita seuraavissa olosuhteissa:

- kaksi jäätymis-sulamissykliä/vrk,
- jäätymissyklin alin lämpötila oli näytteen keskipisteessä -15 ... -20 °C ja jäädytys-sulatuslaitteen näytealtaan ilmassa -35 °C,
- sulatussyklin korkein lämpötila oli näytteen keskipisteessä +10 ...+13 °C ja näyterpurkkeja ympäröivässä vedessä +22 °C.

Kun näyte otettiin pois jäädytys-sulatuslaitteesta jäätymisvaiheen lopulla, näyterpurkin pohjalla oli noin 20 mm paksu pehmeä jääsohjoerros, vaikka näytteen keskipisteen lämpötila oli -15 °C ja ilma noin -33 °C. Asfalttinäyte halkaistiin tässä lämpötilassa. Halkaisupinnassa ei erottanut paljain silmin vapaata vettä.

Sen jälkeen pienennettiin näytteen päällä olevan vesikerroksen paksuudeksi 10 mm ja muutettiin syklin lämpötilat kuvan 21 mukaisiksi. Näytteen jäätymisnopeus oli erittäin herkkä näytteen päällä olevan vesikerroksen paksuudelle. Kun vesikerros näytteen yläpinnan päällä alennettiin 20 mm →10 mm, näytteen alin lämpötila jäädytysyksen päättyessä aleni -13 °C →-20 °C

Kuvassa 21 on esitetty asfalttinäytteen keskipisteen, yläpinnan keskikohdan ja pohjan keskikohdan lämpötilat sekä jäädytys-sulatuslaitteessa olevan ilman lämpötila jäätymis-sulamissykliä aikana.

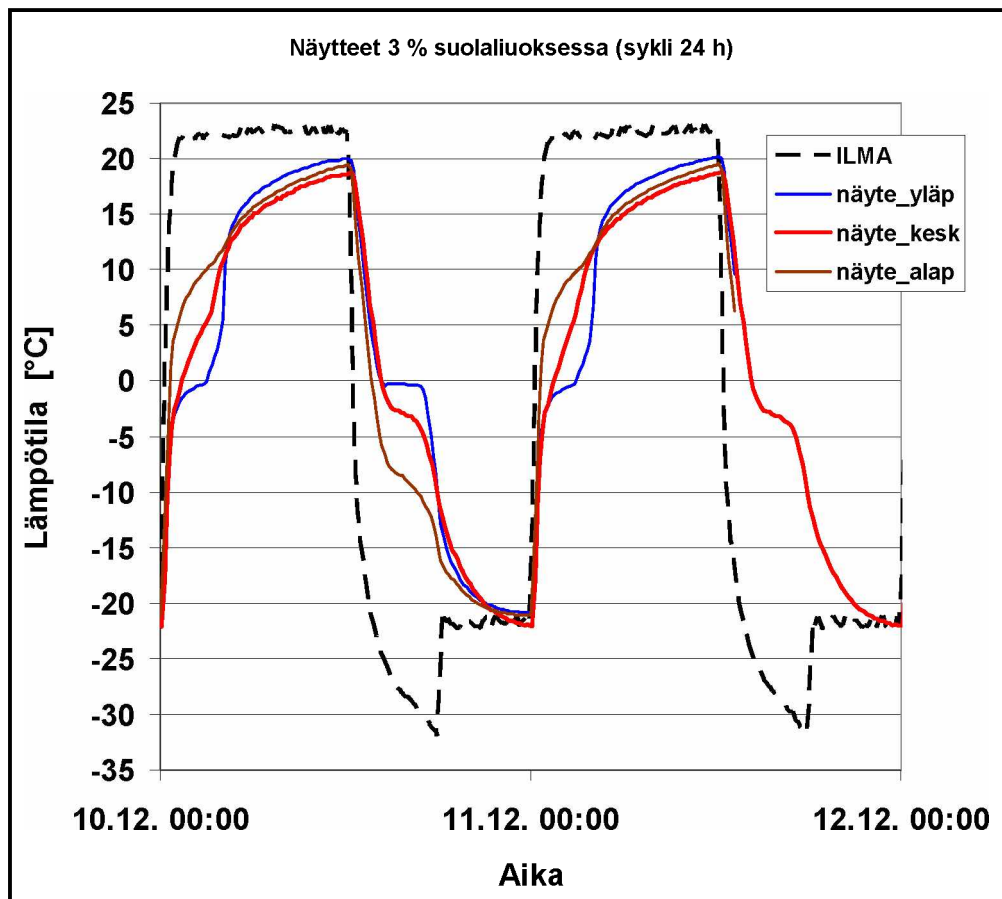


Kuva 21. Näytteen keskipisteen, alapinnan ja yläpinnan sekä jäädytys-sulatuslaitteessa jäädytysvaiheessa olevan ilman ja sulatusvaiheessa olevan veden lämpötiloja (sykli 12 h, 3 % suolaliuos, yläpinnan upotussyvyys 10 mm).

Jäätymisen tapahtui oletettavasti seuraavasti:

- Noin -2 °C lämpötilassa suolaliuksesta alkoi erottua puhdasta vettä, joka nousi pintaan ja jäättyi. Jäljelle jäänyt suolaliuos väkevöityi ja painui painavampana astian pohjalle.
- Sen jälkeen suolaliuksen edelleen jäähtyessä siitä erottui lisää puhdasta vettä, joka vuorostaan jäättyi suolaliuksen edelleen väkevöityessä.
- Erottuneen puhtaan veden jäätymisen alkoi purkissa olevan nesteen yläpinnasta ja jäätymisrintama eteni alaspäin kohti pohjaa.
- Samaan aikaan suola "rikastui" merkittävästi purkin alimpiin nestekerrokseen.
- Laimean suolaliuksen jäätyessä jäättyi vain sen liuotinosi eli vesi muodostaen jääkiteitä. Vaikka jääkiteet syntyivät pelkästä vedestä, uuden jään sisällä oli suolaliuosta, joka jäi "loukkuun" jääkiteiden välisiin "taskuihin".

Koska kuvassa 21 näytteen lämpötila ei ollut ehtinyt tasaantua ennen jäätymisvaiheen loppumista ja koska 12 h pituiset syklit eivät aiemmissa kokeissa olleet vaurioittaneet näytteitä merkittävästi, päätettiin kokeilla pitemmän 24 h syklin vaikutusta jäätymis-sulamiskestävytyteen. Kun syklien pituus muutettiin 24 h pituiseksi, olivat näytteen ja ilman lämpötilamuutokset kuvan 22 mukaiset. Pitemmän syklin vaikutuksesta näytteen lämpötila ehtii tasaantua: minimi -20 °C ja maksimi +20 °C. Näytteen ala- ja yläpintojen lämpötilaero on syklin aikana enimmillään noin 10 °C.



Kuva 22. Näytteen keskipisteen, alapinnan ja yläpinnan sekä jäädytys-sulatuslaitteessa jäätymisvaiheessa olevan ilman ja sulamisvaiheessa olevan veden lämpötiloja (näytteet 3 % suolaliuoksessa, nestettä näytteen päällä 10 mm).

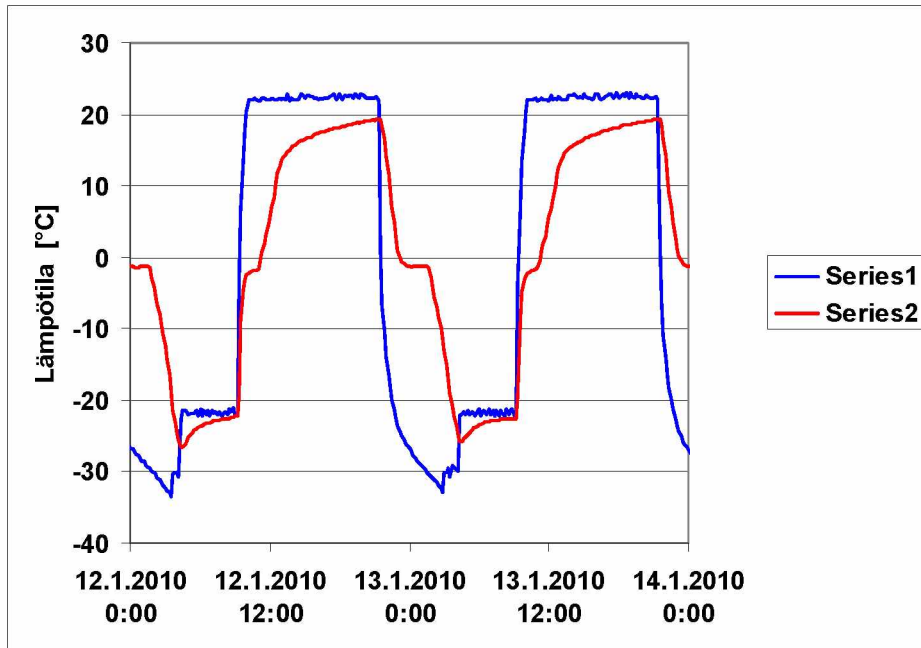
Natriumkloridi alentaa veden jäätympistettä. Sen eutektinen piste eli alin jäätymlämpötila, joka voidaan saavuttaa tietyn suolan vesiliuokselle, on $-21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ liuosväkydydessä 23,3 % (Raukola 1994).

3.3.2 Sykliä lämpötilan valinta

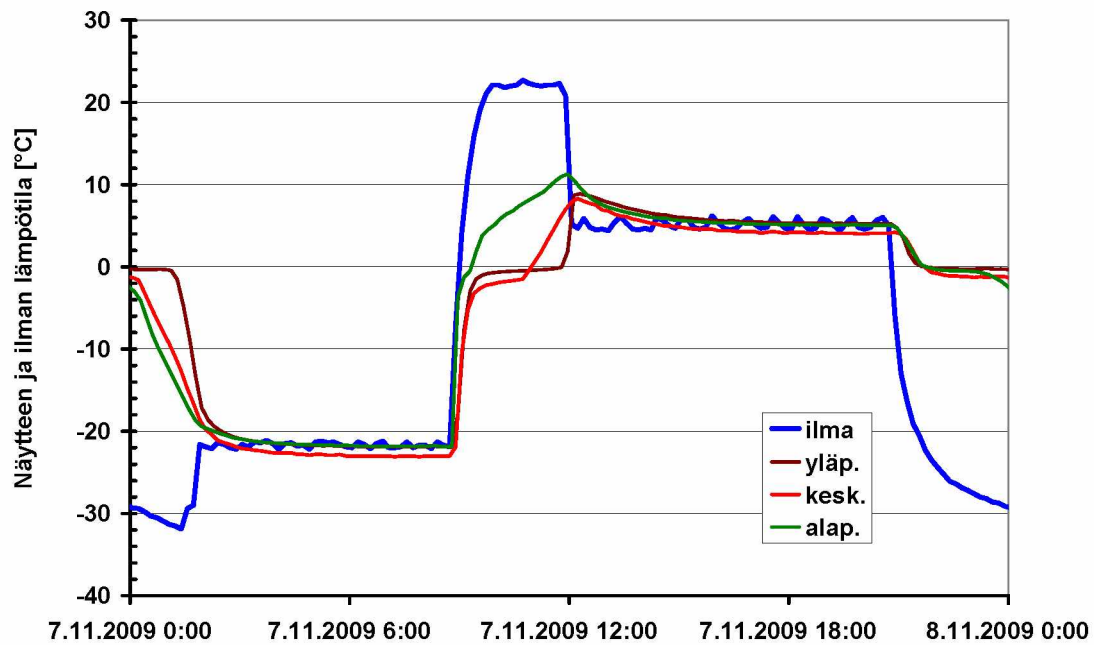
Jäädytys-sulatuslaitteen lämpötilaa alennettiin jäähdyttämällä laitteen ilmatilan lämpötilaa, kun laitteen vesiallas on tyhjennetty ulkoiseen vesisäiliöön. Näytepurkkeja ympäröivä kylmä ilma jäähdytti näytteet syklin jäätymisvaiheen aikana $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan.

Lämpötilaa nostettiin pumpaamalla ulkoisesta vesisäiliöstä noin $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa olevaa vettä jäädytys-sulatuslaitteen vesialtaaseen. Näytepurkkeja sulamisvaiheessa ympäröivä vesi lämmitti näytteet noin $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan.

Kuvassa 23 on esitetty projektin vaiheen 1 loppuvaiheessa käytetty jäädytys-sulatuslaitteen ilmatilan ja muovipurkeissa vesiupotuksessa olleen näytteen keskipisteen lämpötilavaihtelu jäätymis-sulamissykliä aikana. Uusintakokeiden yhteydessä selvitetiin kokeilemalla ja lämpötilamittauksin myös mahdollisuus muuttaa syklin maksimilämpötilaksi $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kuva 24.



Kuva 23. Näytteen keskipisteen ja ilman lämpötilä. Jääditys ja sulatus purkeissa vedessä. Purkkien ulkopuolella jäädytysvaiheessa välillä ilma $T = -22 \dots -33 \text{ }^\circ\text{C}$ ja sulatusvaiheessa vesi $T = +22 \text{ }^\circ\text{C}$.

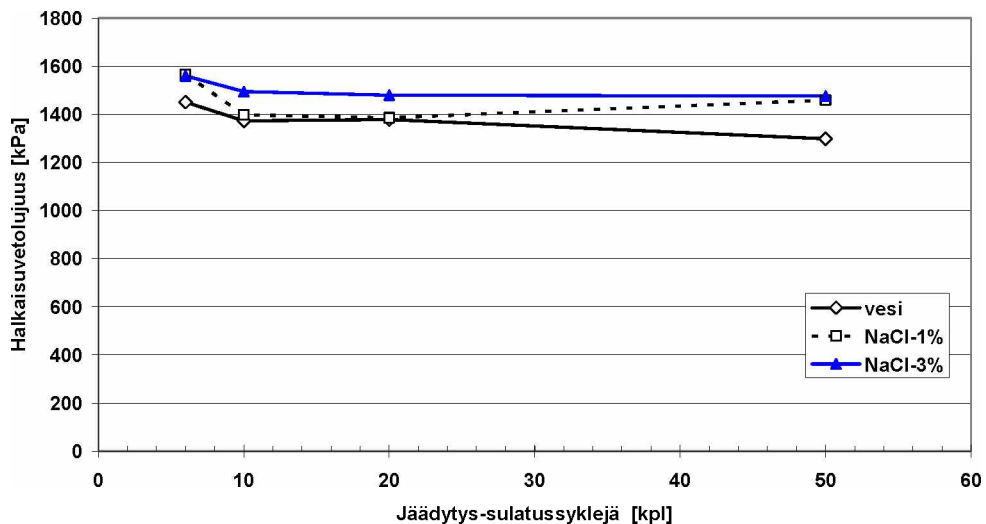


Kuva 24. Näytteen keskipisteen ja ilman lämpötilä. Jäätymisen ja sulaminen vesipurkeissa. Purkkien ulkopuolella jäätymisvaiheessa välillä ilma $T = -22 \dots -33 \text{ }^\circ\text{C}$ ja sulamisvaiheessa vesi $T = +5 \dots +22 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.3 Jäätymis-sulamiskestävyyskokeet (syklin pituus 12 h)

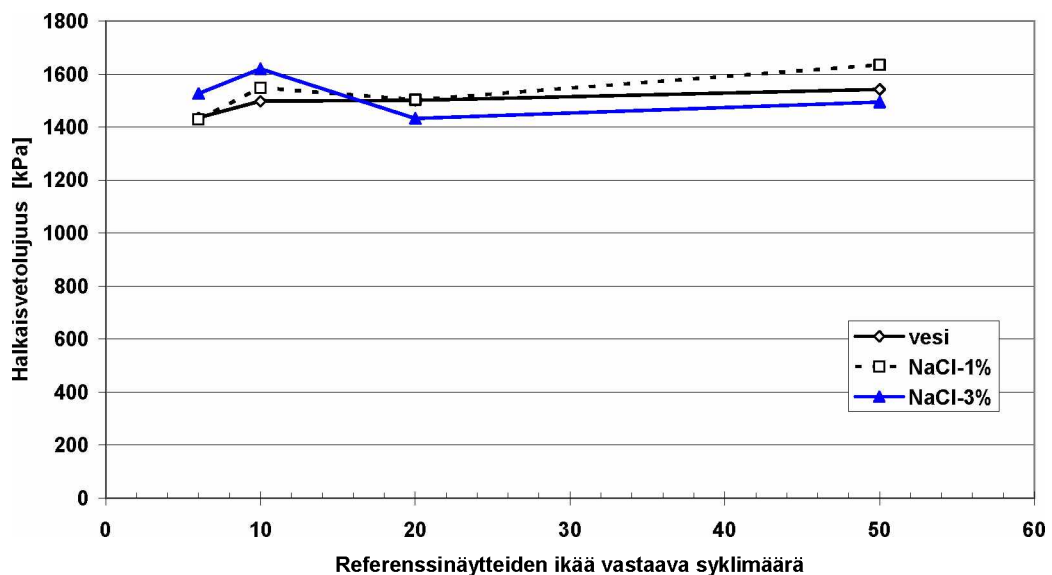
Kuvissa 25–27 on esitetty SMA-massan ensimmäisten jäätymis-sulamiskestävyyskokeiden tuloksia. Näissä kokeissa jäätymis-sulamissyklin pituus oli 12 h ja upotusnesteenä vesi tai suolaliuos. Päälyste oli SMA 16/ Koskenkylä, bitumilaji 50/70 ja bitumipitoisuus 6,0 %. Näytteiden koostumukset on esitetty taulukossa 3.

Jäädytys-sulatuskoestetut

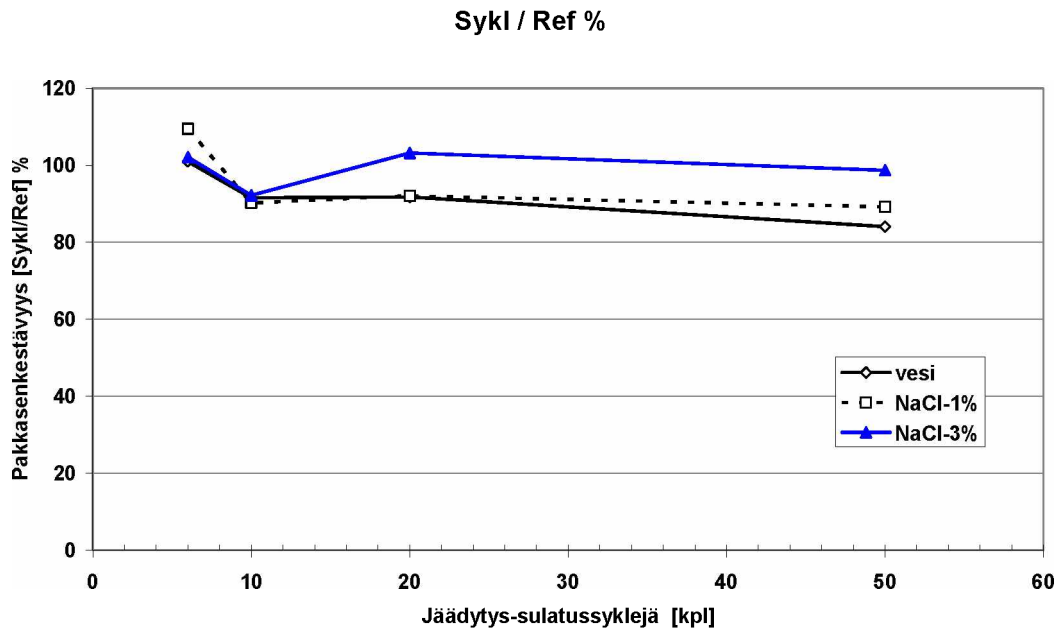


Kuva 25. Jäätymis-sulamissykleissä olleiden näytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus syklimäärästä (syklin pituus 12 h).

Referenssinäytteet (ei jäädytys-sulatuskoestusta)



Kuva 26. Referenssinäytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus iästä (syklin pituus 12 h).



Kuva 27. Jäätymis-sulamiskestävyystuloksen riippuvuus syklimäärästä (syklin pituus 12 h).

Kunkin SMA-näytesarjan 10 näytettä jaoteltiin ennen jäätymis-sulamiskokeiden aloitusta kahteen ryhmään, joiden välillä oli mahdollisimman vähäiset erot tyhjätilan (IPK) suhteen. Halkaisuvetolujuuden riippuvuutta näytteen tyhjätilasta on tarkasteltu liitteen 8 kuvissa, jotka on laadittu (ilman jäätymis-sulamisrasitusta tutkittujen) referenssinäytteiden halkaisuvetolujuustulosten perusteella.

3.3.4 Jäätymis-sulamiskestävyyskokeet (syklin pituus 24 h)

Edellä esitetyissä jäätymis-sulamiskokeissa jäätymis-sulamissyklin pituus oli 12 h eli vuorokaudessa suoritettiin kaksi jäätymis-sulamissykliä vesi- tai suolaliuosupotuksessa. Koska näissä kokeissa jäätymis-sulamiskoe ei ollut riittävän erottelukykyinen, tehtiin 3 % suolaliuosta käyttäen erillisiä näytteiden jäätymisnopeuskokeita, joilla selvitettiin näytteen ja sitä näytepurkissa ympäröivän suolaliuoksen pystysuuntaista lämpötilagradienttia, kohta 3.3.1.

Tällöin havaittiin, että suolaliuoksessa tapahtui todennäköisesti erottumista, jolloin näytteen alaosa ympäröivään liuokseen rikastui väkevöityvää suolaliuosta, jonka jäätymisnopeus oli olennaisesti hitaampaa kuin näytteen yläosaan jäävän veden tai laimentuvan suolaliuoksen jäätymisnopeus. Näyte ei tästä syystä ehtinyt kunnolla jäätymään 12 h pituisen jäätymis-sulamissyklin aikana. Myös näytteen yläpuolella purkissa olevan nestekerroksen paksuus vaikutti jäätymisnopeuteen. Seuraavissa kokeissa jäätymis-sulamissyklin pituudeksi muutettiin 24 h ja näytteen yläpinnan upotussyvyys muutettiin 20 mm \rightarrow 10 mm.

Referenssinäytteitä säilytettiin kokeen aikana huoneilmassa ritilän päällä. Ennen halkaisuvetolujuuskoetta referenssinäytteet joko yleensä imeytettiin vedellä eksikkaattorissa tai joissakin kokeissa koestettiin kuivina ilman imeytystä. Imeytyksen avulla oli tarkoitus saattaa referenssinäytteet samaan kosteustilaan kuin jäätymis-sulamissykleillä rasitetut näytteet. Jos ne referenssinäytteet koestettiin kuivina (ilman imeytystä), vastasi halkaisuvetolujuuskokeen suoritus asfaltin vedenkestävyyskokeen mukaista menettelytapaa.

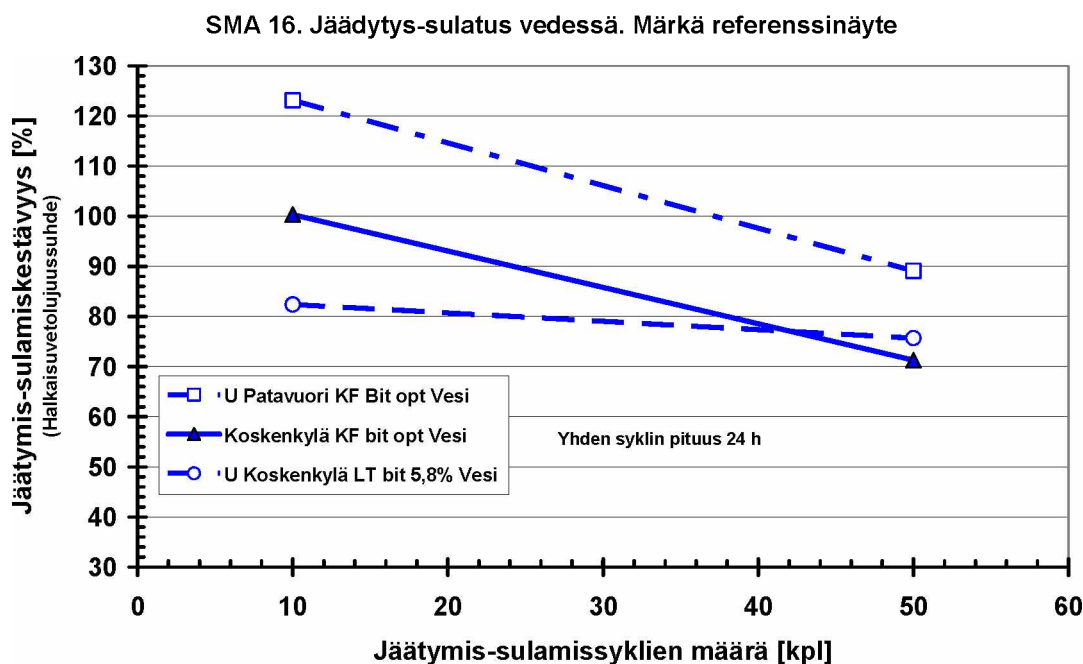
Koska referenssinäytteen kosteustila vaikutti näytteiden lujuuksien suhteeseen, tehtiin kokeita sekä märkiä että kuivia referenssinäytteitä käyttäen. Tässä tutkimuksessa näytteet valmistettiin ja koestettiin määrätyn aikataulun mukaan ja näytteiden ja näytesarjojen tyhjätilojen vertailukelpoisuuteen kiinnitettiin erityistä huomiota. Tästä syystä samoja referenssinäytesarjoja voitiin käyttää useiden jäätymsulamisnäytesarjojen vertailusarjoina (esim. sama referenssinäytesarja soveltui sekä suolaliuoksessa että vedessä jäätymsulamisvanhennettujen vastaavien näytteiden vertailusarjaksi).

Näytteet sisältävien astioiden jäädytys tapahtuu kylmälaitteen ilmatilassa kylmäainetta sisältävän kompressorin avulla. Tähän laitteeseen tuli piilevä toimintahäiriö, kun 50 syklin pituiset uusintakokeet käynnistettiin. Kylmälaitteesta alkoi vuotaa vähitellen ulos kylmäainetta, joka haihtui saman tien ilmaan. Kylmäaineen vähetessä näytteet eivät enää saavuttaneet kylmintä tavoitelämpötilaansa, liite 9. Laitteen toimintahäiriön vuoksi uusittiin osa jäätymsulamiskokeista.

Kylmälaitteen toimintahäiriöriskien vähentämiseksi jäädytys-sulatuslaitteistoon liitettiin automaattinen hälytysjärjestelmä, joka lähettää laitteen pääkäyttäjän matkapuhelimeen tekstiviestin, jos laitteen lämpötila poikkeaa jäätymsulamiskokeen lämpötilan sallitusta vaihteluvälistä ja pysäyttää syklit.

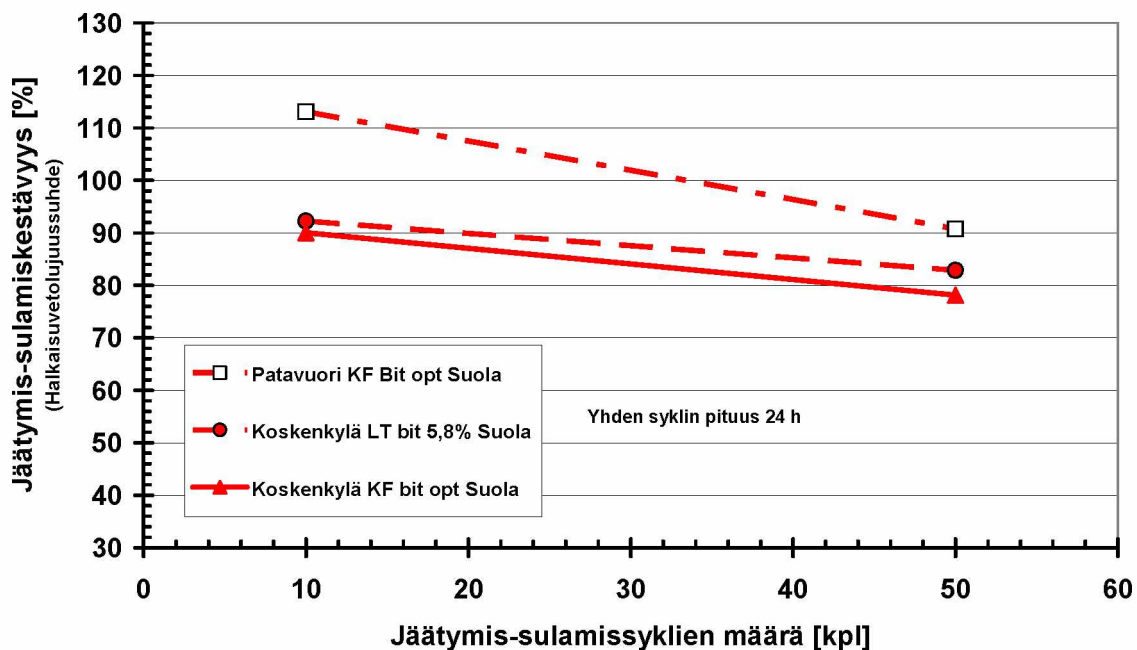
SMA-massan jäätymsulamiskokeen tulokset 10 ja 50 syklin jälkeen vesi- ja suolaliuospotuksessa on esitetty kuvissa 28 ja 29, kun referenssinäytteet imeytettiin ennen halkaisua ja kuvissa 30 ja 31, kun referenssinäytteet halkaistiin kuivina. Molemmilla tapauksilla referenssinäytteet oli säilytetty tutkimusnäytteiden jäätymsulamisasituksen aikana huoneilmassa noin 20 °C lämpötilassa.

Kuvissa 28 ja 30 esitetyt näytteiden jäätymsulamiskokeiden U-kirjaimella merkityt tulokset perustuvat uusintakokeiden tuloksiin. Kuvissa 28–31 SMA:n suhteituksen mukaiset optimibitumipitoisuudet ovat Koskenkylä 6,0 % ja Patavuori 5,6 %.



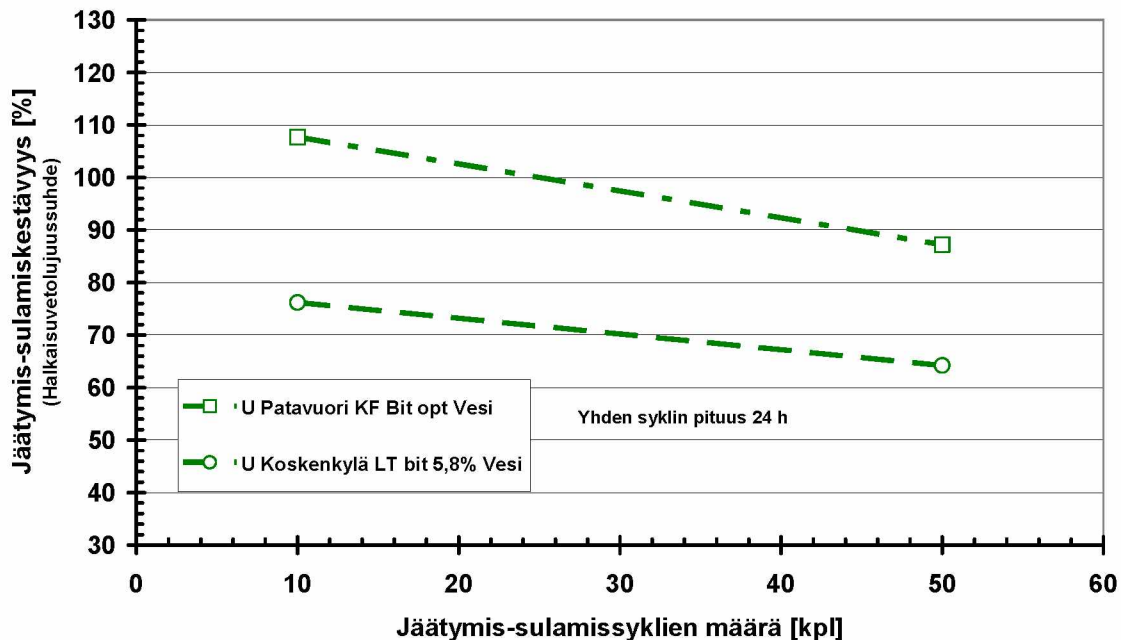
Kuva 28. SMA-näytteen jäätymsulamiskestävyys vedessä. (Syklin pituus 24 h, $T_{sulatus} = +20\text{ °C}$, $T_{jäädytys} = -20\text{ °C}$, referenssinäyte imeytetty ennen halkaisua (U= uusintakokeen tulos).

SMA 16. Jääditys-sulatus suolaliuoksessa. Märkä referenssinäyte

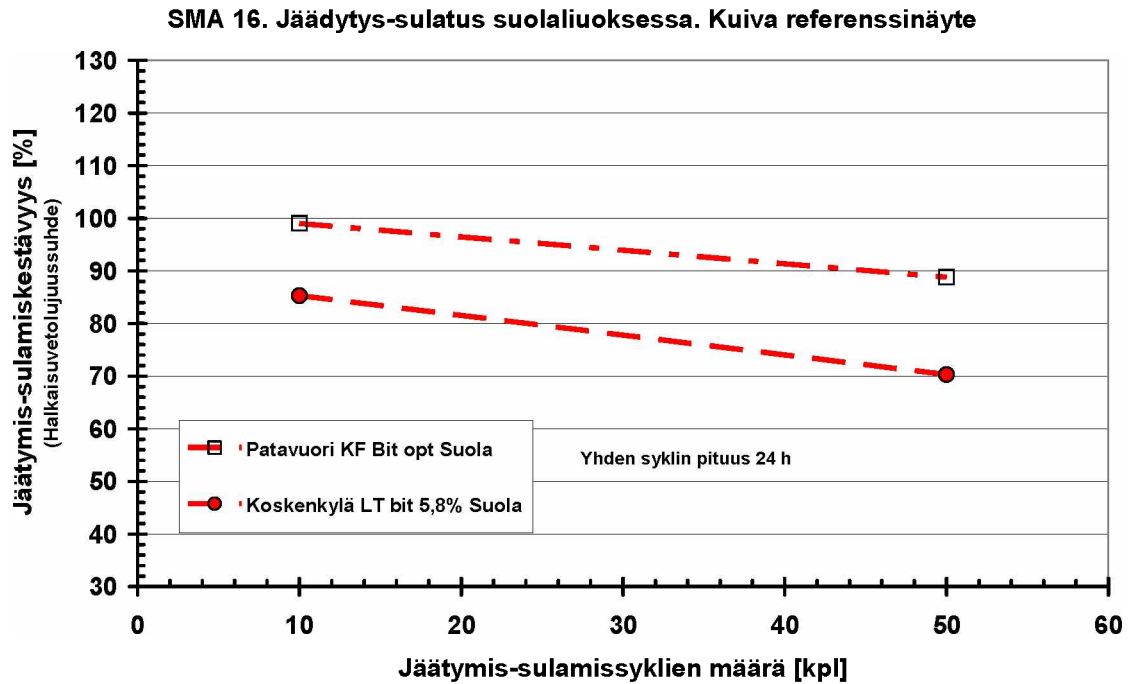


Kuva 29. SMA-näytteen jäätymis-sulamiskestävyys 3 % suolaliuoksessa. (Syklin pituus 24 h, $T_{sulatus} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{jääditys} = -10 \dots -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, referenssinäyte imeytetty ennen halkaisua).

SMA 16. Jääditys-sulatus vedessä. Kuiva referenssinäyte



Kuva 30. SMA-näytteen jäätymis-sulamiskestävyys vedessä. (Syklin pituus 24 h, $T_{sulatus} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{jääditys} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, referenssinäyte kuiva ennen halkaisua. (U= uusintakokeen tulos).



Kuva 31. SMA-näytteen jäätymis-sulamiskestävyys 3 % suolaliuoksessa. (Syklin pituus 24 h, $T_{sulatus} = +20\text{ °C}$, $T_{jääditys} = -10 \dots -20\text{ °C}$, referenssinäyte kuiva ennen halkaisua).

Jäätymis-sulamiskestävydet on laskettu yksittäisten tutkimus- ja referenssinäytteiden halkaisuvetolujuuksien perusteella kohdassa 2.2.3 esitetyllä tavalla. Yksittäisten näytteiden halkaisuvetolujuustulokset on esitetty liitteessä 10.

Taulukossa 18 on havainnollistettu, miten halkaisuvetolujuus-, halkaisuvetojäykkyys- ja jäykkyysmoduulien tulosten suhde muuttui uusintakokeissa verrattuna jääditys-sulatuslaitteen lämpötilahäiriön aikaisiin tuloksiin. Tämä tulosten suhde kuvaa jäätymis-sulamissykliin vaikutusta näytteiden halkaisuvetolujuuksiin, halkaisuvetojäykkyyksiin, siirtymiin ja jäykkyysmoduuleihin.

Kun syklimäärä oli 50 kpl, halkaisuvetolujuuksien perusteella laskettu suhde (jäätymis-sulamiskestävyys) poikkesi uusintakokeissa suhteellisen vähän lämpötilahäiriön aikaisista tuloksista. Uusintakokeissa Koskenkylän heikennetyllä koostumuksella halkaisuvetolujuuden perusteella laskettu jäätymis-sulamiskestävyys ei muuttunut käytännössä lainkaan (ero noin 1 prosenttiyksikköä). Patavuoren optimikoostumuksella jäätymis-sulamiskestävyys oli uusintakokeissa 5 prosenttiyksikköä parempi kuin lämpötilahäiriön aikaisessa kokeessa.

Halkaisuvetojäykkyyteen perustuva vastaava suhdeluku (50 syklin jälkeen) kasvoi uusintakokeissa Koskenkylän heikennetyillä näytteillä noin 9 prosenttiyksikköä, kun referenssinäytteet tutkittiin märkinä ja 6 prosenttiyksikköä, kun ne tutkittiin kuivina. Patavuoren kiveä käytettäessä halkaisuvetojäykkyyteen perustuva suhdeluku kasvoi jopa noin 20 prosenttiyksikköä, taulukko 18.

Taulukko 18. Jäätymis-sulamiskokeessa olleiden ja referenssinäytteiden tulosten suhteen muutos (1. koe → uusintakoe), % yksikköä.

	sykl.	HVL	siirtymä	HVJ	Moduuli	Tyti
	kpl	Suhteellisen tuloksen (sykl- / ref.näytteet) muutos (1. koe → uusinta)				
Märit referenssinäytteet		%-yks.	%-yks.	%-yks.	%-yks.	%-yks.
Koskenk LT bit 5,8% 10 sykl märkä_ref	10	-8,6	-10,5	-2,2	7,6	2,2
Patav KF Bit opt 10 sykl märkä_ref	10	8,2	-5,9	19,0	23,1	0,6
Koskenk LT bit 5,8% 50 sykl märkä_ref	50	1,0	-11,4	8,7	13,8	0,5
Patav KF Bit opt 50 sykl märkä_ref	50	5,2	-24,2	20,1	11,0	
Kuivat referenssinäytteet						
Koskenk LT bit 5,8% 10 sykl kuiva_ref	10	-8,0	-11,2	-1,9	9,4	2,2
Patav KF Bit opt 10 sykl kuiva_ref	10	7,1	-7,2	13,9	20,2	0,6
Koskenk LT bit 5,8% 50 sykl kuiva_ref	50	0,8	-13,6	6,2		0,4
Patav KF Bit opt 50 sykl kuiva_ref	50	5,1	-25,0	19,1		

3.3.5 Halkaisuvetolujuus ja jäykkyys jäätymis-sulamisen jälkeen

Kuvassa 32 on esitetty 10 ja 50 jäätymis-sulamissykliä vanhennettujen näytteiden halkaisuvetolujuudet ja verrattu näitä tuloksia ilman jäätymis-sulamisasiirusta tutkittujen sekä märkinä että kuivina halkaistujen vertailunäytteiden tutkimustuloksiin.

Koskenkylän mursketta käyttäen valmistettua SMA-massaa heikennettiin korvaamalla kalkkifilleri lentotuhkalla ja alentamalla optimisideainepitoisuutta 0,2 prosenttiyksikköä. Vertailunäytteet säilytettiin kuivissa olosuhteissa noin +20 °C lämpötilassa syklisen vanhennuskokeen ajan.

Kun syklejä oli 50 kpl, olivat näytteet koestushetkellä yli 50 vrk ikäisiä. Referenssinäytteiden lujittuminen ilmenee kuvasta 32, kun verrataan saman koostumuksen omaavien referenssinäytteiden lujuuksia 10 syklin ja 50 syklin kestoaikaa vastaavan varastointiajan jälkeen. Referenssinäytteiden lujuuudet kasvoivat yleensä sekä Koskenkylän että Patavuoren mursketta käyttäen tehdyillä massoilla sekä optimikoostumuksella että heikennetyllä koostumuksella.

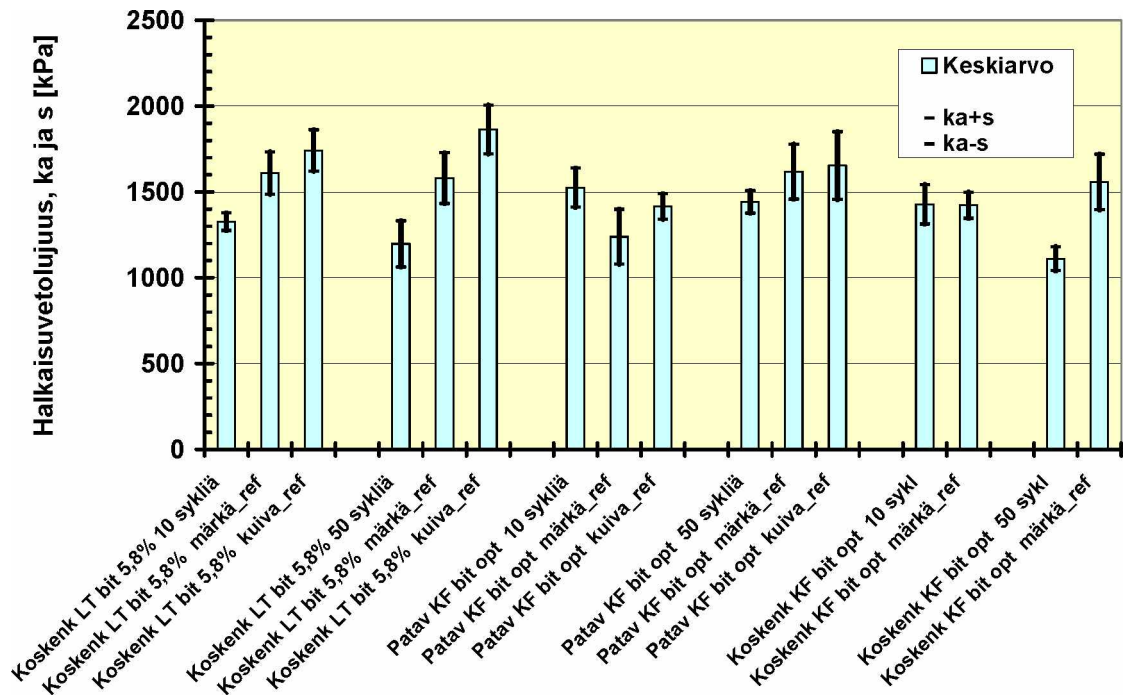
Vertailu- ja tutkimusnäytteiden lujittumiserojen vaikutusta voitaisiin vähentää esim. vanhentamalla näytteitä varastossa ennen jäätymis-sulamissykliä aloitusta, säilyttämällä vertailunäytteitä viileässä tai lyhentämällä syklin pituutta. Betonitutkimuksissa näytteitä säilytetään menetelmäohjeessa määrätty aika (esim. 28 vrk) ennen jäätymis-sulamissykliä aloitusta. Yksittäisen jäätymis-sulamissyklin pituutta voitaisiin lyhentää 50 % (24 h → 12 h), jos näytteet jäädytettäisiin ilmassa (eikä vedessä).

Yhteenveto halkaisuvetojäykkyyksistä on kuvassa 33 ja jäykkyysmoduuleista kuvassa 34.

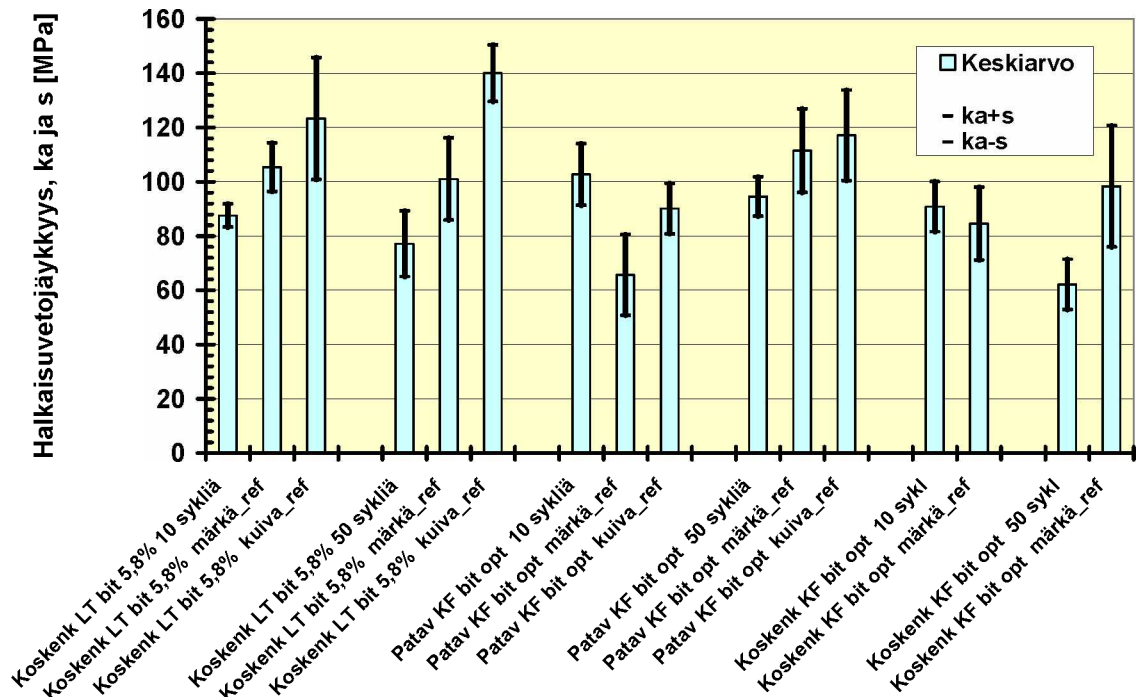
Keskiarvot kuvaavat kunkin ominaisuuden keskimääräisen tason näytesarjoittain, keskihajonnat kuvaavat kunkin näytesarjan yksittäisten näytteiden keskinäisiä eroja. Mitä suurempi keskihajonta on verrattuna keskiarvoon, sitä epävarmempi on keskiarvotulos. Kuvassa 35 on esitetty keskihajonnan ja keskiarvojen suhdeluku prosentteina.

Kuvat 32 ja 35 osoittavat näytteiden halkaisuvetolujuuksien tulosten keskihajonnan olevan suhteellisen alhainen (hajonta yleensä alle 10 % keskiarvosta). Sen sijaan halkaisuvetojäykkyys- ja jäykkyysmoduulitulosten keskihajonta on merkittävästi suurempi. Tulosten keskihajonnan perusteella halkaisuvetolujuus soveltuu paremmin

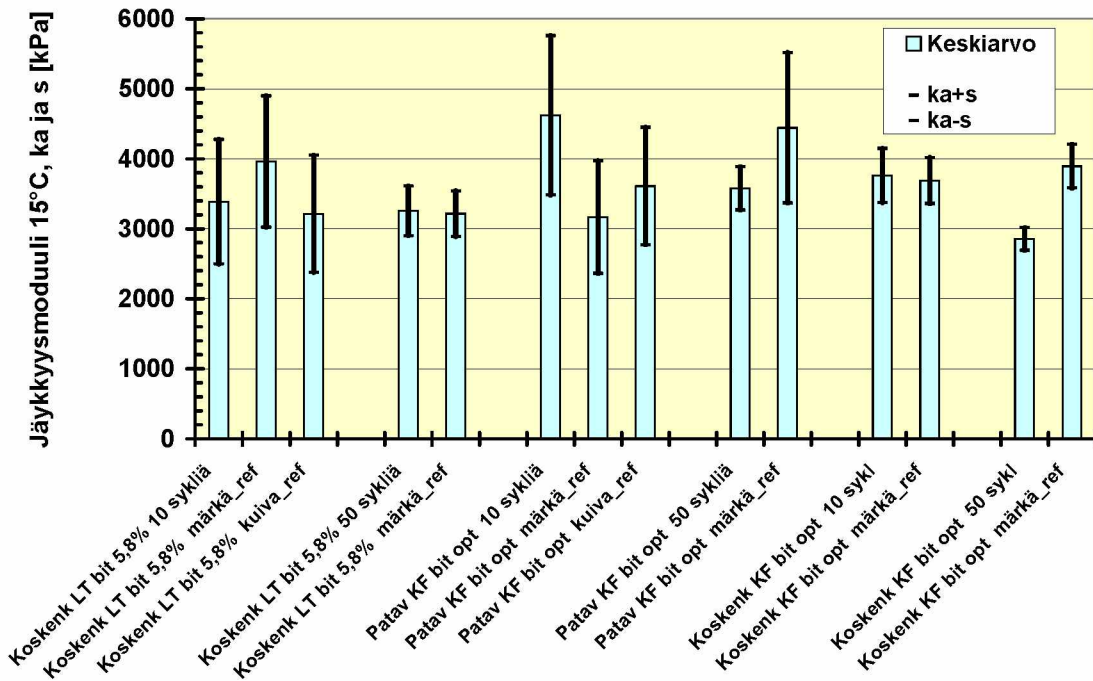
kuin halkaisuvetojäykkyys tai jäykkysmoduuli SMA-näytteen jäätymsulamiskestävyyden arviointiin. Kuvissa 32–35 SMA:n suhteituksen mukaiset optimibitumipitoisuudet ovat Koskenkylä 6,0 % ja Patavuori 5,6 %.



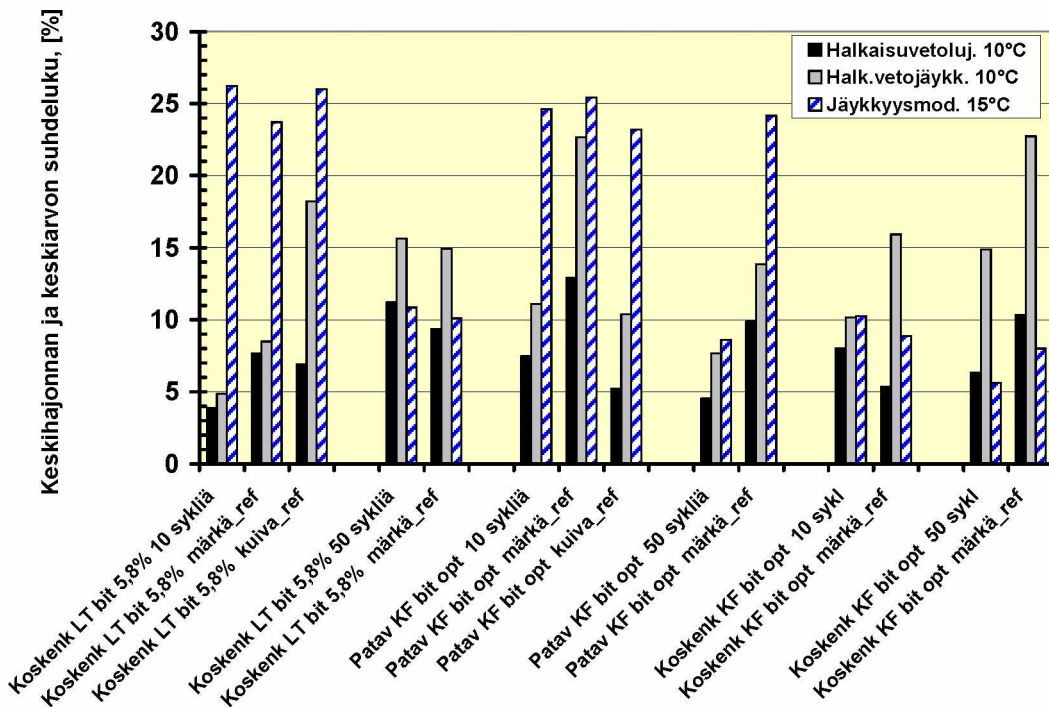
Kuva 32. SMA16-massojen halkaisuvetolujuudet. Jäätymsulamiskokeessa 10 ja 50 sykliä rasitetut näytteet sekä kuivissa olosuhteissa säilytetyt vertailunäytteet halkaistuna kuivina tai vesi-imeytyksen jälkeen.



Kuva 33. SMA16-massojen halkaisuvetojäykkyydet. Jäätymsulamiskokeessa 10 ja 50 sykliä rasitetut näytteet sekä kuivissa olosuhteissa säilytetyt vertailunäytteet halkaistuna kuivina tai vesi-imeytyksen jälkeen.



Kuva 34. SMA16-massojen jäykkyyshmoduulit. Jäätymis-sulamiskokeessa 10 ja 50 sykliä rasitetut näytteet sekä kuivissa olosuhteissa säilytetyt vertailunäytteet halkaistuna kuivina tai vesi-imeytyksen jälkeen.

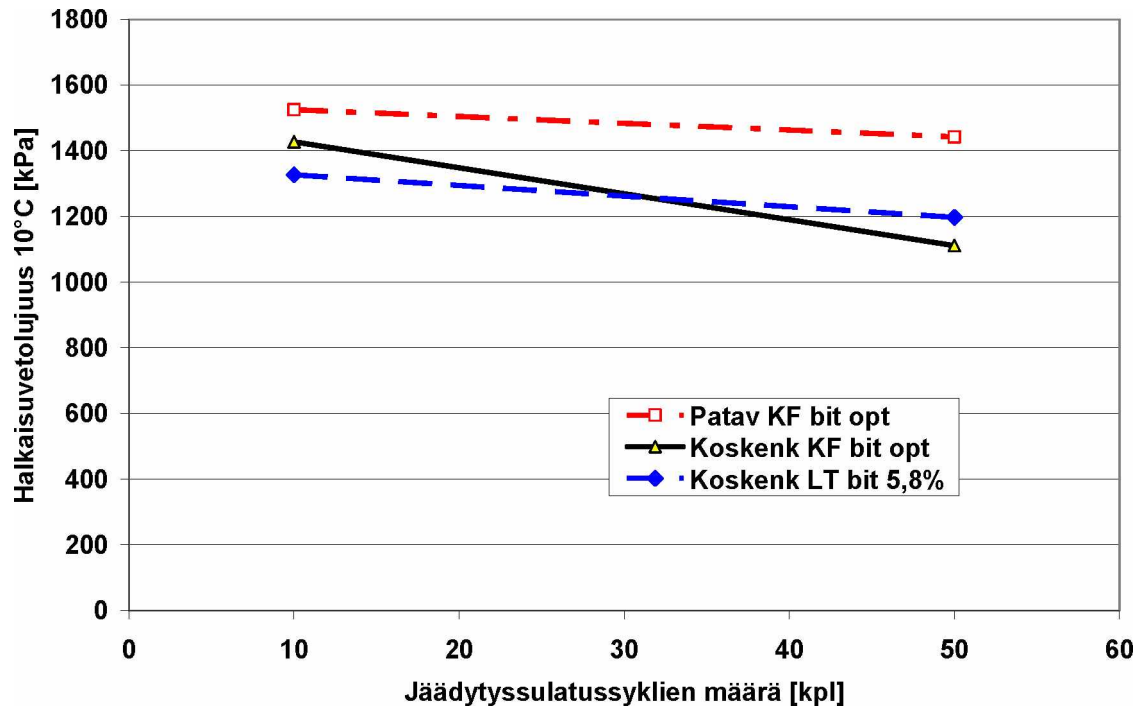


Kuva 35. SMA16-massojen HVL:n, HVJ:n ja moduulin keskihajonnan ja keskiarvon suhdeluku (%). Jäätymis-sulamiskokeessa 10 ja 50 sykliä rasitetut näytteet sekä kuivissa olosuhteissa säilytetyt vertailunäytteet halkaistuna kuivina tai vesi-imeytyksen jälkeen.

Referenssinäytteet säilytettiin huoneilmassa noin 20 °C lämpötilassa sillä aikaa, kun tutkimusnäytteet olivat jäätymis-sulamissykleissä. Referenssinäytteet olivat tämän ajan keskimäärin korkeammassa lämpötilaolosuhteessa ja lujittuivat tästä syystä iän myötä enemmän kuin vertailunäytteet. Kun jäätymis-sulamiskoe päättyi 10 syklin jäl-

keen, näytteet olivat noin 16 vrk ikäisiä ja 50 syklin kokeen jälkeen ne olivat noin 56 vrk ikäisiä eli niiden ikäero oli noin 40 vrk. Patavuoren koostumuksella valmistetut SMA- referenssinäytteet lujittuivat merkittävästi enemmän kuin Koskenkylän koostumuksella valmistetut referenssinäytteet tämän 40 vrk säilytysajan aikana, kuva 32.

Jäätymis-sulamissykleissä olleiden näytteiden halkaisuvetolujuus 10 ja 50 syklin jälkeen on esitetty kuvassa 36.



	10 sykl	50 sykl	Muutos	
	Halkaisuvetolujuus		kPa	%
	kPa	kPa	kPa	%
Koskenk LT bit 5,8%	1327	1197	-130	-9,8
Koskenk KF bit opt	1427	1111	-316	-22,2
Patav KF bit opt	1525	1442	-83	-5,4

Kuva 36. Jäätymis-sulamissykleissä olleiden näytteiden halkaisuvetolujuudet 10 ja 50 syklin jälkeen.

Jäätymis-sulamiskokeissa tulokseksi saatiin kuvien 28 ja 29 mukaan, (kun syklin pituus oli 24 h ja referenssinäytteet imeytettiin ennen halkaisua):

- Jäätymis-sulamiskokeessa vesiupotuksessa olleet "ns. heikennetyn koostumuksen" mukaiset näytteet heikkenivät 10 syklin aikana enemmän kuin suolaliuosupotuksessa olleet näytteet.
- Syklimäärä 10 kpl (24 h syklit vesiupotuksessa) erotteli optimi- ja heikennetyn koostumuksen omaavat Koskenkylän SMA16-massat loogiseen järjestykseen. Jäätymis-sulamiskestävyys oli optimikoostumuksella 100 % ja heikennetyllä koostumuksella 82 %. Jäätymis-sulamista hyvin kestävä kiveä (Patavuori) käytettäessä 10 sykliä jopa paransi halkaisuvetolujuutta sekä VTT:n että Lemminkäinen Infra Oy:n tekemissä kokeissa.
- Kun syklimäärä oli 50 kpl, menetelmän erottelukyky oli heikompi kuin 10 syklin jälkeen.

Kuvien 30 ja 31 mukaan, kun syklin pituus oli 24 h ja referenssinäytteitä ei kasteltu ennen halkaisua:

- Jäätymis-sulamiskoe erotteli selkeästi Patavuoren ja Koskenkylän kiveä käyttäen tehdyt massat.
- Tulokset asettuivat loogiseen järjestykseen.
- Kun käytettiin Koskenkylän kiveä, alennettua bitumipitoisuutta (-0,2 %-yks.) ja lentotuhkaa, SMA:n jäätymis-sulamiskestävyys oli 10 syklin jälkeen 76 % ja 50 syklin jälkeen noin 63 %, kuva 30. Vertailun vuoksi voidaan todeta SMA:n vedenkestävyysvaatimuksen olevan 80 %.

Käytettyjen menetelmien sisällön perusteella näytteiden halkaisuvetolujuustuloksiin vaikuttivat ainakin seuraavat kolme ilmiötä:

- Jäätymis-sulamissykliä aikana tutkimusnäytteiden lujuutta mahdollisesti heikentävä vaikutus, jonka suuruus riippui mm. kiviaineksen mineraalikoostumuksesta ja kokeen syklimäärästä.
- Jäätymis-sulamissykliä ja varastoinnin aikana sekä tutkimus- ja että referenssinäytteitä lujittava vaikutus, jonka suuruus riippui säilytyslämpötilasta ja säilytysajan pituudesta (korkeammasta säilytyslämpötilasta johtuen referenssinäytteisiin kohdistui suurempi lujittava vaikutus).
- Halkaisuvetolujuuskokeen aikana sekä tutkimus- ja että referenssinäytteiden lujuutta lisäävä vaikutus, joka aiheutui siitä, että näytteiden tyhjätilat olivat täynnä vettä ja halkaisuvetolujuuskoe kesti suhteellisen lyhyen ajan (kokoonpuristumaton vesi tuki näytettä).

Tutkimus- ja vertailunäytteiden veden täyttämisen tyhjätilan ja erilaisten säilytyslämpötilojen vaikutukset saattoivat peittää asfalttimassojen suhteellisen pienten koostuserojen mahdollisen vaikutuksen jäätymis-sulamiskestävyyskokeen tuloksiin.

Projektin loppuvaiheessa laaditussa jäätymis-sulamiskestävyyskokeen PANK-menetelmäkuvauksessa pystyttiin projektin tulosten perusteella poistamaan merkittävästi edellä kuvattu virhelähteitä.

3.3.6 Jäätymis-sulamiskestävyys käsityömenetelmällä

Lemminkäinen Infra Oy:n laboratoriossa tutkittiin käsityömenetelmällä Patavuoren kiviainesta sisältävän SMA16- massan jäätymis-sulamiskestävyys syklimäärällä 10 kpl. Massa valmistettiin sekä tartukkeellisena että ilman tartuketta [11]. Massan koostumus on esitetty liitteessä 3.

Käsityömenetelmällä tehtyjen kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. SMA 16 massan jäätymis-sulamiskestävyys (käsityömenetelmä, syklin pituus 24 h, syklimäärä 10 kpl), [11].

	Vertailunäytteet		Jäädytys-sulatusnäytteet		Jäätymis-sulamiskestävyyskerroin (%)
	Tyhjätila (%)	HVL (MPa)	Tyhjätila (%)	HVL (MPa)	
Perusmassa	6,4	1850	6,4	1920	104
Tartukkeellinen	7,4	1910	7,6	2020	106

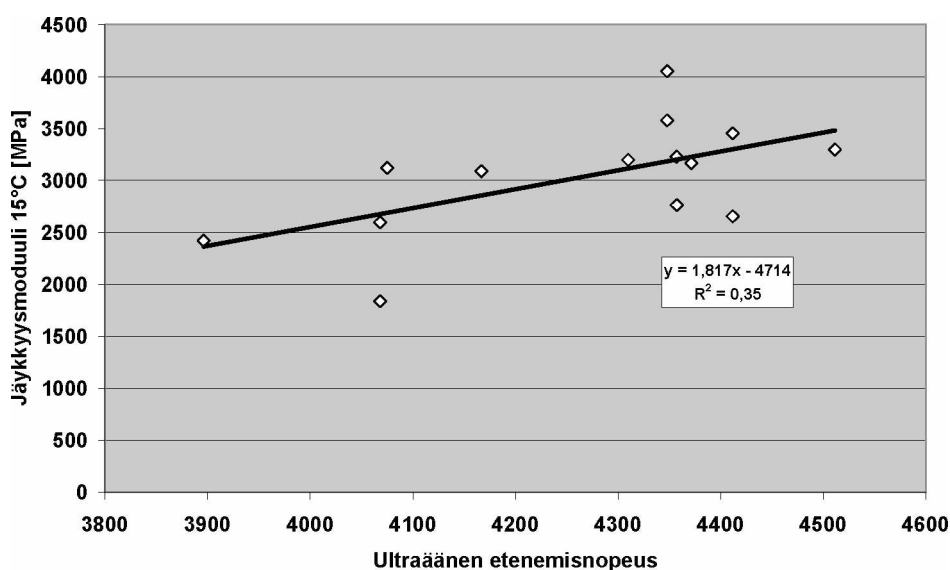
Käsityömenetelmällä tehdyissä jäätymis-sulamiskestävyyskokeissa 10 jäätymis-sulamissykliä vaikutti samalla tavoin kuin VTT:n automaattisella laitteella tehdyissä kokeissa. Molemmassa Patavuoren mursketta sisältävän SMA-massan lujuus parani.

3.3.7 Jäykkyyden riippuvuus ultraäänen etenemisnopeudesta

Jäätymis-sulamiskokeiden tutkimus- referenssinäytteille tehtyjen jäykkyydsmoduulimääritysten tuloksia verrattiin samoille näytteille tehtyihin ultraäänimittauksiin. Kuvassa 37 on esitetty 24 h pituisissa sykleissä koestettujen SMA-näytteiden jäykkyydsmoduulin riippuvuus samoista näytteistä mitatusta ultraäänen etenemisnopeudesta. Jäykkyydsmoduulilla ja ultraäänimittaustuloksilla oli kohtalainen korrelaatio (korrelaatiokerroin $r = 0,59$).

Riippuvuus ei kuitenkaan ole yhtä hyvä kuin esim. STABIL-projektin komposiittistabilointinäytteiden ultraäänikokeissa. Tulokseen voivat vaikuttaa esim. seuraavat syyt:

- SMA-näytteestä ultraäänimittaukset tehtiin eri suunnassa kuin epäsuoraan vetoon perustuva jäykkyydsmoduuli. (Komposiittistabilointinäytteille tehty yksiaksiaaliseen puristukseen perustuva jäykkyydsmoduuli tehtiin samassa suunnassa kuin ultraäänimittaus).
- SMA:n merkittävästi korkeampi bitumipitoisuus.



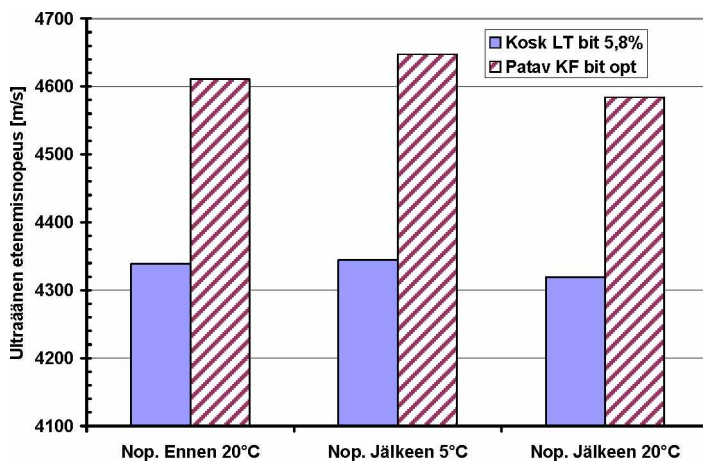
Kuva 37. Jäykkyydsmoduulin riippuvuus ultraäänen etenemisnopeudesta SMA-näytteissä.

SMA-päällysteen itsekorjautuvuutta tutkittiin ultraäänilaitteella myös siten, että samalle näytteelle tehtiin ultraäänikokeita näytteen käsittelyjen eri vaiheissa:

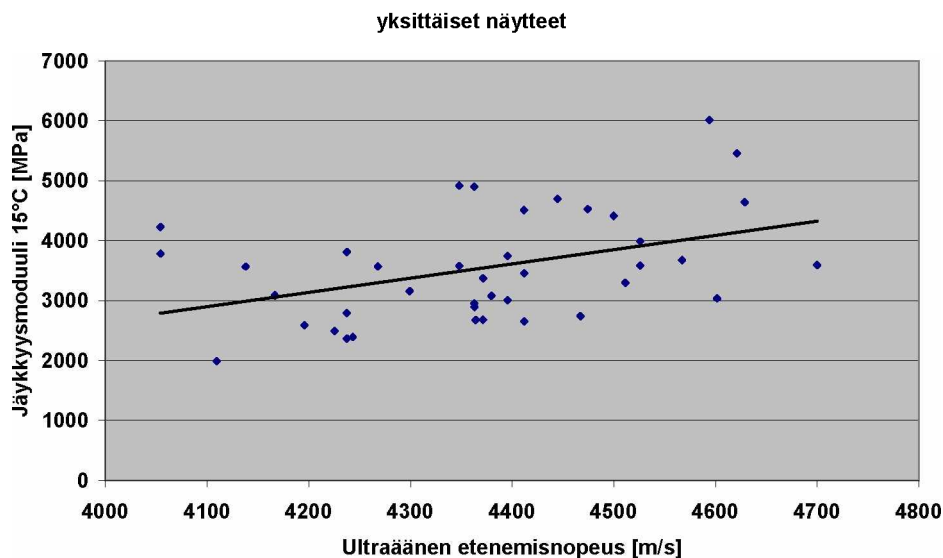
- ennen jäätymis-sulamiskoetta,
- 50 syklin jälkeen märän näytteen ollessa lämpötilassa +5 °C ja
- uudelleen vuorokautta myöhemmin märän näytteen lämpötilassa +20 °C.

Kuvassa 38 on esitetty ultraäänen etenemisnopeudet näytteen käsittelyn eri vaiheissa. Ultraääni kulkee ehjässä näytteessä nopeammin kuin halkeilleessa. Tässä kokeessa ultraääni kulki suurimmalla nopeudella 5 °C:ssa heti vanhennuksen jälkeen. Asfaltti on jäykempää alhaisemmassa lämpötilassa, mikä selittää suurempaa kulkunopeutta.

Kuvassa 39 on esitetty jäykkyysmoduulien riippuvuus samoista näytteistä mitatuista ultraäänen etenemisnopeuksista (jäädytys-sulatuskokeella tutkitut uusintänäytteet ja niiden vertailunäytteet). Näillä tunnuslukujen välinen korrelaatio oli heikko.



Kuva 38. Ultraäänen nopeus SMA-näytteessä eri lämpötiloissa (ennen ja jälkeen jäätymis-sulamiskokeen 50 sykliä).



Kuva 39. Jäykkyysmoduulin riippuvuus ultraäänen etenemisnopeudesta (uusitut näytteet ja niiden vertailunäytteet).

3.4 Vertailukohteiden vauriot

Tiestöllä sijaitsevien vertailukohteiden vauriot tarkastettiin silmämääräisesti henkilöautolla ajamalla 26.5.2010. Tarkoitus oli selvittää taulukon 20 mukaisten kohteiden päällysteiden reiät, purkaumat ja paikkaukset. Osassa kohteissa viimeinen päällystystoimenpide oli ajokaistan tai ajoradan levyinen uusi päällyste, osassa kohteista oli päällystetty molemmat ajourat urapaikkauksella. Kohteen pituista urapaikkausta ei kirjattu vaurioksi, vaan kunnostustoimenpiteeksi, jonka vauriot tarkastettiin kuten muunkin kunnostustoimenpiteen vauriot. Vauriotarkastuksen tulokset on esitetty taulukossa 20. Vertailukohteet olivat pääosin hyvässä kunnossa, kun ensisijainen kriteeri oli päällysteen reikien ja purkaumakohtien määrä ja laajuus. Niissä ei ollut laajalaisia purkaumakohtia.

Useiden vertailukohteiden läheisyydessä esim. rampeissa ja niihin liittyvien tai niiden lähellä olevien päällysteiden saumoissa oli huomattavasti enemmän vaurioita kuin varsinaisissa vertailukohteissa. Vaikka vertailukohteissa oli suhteellisen vähän vaurioita, ajoreitin varrella oli runsaasti muita kohteita, joiden päällysteissä oli liikenneturvallisuutta vaarantavia reikiä.

Taulukko 20. Vertailukohteiden vauriot 26.5.2010.

Kohde n:o	Tie-luokka	Päällystys-pituus m	Massa-tyyppi	Massa-määrä kg/m ²	Työ-menetelmä	VAURIOT
Päällystysvuosi 2008						
1	mt	3559	SMA 16	90	TJYR / LTA	Kaksi paikattua kohtaa ajoradan oikeassa reunassa
2	mt	2898	SMA 16	90	LJYR	Laajalta alueelta rapautuneen näköistä karkeaa pintaa. Poikkikatkoja.
3	kt	4298	SMA 16	90	LJYR	Halkeama keskisauman vieressä, pituus yli 100 m. Sauman reunahalkeamia. Halkeamia osin korjattu bitumijuotoksin. Yksi paikkauskohta.
4	vt	3400	SMA 16	100		Ei vaurioita
5	vt	4300	SMA 16	100		Urassa pituushalkeamia. Poikkikatkoja
Päällystysvuosi 2009						
6	mt	779	SMA 16	100	LJYR	Paikkauksia keskisauman vieressä. Yksi reikä sauman vieressä ja yksi reikä reunaviivalla.
7	vt	8774	SMA 16	100		Ajoradan keskisaumalla pituushalkeamia.
8	vt	640	SMA 16	100	Urapaikkaus	Ei vaurioita (vanhassa päällysteessä poikkikatkoja)
YHTEENSÄ		28648				

3.5 Veden ja kuormituksen yhteisvaikutus

3.5.1 Yleistä

Asfadur-projektin toisessa vaiheen tutkimuksen painopiste suunnattiin asfaltin jäätymis-sulamiskestävyyden asemasta veden ja raskaiden ajoneuvojen aiheuttamien kuormitusten yhteisvaikutusten tutkimiseen. Veden ja kuormitusten yhteisvaikutuk-

sen arvioitiin olevan merkittävä tekijä kevättalvella päällysteisiin syntyvien reikien ja purkaumien syntymiseen.

VTT kehitti Asfadur-projektin yhteydessä testimenetelmän ja laitevalmiudet tämän vaurioitumismekanismin tutkimiseen. Menetelmässä käytettiin VTT:n olemassa olevaa tutkimuslaitetekantaa uudella tavalla, joten kehitystyö ei edellyttänyt kalliita laitehankintoja.

3.5.2 Menetelmän protoversio

Veden ja raskaan liikenteen aiheuttamia dynaamisia kuormituksia simuloiva koe suoritettiin MTS-laitteella aksiaalisen dynaamisen syklisen puristuskokeen avulla. Kokeessa mitattiin näytteen kokoonpuristuma syklien aikana ja sen tutkimusparametrejä olivat mm. näytteen lämpötila, kosteustila, maksimipaine kokeen aikana, yksittäisen syklin pituus, näytteen koostumus, tyhjätila ja esikäsitteilyt. Tutkimusmenetelmä nimettiin paineiskukokeeksi, koska näyte pyrittiin rikkomaan vedessä nopeilla, isku-
maisilla syklisesti toistuvilla kuormituksella.

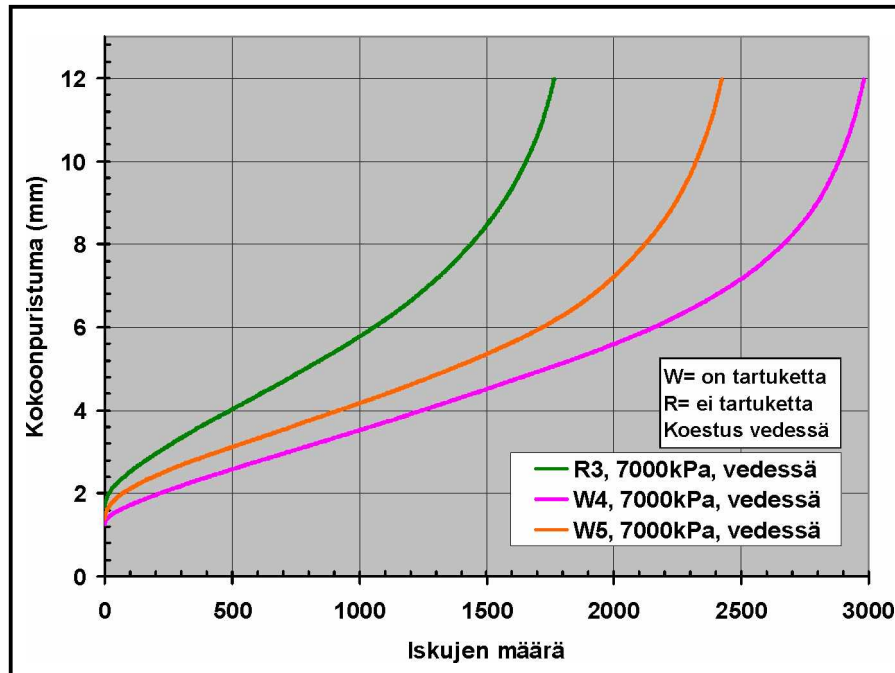
Koska menetelmästä pyrittiin kehittämään päällysteen suunnittelun apuväline, oli myös yksittäisen testin tekemiseen kuuluva maksimiaika tärkeä reunaehto menetelmän kehitystyössä. Kokeeseen kuuluva aika riippui syklimäärästä ja yksittäisen syklin pituudesta. Näytteen kokoonpuristuma puristuksen suunnassa kuvasi näytteen vaurioitumista ja sille valittiin ennen koetta maksimiarvo (mm), jossa puristus keskeytettiin, jos näyte ei ollut murtunut sitä ennen. Valittuun kuormituskokeen kesto-aikaan ja näytteen kokoonpuristumaan voitiin päästä säätämällä näytteen lämpötilaa ja kuormituspainetta näytteen pinnassa. Jos myös koestuslämpötila valittiin vakioksi, yksittäisessä koesarjassa voitiin kokeilemalla selvittää kuormitustaso, jolla saavutettiin koesarjan reunaehdot (kokoonpuristuma valitussa lämpötilassa ja vaaditussa koestusajassa).

Asfaltin reikiintymisen oli aiemmin todettu syntyvän pääasiallisesti pakkasjakson jälkeen kevättalvella. Kevättalvella asfalttipäällysteen pintalämpötila voi vaihdella merkittävästi. Tiesääasemamittausten mukaan esim. huhtikuussa esiintyi vuosina 2003–06 useimmilla tutkimusotoksen sääasemilla yli +20 °C päällysteen pintalämpötiloja (liite 7). Tästä syystä paineiskututkimuksen näytteiden lämpötilan vaihteluväliksi valittiin +5...+20 °C.

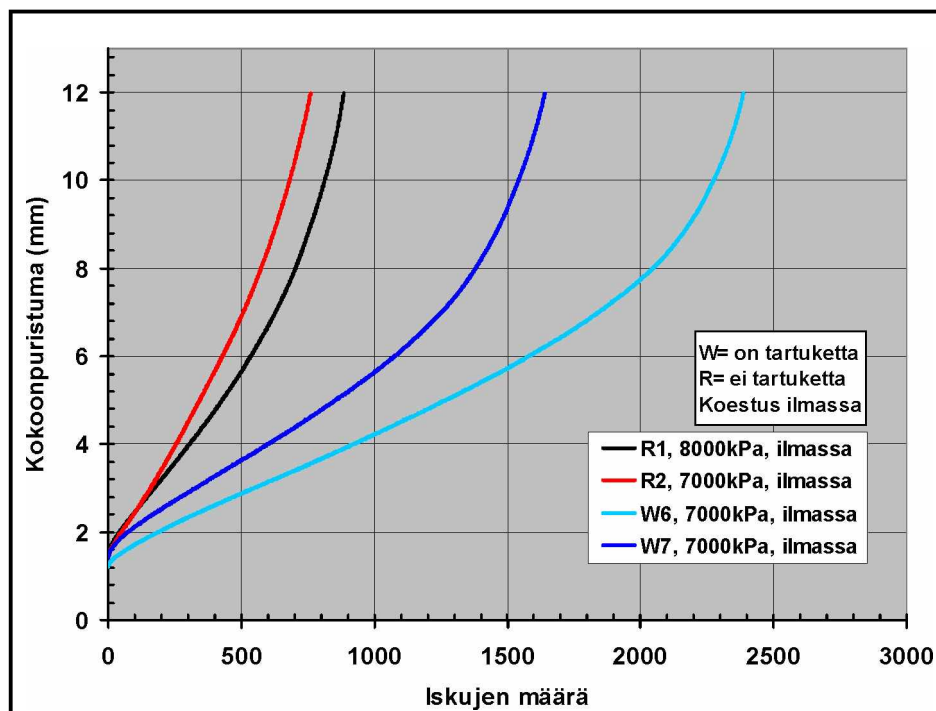
Kuoma-autojen Supersingle-renkaiden aiheuttamat dynaamiset paineet asfaltin pinnassa ovat noin 20 MPa. Tämä valittiin paineiskukokeen suurimmaksi pintapaineeksi (ensimmäistä kokeilua lukuun ottamatta).

Kun ensimmäisessä paineiskukokeessa valittiin alhainen koestuslämpötila ja näyte pyrittiin testaamaan muutamassa tunnissa, päädyttiin useiden kokeilujen perusteella erittäin korkeaan pintapaineen tasoon 7000 kPa. Koestus keskeytettiin, jos näytteen kokoonpuristuma saavutti 12 mm rajan (= 20 % näytteen korkeudesta).

Koetulosten mukaan paineiskulaitteen protoversiolla pystyttiin rikkomaan näytteet alle kahdessa tunnissa. Tarutuke paransi sekä vesiupotuksessa (kuva 40) että kuivina (kuva 41) koestettujen näytteiden paineiskujen kestävyyttä. Vesiupotuksessa ja kuivina koestettujen näytteiden koestutulosten eroja ja näiden erojen todennäköisiä syitä on lähemmin kuvattu raportin kohdassa 3.6.



Kuva 40. Tartukkeen vaikutus vedessä koestettujen näytteiden paineiskunkestävyyden ($W = \text{on tartuke}$, $R = \text{ei tartuketta}$, $T = +5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 7000\text{ kPa}$).



Kuva 41. Tartukkeen vaikutus kuivina koestettujen näytteiden paineiskunkestävyyden ($W = \text{on tartuke}$, $R = \text{ei tartuketta}$, $T = +5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Edellä esitetyistä tuloksista on huomattava, että asfaltin lämpötila oli kokeessa alhainen ($+5\text{ }^{\circ}\text{C}$), kuormituksen pintapaine erittäin suuri (7000 kPa) ja valittu kuormituskokeen pisin sallittu kesto-aika erittäin lyhyt. Näytteen pinnassa oli rikkoutuneita kiviainesrakeita. Korkea pintapaine lisäsi kiven rikkoutumista, kuva 42.



Kuva 42. Näytteen pinnassa rikkoutuneita kiviä vesipaineiskukokeen jälkeen ($T = +5\text{ °C}$, $p = 7000\text{ kPa}$)

3.5.3 Lämpötilan, veden ja kuormitusten yhteisvaikutus

Toisen koestuserän näytteet olivat SMA16-massaa, jonka tyhjätilatavoite oli erittäin korkea (ylisuuren tyhjätilan tavoite noin 8 %, sallittu vaihteluväli 8–10 %).

Kuvassa 43 on esitetty kolmessa eri kuormitusolosuhteessa tutkittujen näytteiden kokoonpuristuman riippuvuus lämpötilasta ja pintapaineesta, kun paineiskukoe tehtiin vesiupotuksessa.

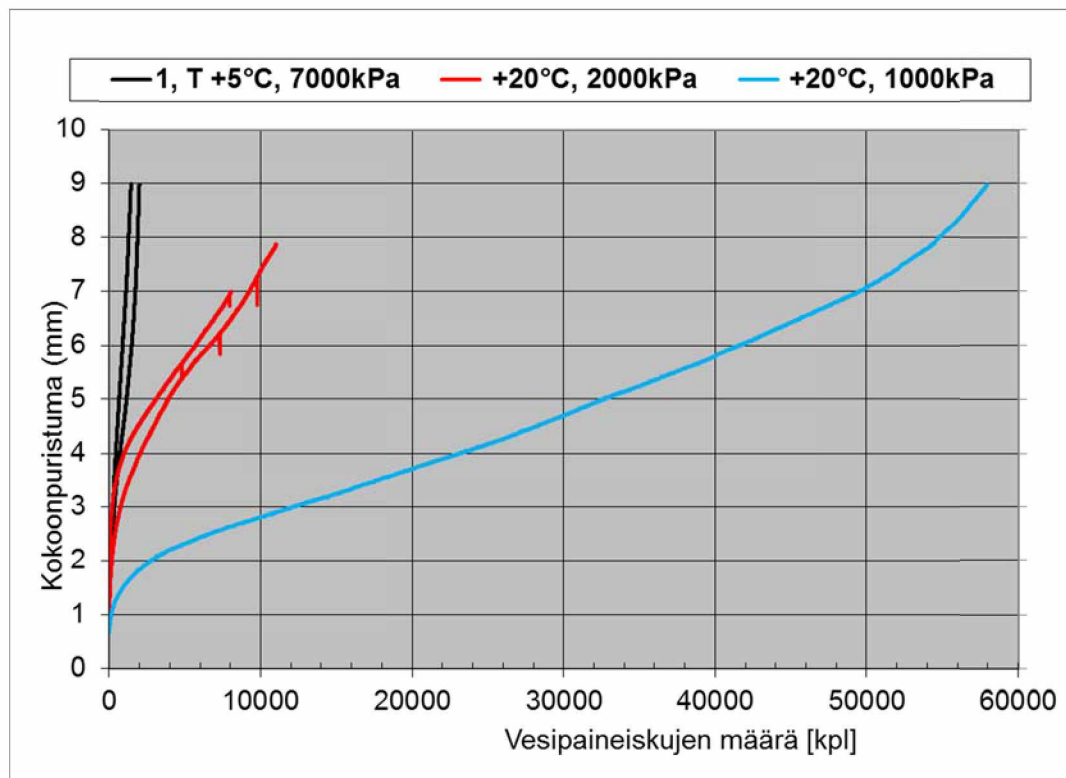
Kuormitusolosuhdevaihtoehdot olivat:

- näytteen pintapaine 7000 kPa ja lämpötila +5 °C
- näytteen pintapaine 2000 kPa ja lämpötila +20 °C
- näytteen pintapaine 1000 kPa ja lämpötila +20 °C.

Pintapaine 1000 kPa vastaa kuorma-auton paripyörän aiheuttamaa dynaamista painetta päällysteen yläpinnassa ja 2000 kPa vastaavasti kuorma-auton Supersingle-pyörän aiheuttamaa dynaamista painetta.

Pintapaine 7000 kPa on suurempi kuin raskas liikenne aiheuttaa ja tällä kokeella pyrittiin selvittämään, kuinka suuri paine tarvitaan, jotta koestus voidaan suorittaa lyhyessä ajassa (kahdessa tunnissa) viileässä (+5 °C) lämpötilassa.

Viileässä koestetuilla näytteillä oli erilainen murtumismekanismi kuin lämpötilassa 20 °C koestetuilla näytteillä.



Kuva 43 SMA-näytteen kokoonpuristuman riippuvuus lämpötilan, veden, kuormituksen suuruuden ja kuormituskertamäärän yhteisvaikutuksesta vesipaineiskukokeessa.

Liitteessä 13 on havainnollistettu puolisiniaallon muotoisen kuormitusyökin pinta-painetta ja kokoonpuristumaa, kun kuormitus kohdistui joko metallialustaan tai metallialustan päällä olevan asfalttinäytteen yläpintaan.

Molemmissa on sama pintapaine, mutta alustasta riippuen erilainen kokoonpuristuma. Kun kuormitus kohdistui metallipintaan, siirtymä kuvasi itse kuormituslaitteiston kokoonpuristumaa ("klappia"). Kun yhtä suuri kuormitus kohdistui asfaltin pintaan, siirtymä oli luonnollisesti moninkertainen ja sisälsi sekä laitteiston että asfaltin kokoonpuristuman. Kun asfaltin kokoonpuristuma oli suuri, laitteiston kokoonpuristuman merkitys oli siihen verrattuna vähäinen.

3.5.4 Murtumismekanismi

Kuvassa 44 on esitetty näyte kuormituslaitteessa vesipaineiskukokeen lopussa (lämpötila 20 °C, ilman kumitiivistettä). Näyte murtui eri tavoin lämpötilasta riippuen:

- Kun lämpötila oli + 5 °C, näytteen kokoonpuristuminen edellytti olennaisesti suurempia kuormia ja se murtui äkillisesti, myös kiviä rikkoen. Murtumisen jälkeen näytteen pinta oli vino, kuva 45.
- Kun lämpötila oli +20 °C, näyte deformatui iskujen määrän kasvaessa ja murtui vähitellen mastiksia murtaen. Kivet pysyivät ehjinä ja näytteen yläpinta jäi suoraksi, kuva 46.



Kuva 44. Näyte vesipaineiskukokeen lopussa.



Kuva 45. Näyte murtumisen jälkeen lämpötilassa +5 °C ($p = 7000 \text{ kPa}$, ei tiivistettä).



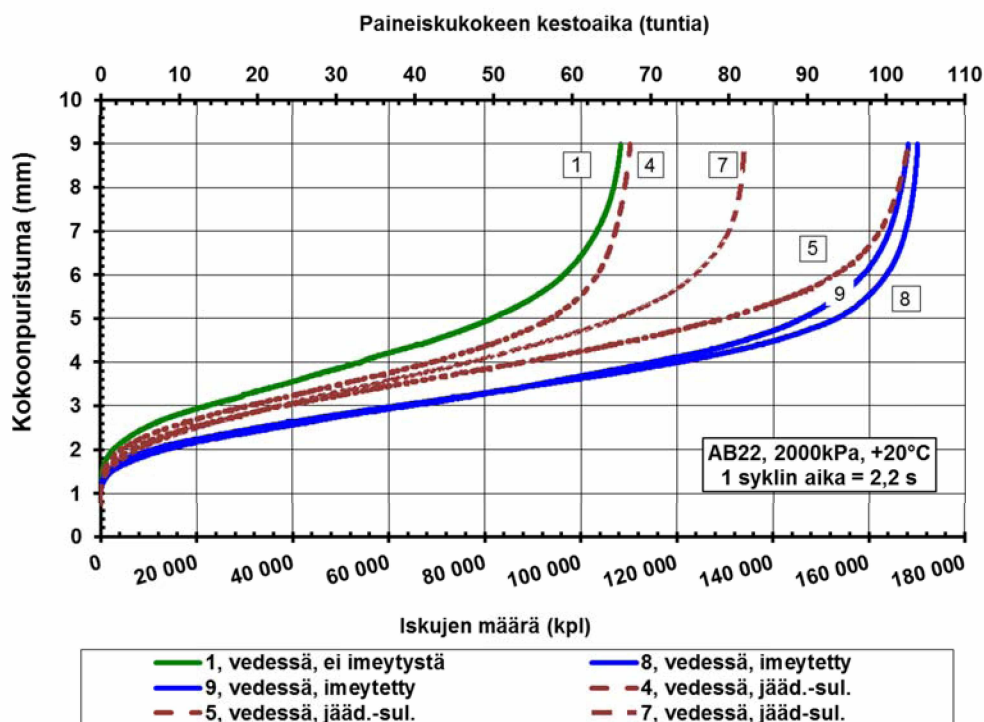
Kuva 46. Näytteen murtuminen tapahtui pintapaineilla 1000...2000 kPa mastiksia murtaen ($T +20 \text{ °C}$, ilman tiivistettä).

3.5.5 Jäätymis-sulamisen ja kuormitusten yhteisvaikutus

Asfalttipäällysteiden reikiintyminen kevättalvella pakkasjakson jälkeen viittaa mahdollisuuteen, että pakkaskaudella jäätymis-sulamissyklit olisivat voineet aiheuttaa päällysteeseen alkuvaurion kohtaan, jossa märkä päällyste alkaa purkaantua jäätymis-sulamisen aiheuttaman alkuvaurion, veden ja kuormitusten yhteisvaikutuksesta. Tästä syystä tehtiin koesarja, jolla selvitettiin jäätymis-sulamisen ja vesipaineiskujen yhteisvaikutus.

Projektissa kehitettyä jäätymis-sulamiskoemenetelmää muutettiin siten, että

- luovuttiin tutkimusnäytteiden tutkimisessa muovipurkeissa vesiupotuksessa, koska vesi hidasti näytteen jäätymistä. Tutkimusnäytteet sijoitettiin sen sijaan ilman vesipurkkeja vapaasti ritilöiden päälle jäädytys-sulatuslaitteen näytealtaaseen,
- ennen jäädytysvaiheen alkua vesi pumpattiin pakkaslaitteen näytealtaasta takaisin ulkoiseen vesisäiliöön ja näytteet jäädytettiin jäädytys-sulatuslaitteen ilmatilassa. Sulatusvaiheen alussa vesi pumpattiin ulkoisesta vesisäiliöstä takaisin näytealtaaseen ja näytteet sulatettiin vedessä,
- vertailunäytteiden säilytyslämpötilaksi päätettiin muuttaa +5 °C (aiempi säilytyslämpötila oli +20...+23 °C).



Näyte		1	2	3	4	5	6	7	8	9	ka
Tyhjättila IPK	%	6,5	6,4	6,4	6,5	6,0	6,0	6,1	6,0	6,1	6,2
Tiheys	%	2293	2297	2297	2295	2305	2305	2304	2306	2304	2301

Kuva 47. AB 22-näytteiden vesipaineiskunkestävyys, kun näytteitä oli ensin rasitettu jäätymis-sulamissykleillä sekä vesipaineiskunkestävyyden riippuvuus asfaltin vedellä kyllästysasteesta (bit. 50/70).

Jäätymis-sulamiskokeen menetelmämuutoksella saavutettiin seuraavia etuja:

- sulamisvaihe nopeutui ja vuorokaudessa ehdittiin tutkia 2 jäätymis-sulamissykliä (aiemman yhden asemasta) ja samalla valitun syklimäärän testausaika lyheni 50 %
- referenssinäytteiden lujittuminen testin aikana väheni, koska niiden säilytysaika lyheni ja säilytyslämpötila aleni.

Edellisessä kuvassa 47 on esitetty asfalttibetonin kestävyys jäätymis-sulamisasi-
rasituksen sekä veden ja kuormitusten yhteisvaikutusta vastaan. Näytteisiin 4, 5 ja 7 kohdistettiin ensin 10 jäätymis-sulamissykliä (jäädytys ilmassa – sulatus vedessä) sen jälkeen syklinen paineiskukoe vedessä. Näytteet 8 ja 9 koestettiin vedessä paineiskukokeella asfaltin tyhjätilan ollessa veden täyttämä ja näyte 1 koestettiin vedessä paineiskukokeella ilman edeltävää vesi-imeytystä alipaineessa.

Parhaiten kestäivät vesipaineiskuja näytteet, joiden tyhjätila oli kokonaan veden täyttämä, toiseksi parhaiten kestäivät jäätymis-sulamissykleillä esirasitetut näytteet ja huonoimmin kesti näyte 1, jonka tyhjätila oli osittain veden täyttämä. Jäätymis-sulamissyklit heikensivät asfaltin kykyä kestää kuormituksia märkänä. Kun asfaltin vedellä kyllästysaste oli 100 %, se kesti paremmin veden ja kuormitusten yhteisvaikutusta kuin vedellä kyllästysasteen ollessa alhaisempi.

Esirasituksena käytetyt jäätymis-sulamissyklit aiheuttivat näytteisiin muutoksia (alkuvaurioita), joiden jälkeen näytteen kestävyys veden ja kuormituksen yhteisvaikutusta vastaan vesipaineiskukokeessa oli heikompi kuin näytteillä, jotka eivät olleet jäätymis-sulamissykleissä ennen vesipaineiskuja.

Kuvan 47 mukaan vesipaineiskukokeessa oli kaikilla näytteillä ”kokoonturistuma is-
kumäärän funtiona” - käyrillä oli sama muoto:

- Aluksi näytteiden kokoonturistuma kasvoi syklien aikana nopeasti ja alkoi sen jälkeen hidastua.
- Kaikilla näytteillä kokoonturistuma kasvoi merkittävän ajan (1–4 vrk) lähes suoraviivaisesti.
- Kokoonturistuman kasvunopeuden (mm/sykli) käänneaste oli kaikilla näyt-
teillä, kun kokoonturistuma oli noin 3,5 mm. Tämä jälkeen kokoonturistuma
alkoi kasvaa kiihtyvällä nopeudella.
- Kun kokoonturistuma ylitti noin 5 mm, alkoi vaurio kasvaa erittäin nopeasti.

Merkille pantavaa on, että kaikkien näytteiden vaurioituminen alkoi nopeutua samalla
kokoonturistuma-alueella (noin 3,5 mm), missä oli kokoonturistumakäyrien kaare-
vuuksien matemaattiset käänneasteet.

Taulukossa 21 on esitetty asfalttibetonin (AB 22) jäätymis-sulamiskestävyyskokeiden
tulokset ja taulukossa 22 vedenkestävyyskokeiden tulokset. Tutkitun asfalttibetonin
jäätymis-sulamiskestävyys ja vedenkestävyys olivat näiden tulosten mukaan erittäin
hyvät.

Tässä koestuserässä jäätymis-sulamiskokeen syklit tehtiin ensi kertaa yllä kuvatulla
muutetulla tavalla.

Taulukko 21. Asfalttibetoninäytteiden AB22 jäätymis-sulamiskestävyys (10 sykliä), Jäädytys ilmassa, sulatus vedessä).

Jäädytys ilmassa ja sulatus vedessä (10 sykliä) + Halkaisuvetokoe (10°C)					
näyte n:o		halkaisuvetolujuus	halkaisuvetojäykkyys	tyhjättila ipk	tiheys
		+10 °C	+10 °C		
		kPa	MPa	%	kg/m ³
2	sykli-näytteet	2 587	225	6,3	2 298
12		2 313	177	6,5	2 293
13		2 356	214	6,0	2 305
16		2 448	237	6,1	2 303
18		2 137	242	7,4	2 271
1	referens.-näytteet	2 233	214	7,3	2 274
3		2 786	282	6,2	2 300
8		2 413	238	6,0	2 306
10		2 933	304	6,1	2 303
17		2 516	259	6,6	2 291
Keskiarvo	sykli-näytteet	2 368	219	6,5	2 294
Keskihajonta		149	23	0,5	12
100 x k-haj / ka (%)		6,3	10,5	7,8	0,5
Keskiarvo	ref. näytteet	2 576	260	6,4	2 295
Keskihajonta		253	25	0,2	5
100 x k-haj / ka (%)		9,8	9,5	3,4	0,2
Jäätymis-sulamiskestävyys (10 sykliä)	%	92			

Taulukko 22. Asfalttibetoninäytteiden vedenkestävyys (SFS-EN 12697-12)

näyte n:o		halkaisuvetolujuus	halkaisuvetojäykkyys	tyhjättila ipk	tiheys
		kPa	MPa	%	kg/m ³
4	sykli-näytteet	2 094	237,9	6,1	2 303
11		1 994	220,1	7,0	2 280
15		2 152	265,5	6,3	2 297
19		2 261	258,4	6,2	2 301
20		2 225	246,5	6,1	2 304
5	referens.-näytteet	2 257	174,7	6,4	2 295
6		2 488	221,4	6,2	2 302
7		2 095	193,4	7,0	2 282
9		2 272	184,8	6,2	2 302
14		2 391	215,1	6,1	2 304
Keskiarvo	sykli-näytteet	2 145	245,7	6,4	2297,0
Keskihajonta		95	16	0,4	9
100 x k-haj / ka (%)		4,4	6,5	5,6	0,4
Keskiarvo	ref. näytteet	2 301	198	6,4	2 297
Keskihajonta		133	18	0,3	8
100 x k-haj / ka (%)		5,8	9,0	5,1	0,3
Vedenkestävyys	%	93			

3.5.6 Esirasituksen, veden ja paineiskujen yhteisvaikutus

Edellisen koestuserän kaikkien näytteiden kokoonpuristuma alkoi jälleen nopeutua, kun se oli noin 3,5 mm. Vaurioitumisen nopeutuminen viittasi siihen, että näytteisiin oli syntynyt alkuvaurio käännepisteen kohdalla. Tällä perusteella päätettiin valita neljännen koestuserän näytteiden esikuormitusrajaksi kokoonpuristuma 3,5 mm.

Neljännen koestuserän kaikille näytteille tehtiin ensin esirasitus kuivalla dynaamisella puristuskokeella, jossa kuiviin näytteisiin kohdistettiin dynaamisia paineiskuja ilman vesiupotusta, kunnes kunkin näytteen kokoonpuristuma oli 3,5 mm. Esikuormituskokeen lämpötila tuli valita siten, että käytettävissä olevassa ajassa ehdittäisiin kaikille koestuserän näytteille suorittaa edellä mainittu esirasitus.

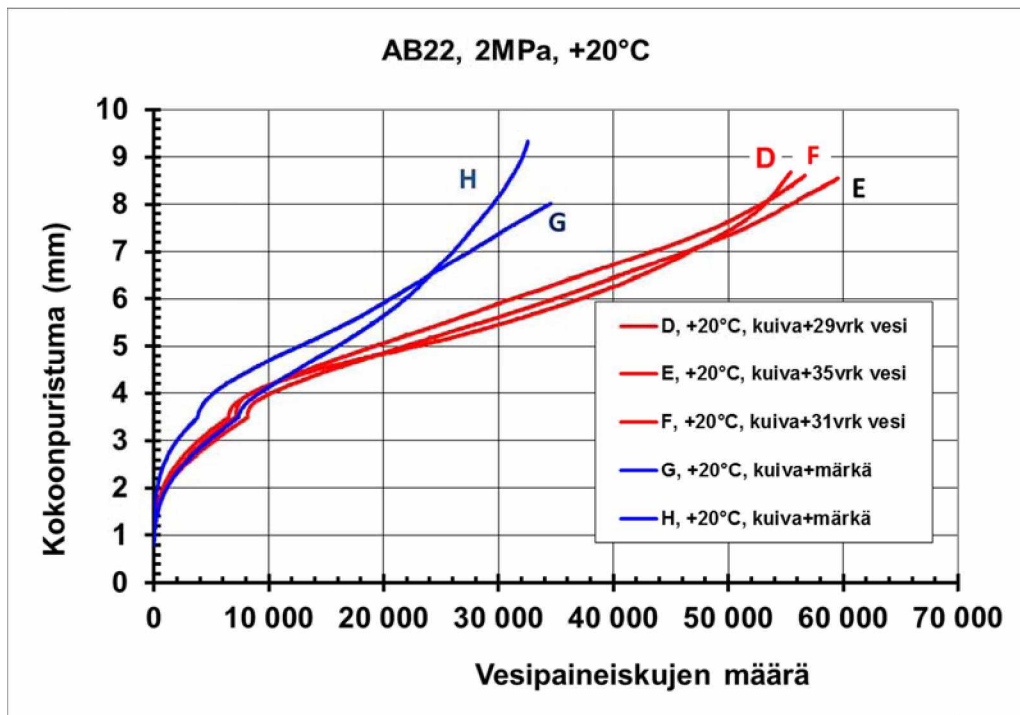
Soveltuvaa esikuormituskokeen lämpötilaa haettiin kokeilemalla lämpötiloissa 5 °C, 10 °C ja 20 °C. Lämpötiloissa 5 °C ja 10 °C kokoonpuristuma kasvoi erittäin hitaasti eikä käytettävissä olleen ajan puitteissa esikoetta voitu jatkaa näissä lämpötiloissa, kunnes valittu tavoite (3,5 mm) olisi saavutettu. Tästä syystä esirasituskokeen lämpötilaksi valittiin 20 °C ja kokoonpuristuman raja-arvoksi 8 mm.

Kuvassa 48 on esitetty kahden erilaisen vesikäsitteilytavan jälkeen näytteiden kokoonpuristumien riippuvuus vesipaineiskumäärästä. Ennen vesipaineiskukoetta kolme rinnakkaisnäytettä (D, E, ja F) oli ensin imeytetty eksikkaattorissa ja sen jälkeen niitä oli säilytetty noin yhden kuukauden ajan vesiupotuksessa ennen vesipaineiskukoetta. Toiset kolme rinnakkaisnäytettä oli pelkästään imeytetty eksikkaattorissa, minkä jälkeen niille oli tehty vesipaineiskukoe.

Kuvan 48 tulos vesisäilytyksen vaikutuksesta paineiskujen kestävyys sisälsi epäloogisuutta, koska kuukauden ajan vesiupotuksessa olleet näytteet kestivät paineiskukokeessa kauemmin aikaa kuin vedellä imeytetyt näytteet. Ilmiötä saattavat selittää erot näytteiden vedellä kyllästysasteessa.

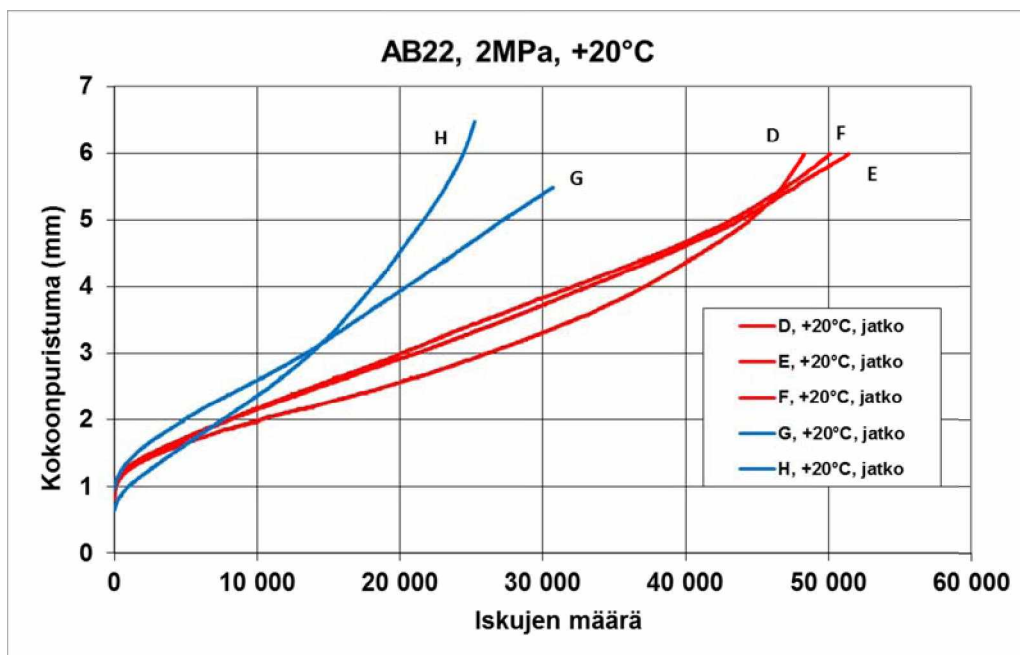
Kuvan 48 käyrien pieni mutka kokoonpuristuman 3,5 mm kohdalla johtui siitä, että näiden näytteiden koestuksessa oli keskeytys ko. kohdassa, jolloin esikuormitusvaihe pysähtyi.

Kuvassa 49 on esitetty erikseen vesipaineiskukokeen kokoonpuristumakäyrät esivaurioiden (3,5 mm kokoonpuristuma) jälkeen.



Näyte		A	B	D	E	F	G	H	K	L
Tyhjätila IPK	%	6,1	6,5	6,4	6,6	6,5	6,8	6,6	6,2	6,4
Tiheys	kg/m ³	2303	2293	2295	2290	2294	2286	2292	2300	2297

Kuva 48. Kaikki näytteet koestettu ensin kuivalla dynaamisella kokeella 3,5 mm kokoonpuristumaan. Sen jälkeen osa näytteistä koestettu dynaamisella paineiskukokeella vesi-imeytyksen jälkeen märkinä ja osa vesisäilytyksen jälkeen märkinä, lämpötila 20 °C, bit. 50/70. (40000 sykliä≈1 vrk)



Kuva 49. Näytteiden kokoonpuristuma esikuormitusrajan (3,5 mm) saavuttamisen jälkeen (syklinen puristuskoee vedessä).

3.6 Vedellä kyllästysasteen vaikutus paineiskunkestävyyteen

Paineiskukokeiden avulla pyrittiin laboratorio-olosuhteissa jäljittelemään raskaiden ajoneuvojen pyörien tiepäällysteisiin kohdistamia nopeita kuormituksia kevättalvella. Pakkasjakson jälkeen jäässä ollut tierakenne alkaa sulaa ylhäältä alaspäin ja tällöin asfalttipäällysteen huokosten muodostamassa tyhjätilassa ollut jää sulaa vedeksi.

Jään sulamisen jälkeen veden poistuminen asfalttipäällysteen tyhjätilasta on hidasta, koska päällysteen alapuoliset kerrokset ovat vielä jäässä. Kevättalven aurinkoisina poutapäivinä asfaltin pintalämpötila voi huhtikuussa nousta yli +20 °C lämpötilaan.

Jos asfaltin tyhjätilassa on vettä, se voi olla kiinteässä tai nestemäisessä olomuodossa tai vesihöyrynä kaasumaisessa olomuodossa. Jos asfaltin lämpötila on plussan puolella, tyhjätilassa vesi voi olla nesteenä tai vesihöyrynä ja osa vedestä voi olla vielä jäässä.

Nestemäisessä olomuodossa oleva vesi on käytännössä kokoonpuristumatonta, mutta ilma ja vesihöyry puristuvat kokoon, kun niihin kohdistuva paine kasvaa. Tästä seuraa merkittäviä eroja veden ja kuormituksen yhteisvaikutukseen sekä tiekohteen päällysteen että laboratoriomenetelmän näytteen kuormitustilanteessa.

Koska esim. betonin kosteus mitataan ja ilmoitetaan joko absoluuttisena tai suhteellisenä kosteutena, on syytä viitata kosteuden mittayksiköiden mukaisiin määritelmiin, joiden mukaan esim.

- betonin absoluuttinen kosteus eli kosteuspitoisuus tarkoittaa betoninäytteen sisältämän veden massan suhdetta betoninäytteen kuivamassaan (%)
- betoninäytteen suhteellinen kosteus tarkoittaa betoninäytteen huokosissa olevan ilman suhteellista kosteutta (%RH).

On huomattava, että betonin suhteellisella kosteudella 100 %, tarkoitetaan tilannetta, jolloin näytteen huokostilan sisältämä ilma on täysin vedellä kyllästynyt. Jos näytteen huokostilaan imeytetään tämän jälkeen edelleen lisää vettä, betonin absoluuttinen kosteus kasvaa, mutta betonin suhteellinen kosteus on edelleen 100 %, sillä lisätty vesi jää tällöin huokostilaan nestemäisenä.

Näitä betonin kosteusparametrejä voidaan soveltaa myös asfalttitekniikassa vastaavalla periaatteella, vaikka niiden vaikutus asfaltissa ja betonissa on erilainen.

Asfalttipäällysteen pintaan kohdistuvat puristusvoimat saavat määrätyissä olosuhteissa aikaan asfalttimassan jälkitiivistymistä tai deformatumista. Jälkitiivistymisen määrään vaikuttavat mm. asfaltin koostumus, lämpötila, kuormitus ja tyhjätila sekä kuorma-autojen pyörien lyhytaikaiset kuormitukset. Kun selvitetään veden ja liikennekuormitusten yhteisvaikutusta asfaltin vaurioitumiseen, tulee ottaa huomioon, millä tavoin vesi vaikuttaa asfaltin tyhjätilassa hetkellisten kuormitusten aikana:

- Kun asfalttipäällysteen tyhjätila sisältää edes osittain ilmaa tai vesihöyryä, asfaltin pintaan kohdistuva kuormitus voi saada aikaan asfaltin jälkitiivistymisen. Jos tällöin kuormitukset ovat samaan aikaan lyhytaikaisia (iskumaisia), voimakkaita ja nopeasti syklistä toistuvia, asfaltin jälkitiivistyminen voi

rikkoa bitumin ja kiviainesrakeiden välisiä sidoksia ja kuormitukset voivat tällöin aiheuttaa päällysteen purkaumavaurioita tai myötävaikuttaa niiden syntymiseen.

- Jos asfaltin tyhjätila on täynnä vettä (= nestemäisessä olomuodossa olevan veden kyllästävä) ja jos kuormitustilanteessa vesi ei poistu tai ei ole ehtinyt kuormituksen aikana poistua huokosista, kokoonpuristumaton huokosvesi tukee päällysteen huokosrakennetta ja vähentää siksi päällysteen jälkitiivistymistä lyhytaikaisen kuormituksen aikana.
- Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että kaikissa testimenetelmissä, joissa tutkitaan asfalttinäytteiden toiminnallisia ominaisuuksia ns. tutkimusnäytteiden ja vertailunäytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvojen suhteen perusteella, yksittäisten tutkimusnäytteiden ja vertailunäytteiden tyhjätiloissa ei saa olla merkittäviä eroja ja yksittäisten näytteiden tyhjätilojen vedellä kyllästysasteen tulee olla yhtä suuret.
- Kun yksittäisten näytteiden tyhjätilojen erot ovat vähäiset, näytteet voidaan saattaa samaan kosteustilaan, joko imeyttämällä näytteiden tyhjätilat alipaineella täyteen vettä, kuivaamalla näytteet vedettömiksi tai saattamalla näytteiden vedellä kyllästymisaste muulla tavalla samaan kosteustilaan.
- Näytteiden tyhjätilojen imeyttäminen täyteen vettä ennen halkaisuvetolujuuskoetta ei ole suositeltavaa, koska veden täyttämät huokokset vaikuttavat halkaisuvetolujuuskoetuloksiin ja voivat peittää samanaikaisen muun veden näytteeseen aikaansaaman vaikutuksen esim. bitumin ja kiviaineksen välisen tartunnan heikkenemisen.
- Näytteiden kuivaaminenkaan vedettömiksi ei ole suositeltavaa, koska tavanomaisen asfaltin huokosissa on luonnon olosuhteissa kevättalvella pakkaskauden jälkeen lähes aina jonkin verran vettä. Huokosissa oleva vesi voi vaikuttaa halkaisuvetolujuuden tuloksiin, vaikka huokokset olisivat vain osittain veden täyttämiä.
- Tutkimus- ja vertailunäytteet pitäisi saattaa samaan vedellä kyllästysasteeseen ennen halkaisuvetolujuuskoetta. Halkaisuvetolujuuskokeessa näytteiden vedelläkyllästysasteen (vaihteluvälin) tulisi mahdollisuuksien vastata tilannetta, jossa kyseisen massakoostumuksen tutkimusnäytteiden halkaisuvetolujuus on pienimmillään. Sopivan menetelmän valitseminen halkaisuvetolujuuskokeessa tutkittavien laboratorionäytteiden vedellä kyllästysasteen tavoitearvon valitsemiseksi ja vedellä kyllästysasteen säätämiseksi tavoitetasolle edellyttäisi tutkimustyötä.
- Nykytilanteessa esim. standardin SFS-EN 12697 -12 menetelmän B mukaisen asfaltin vedenkestävyyskokeen (tavanomaisen tyhjätilan omaavat) tutkimusnäytteet ovat halkaisuvetolujuuskokeessa veden kyllästävät tai vähintään niiden tyhjätilojen vedelläkyllästysaste on korkea, kun sen sijaan vertailunäytteet ovat täysin kuivia. Edellä selostetun perusteella standardin mukaisella tavalla halkaisuvetolujuuskokeessa tutkittavat tutkimus- ja vertailunäytteet eivät ole vertailukelpoisia asfaltin vedellä kyllästysasteen osalta. Menetelmä on siten lähtökohdiltaan virheellinen eikä sillä myöskään saada luotettavia erottelukykyisiä tuloksia.
- Asfaltin kiviaineksen ja bitumin välinen tartunta märissä olosuhteissa riippuu kiviaineksen mineraalikoostumuksesta. Jos kiviaines on erittäin hyvin vettä kestävä, sitä käyttäen valmistettu asfalttinäyte saa vedenkestävyyskokeessa usein yli 100 % vedenkestävyytuloksen. Tällöin saattaisi näyttää siltä, että vesisäilytys parantaa tällaisen asfaltin vedenkestävyyttä. Todellisuudessa as-

falttinäytteiden veden täyttämässä tyhjätilassa halkaisuvetolujuuskokeen aikana ollut vesi on näennäisesti vahvistanut näytettä, koska vesi on kokoonpuristumatonta. Sen sijaan kuivien näytteiden huokosissa oleva ilma ei aiheuta vastaavaa näennäislujuutta hetkellisessä kokeessa. Jos vedenkestävyysarvo on siten yli 100 %, voidaan tuloksia arvioida esim. siten, että ”tyhjätilan sisältämä vesi lisäsi näytteen lujuutta näennäisesti enemmän kuin vesisäilytys sitä mahdollisesti heikensi”.

Maa-aineksen vedellä kyllästysaste tarkoittaa K. V Helenelundin mukaan veden täyttämän huokostilan tilavuusosuutta prosentteina huokosveden ja huokosten sisältämän ilman yhteenlasketusta tilavuudesta [16].

Päällystenäytteen vedellä kyllästysaste voidaan laskea soveltaen edellä mainittua maanäytteiden kyllästysasteen laskentatapaa kaavan (7) mukaisesti.

$$S_R (\%) = 100 * \frac{V_W}{V_V} \quad (7)$$

jossa

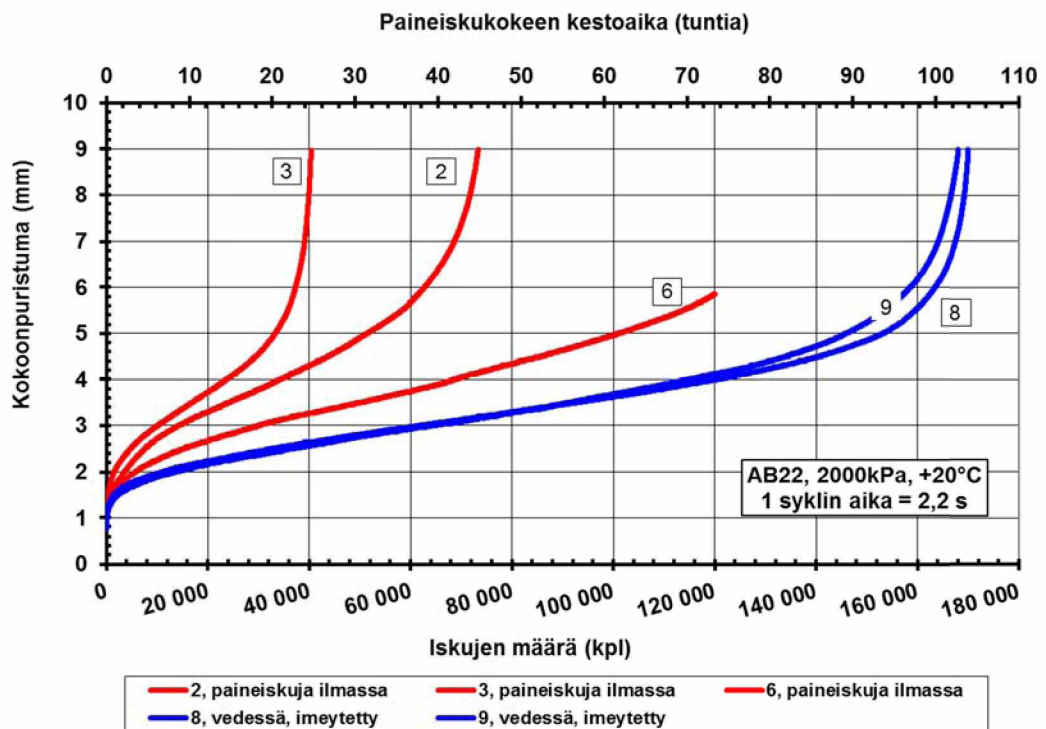
S_R = päällysteen vedellä kyllästysaste [%]

V_W = päällystenäytteen tyhjätilassa olevan veden tilavuus

V_V = päällystenäytteen tyhjätilan kokonaistilavuus.

Kuvassa 50 on esitetty kuiville näytteille tehdyn dynaamisen paineiskukokeen tulosten vertailu vesiupotuksessa tutkittujen näytteiden sykliseen paineiskunkestävyyteen. Kuvasta tulee esiin tyypillinen kuivina ja märkinä koestettujen näytteiden tulosten ero. Kuivat näytteet kestivät merkittävästi vähemmän paineiskuja (ilmassa) kuin määritetyt näytteet vedessä. Kuivina koestettujen rinnakkaisnäytteiden hajonta oli merkittävästi suurempi kuin näytteillä, joiden tyhjätila oli veden täyttämä.

Kuva 50 esittää kuivina koestettujen ja vedellä kyllästettyjen näytteiden näennäisen lujuuseron dynaamisessa paineiskukokeessa. Kuivien näytteiden tulos esittää näiden näytteiden todellista paineiskunkestävyyttä kuivana. Märkien näytteiden tulos esittää asfaltin näennäistä paineiskunkestävyyttä nopeassa syklisessä kokeessa, kun tulokseen vaikuttavat asfaltin lujuuden lisäksi asfaltin huokostilassa olevan veden kokoonpuristumattomuus ja veden virtausvastus.

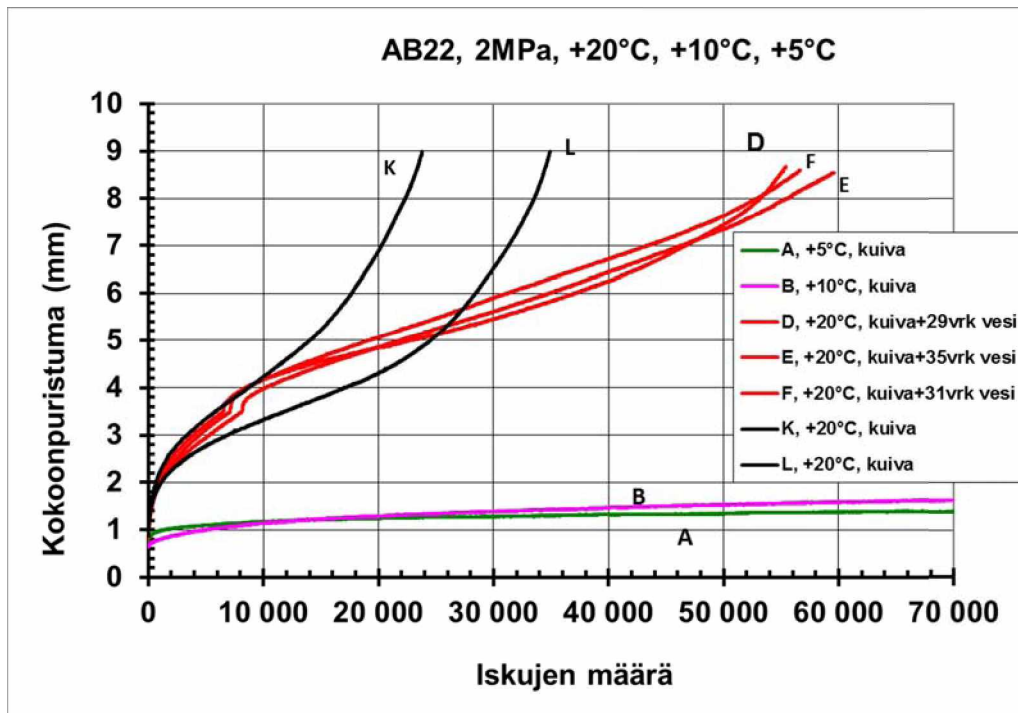


Kuva 50. AB22 massan dynaamisen paineiskunkestävyyden riippuvuus näytteen vedellä kyllästysasteesta (0 % tai vedellä imeytetty 100 %), bit 50/70. Näytteiden tyhjätilat esitetty kuvan 47 yhteydessä olevassa taulukossa.

Kuvassa 51 on esitetty näytteen lämpötilan, vedellä kyllästysasteen ja vesisäilytyksen vaikutus asfalttibetoninäytteen dynaamiseen paineiskukestävyyteen (pintapaine 2000 kPa). Kaikki näytteet oli koestettu ensin kuivalla dynaamisella paineiskukokeella 3,5 mm kokoonpuristumaan.

Viileässä lämpötilassa (+5 ja +10 °C) kuivina tutkitut näytteet toimivat dynaamisessa paineiskukokeessa lähes samalla tavalla ja niiden kokoonpuristuma kasvoi erittäin hitaasti.

Kun lämpötilaksi valittiin 20 °C, kokoonpuristumakäyrän muoto muuttui olennaisesti. Kuivien näytteiden kokoonpuristuman kasvu nopeutui sen jälkeen, kun se ylitti 5 mm. Vesisäilytyksessä noin 30 vrk olleet ja sen jälkeen dynaamisella kokeella vedessä koestetut näytteet kestivät olennaisesti paremmin kuin kuivat näytteet samassa lämpötilassa.



Kuva 51. AB 22 massan paineiskunkestävyyden riippuvuus syklimäärästä, näytteen lämpötilasta ja vedellä kyllästysasteesta. Näytteiden tyhjätilat on esitetty kuvan 48 yhteydessä olevassa taulukossa.

(Kaikki näytteet koestettu ensin kuivalla dynaamisella kokeella 3,5 mm kokoonpuristumaan). Sen jälkeen osa näytteistä koestettu dynaamisella paineiskukokeella kuivina, osa vesi-imeytyksen jälkeen märkinä, lämpötila 5 °C, 10 °C tai 20 °C. bit. 50/70.

3.7 Deformaatiokestävyys

Koska asfalttinäyte kesti dynaamisia paineiskuja paremmin kuivana kuin vesiupotuksessa, haettiin vertailutuloksia muissa tutkimuksissa saaduista tuloksista. Asfaltin kestävydestä veden ja nopeiden kuormitusten yhteisvaikutusta vastaan oli saatavilla vain vähän tutkimustietoa.

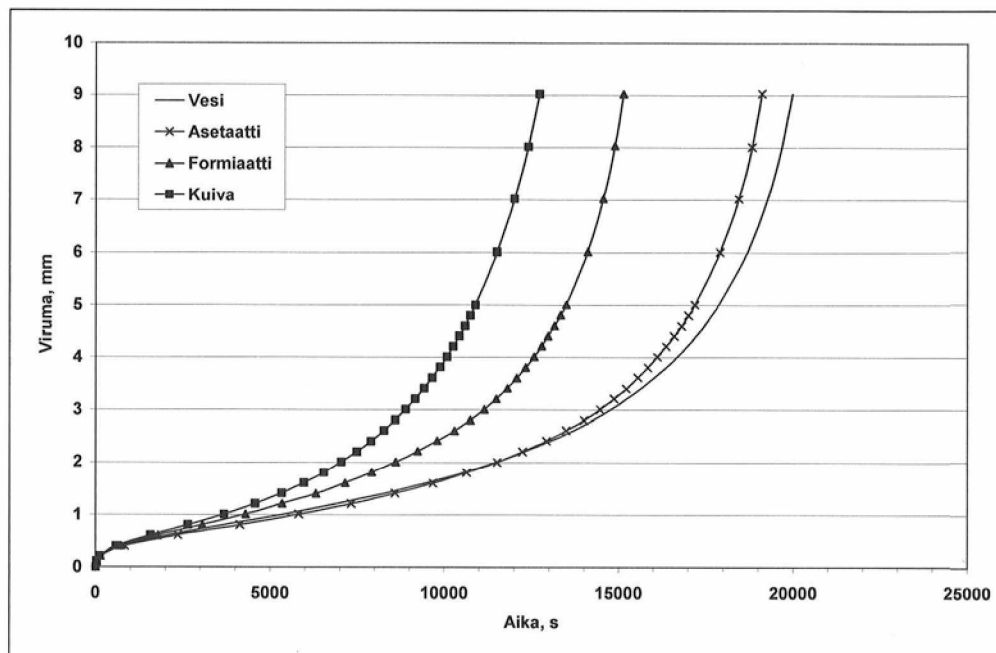
Nynas Oy teki JÄPÄ-tutkimuksen yhteydessä kokeiluja deformaatiokestävyyden tutkimiseen käytettävän yksiaksiaalisen dynaamisen virumiskokeen (SFS-EN 12697-25, menetelmän A) soveltuvuudesta asfalttibetonin jäänsulatusaineiden kestävyden tutkimiseen. Koestusparametrit olivat:

- AB16, sideaine B200 ja ICT tiivistys.
- Kappaleen korkeus 60 mm, halkaisija 150 mm, kuormituslevy 100 mm.
- Testauslämpötila 40 °C.
- Jakso: 1 s kuormitus 100 kPa ja 1 s lepojakso (periaate PANK 4208)
- Näytteiden tyhjätilaan imeytettiin alipaineella vettä ennen koestusta.

Vesiupotuksessa olleen asfalttinäytteen ja kuivan asfalttinäytteen virumakokeen tulokset on esitetty kuvassa 52.

Nopeimmin deformatui tässä kokeessa kuiva näyte, sitä vähän paremmin kesti vesi- ja nesteupotuksessa ollut näyte ja parhaiten asetaatti- ja formiaattiliuoksiin upotetut näytteet. Näiden tulosten jälkeen koesarja keskeytettiin [15].

Merkille pantavaa on tämän tuloksen samankaltaisuus Asfadur-projekti paineiskokeen tulosten kanssa.



Kuva 52. Kuivan näytteen ja nesteupotuksessa olleiden näytteiden kestävyys creep-kokeen kuormituksia vastaan, $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. [15]

3.8 Vedenkestävyyden ja jäätymis-sulamiskestävyyden vertailu

3.8.1 Vedenkestävyys

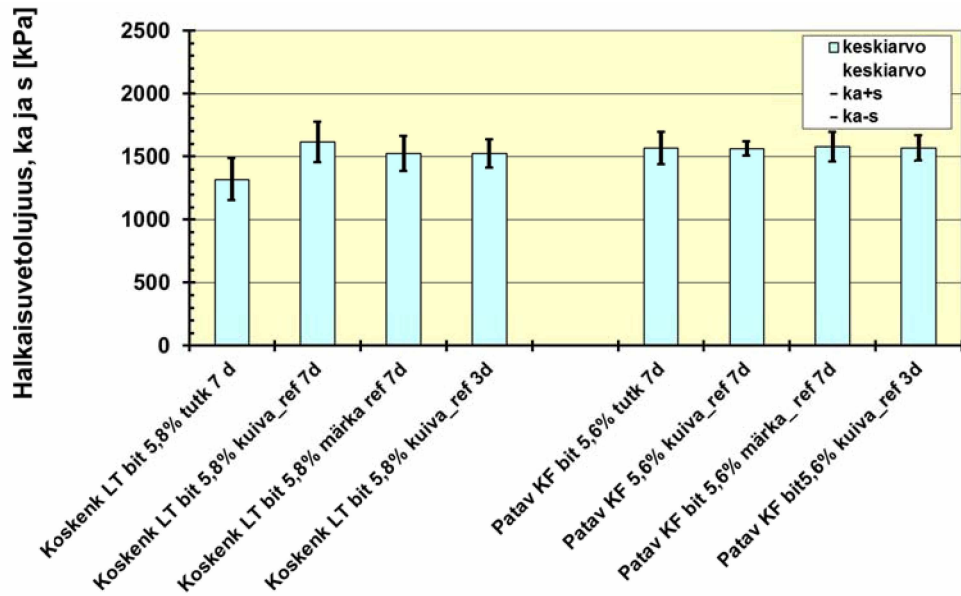
SMA-massan vedenkestävyysskoeksessa tutkittiin Koskenkylän heikennetty koostumus ja Patavuoren optimikoostumus 7 d ikäisenä. Tyhjätilatavoite oli 6–7 %. Referenssimassoina tutkittiin menetelmäkuvauksen mukainen kuiva referenssinäyte 3d ja 7d ikäisenä sekä kuivana säilytetty ennen halkaisua imeytetty referenssinäyte 7 d iässä (= ”märkä ref 7d” seuraavassa taulukossa ja kuvassa). Vesisäilytyksessä olleiden ja edellä kuvatuin tavoin säilytettyjen vertailunäytteiden halkaisuvetolujuudet ja vedenkestävyys (%) on esitetty taulukossa 23.

Taulukko 23. Tutkittujen SMA 16 massojen halkaisuvetolujuustulosten keskiarvo ja vedenkestävyys. Massoilla optimikoostumus. (menetelmä SFS-EN 12697-12, menetelmä B korotetulla tyhjätilalla).

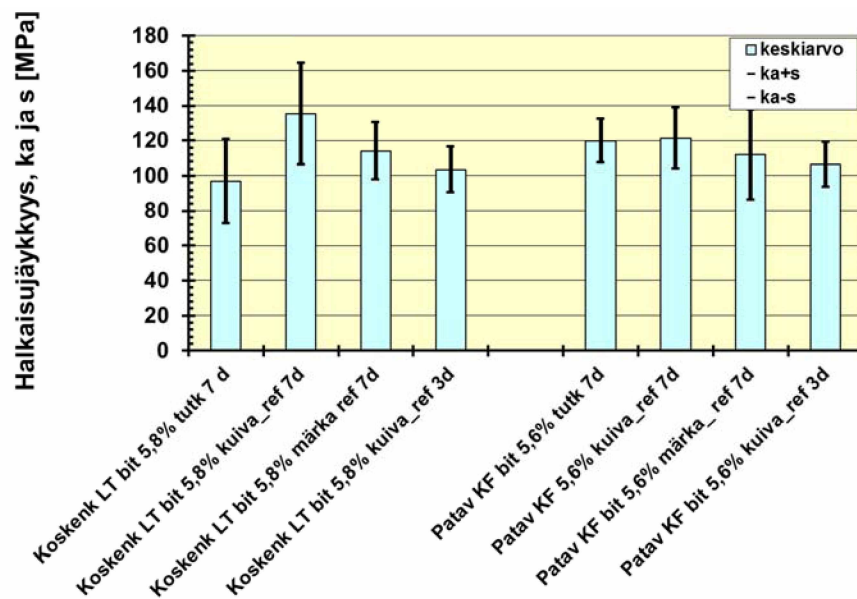
		yks.	7d märkä tutk.näyte	7d kuiva	7d märkä refrenssit	3d kuiva
Koskenk LT bit 5,8%	HVL	kPa	1321	1615	1522	1522
HVL-suhdeluku %	100*tutk / ref	%		82	87	87
Patav KF bit 5,6%	HVL	kPa	1565	1559	1574	1567
HVL-suhdeluku %	100*tutk / ref	%		100	99	100

Patavuoren kiviainesta sisältänyt SMA-massa ei heikentynyt standardin mukaisessa vedenkestokokeessa lainkaan (vedenkestävyys 100 %). Koskenkylän heikennetyn massan vedenkestävyys oli 82 %, kun referenssinäyte oli kuiva ja 87 %, kun kuivana säilytetty referenssinäyte imeytettiin eksikkaattorissa vedellä ennen halkaisua.

Kuvassa 53 on esitetty vedenkestävyysskoeken SMA-massojen halkaisuvetolujuuskokeiden tulosten keskiarvot ja keskihajonnat ja kuvassa 54 vastaavasti halkaisuvetojäykkyydet.



Kuva 53. Vedenkestävyyskokeen SMA16-massojen halkaisuvetolujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat (optimikoostumus).



Kuva 54. Vedenkestävyyskokeen massojen halkaisuvetojäykkyyksien keskiarvot ja keskihajonnat (optimikoostumus).

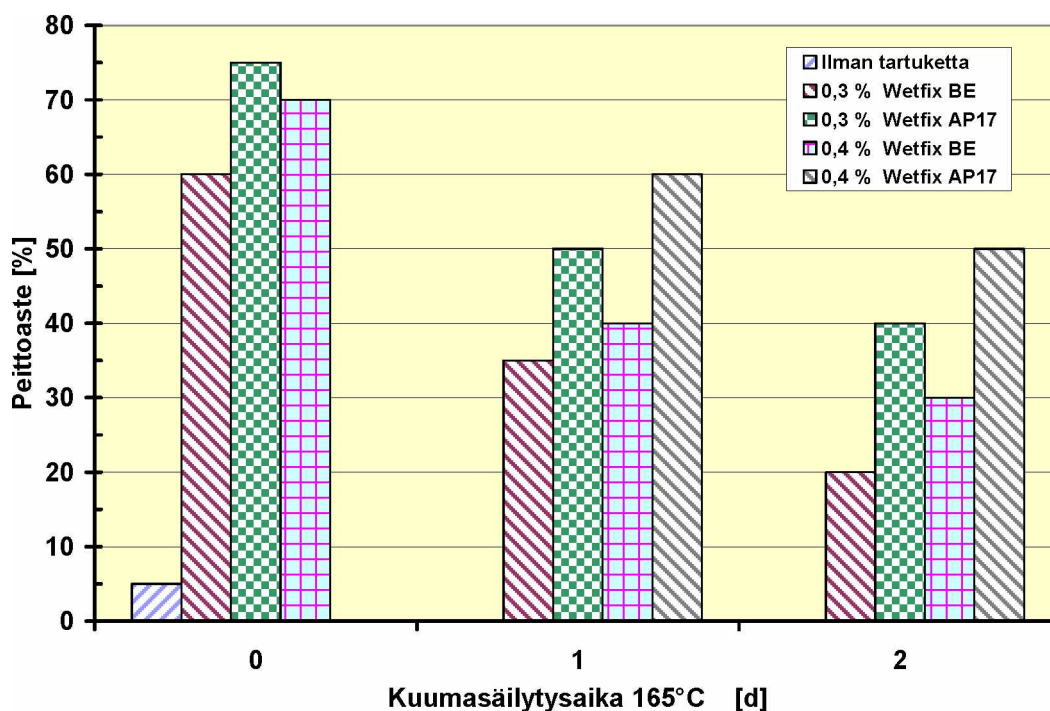
Vedenkestävyyskokeessa yksinkertaisemmalla menetelmällä saatiin tutkituilla SMA-massakoostumuksilla ja korotetuilla tyhjätiloilla samansuuntainen tulos kuin jäätymis-sulamiskokeessa.

3.8.2 Tartukkeen vaikutus jäätymis-sulamis- ja vedenkestävyyteen

Tartukkeen tyypin ja pitoisuuden valinta

Ennen Korson tartukekoepäällysteiden rakentamista ja samaan aikaan tehtyjen laboratorionäytteiden valmistusta Akzo Nobel tutki rullapullokokeella (EN 12697-11) kahden valmistamansa tartukkeen vaikutuksen bitumin Nynas 70/100 ja Koskenkylän murskeen (8/11,2 mm) väliseen tartuntaan vedessä tartukkeellisen bitumin kuumasäilytysajan pituuden vaihtoehdoilla 0 d, 1 d ja 2 d. [12].

Rullapullokokeen tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa ja kuvassa 55.



Kuumasäilytysaika (d)	Ilman tartuketta	0,3 % Wetfix BE	0,3 % Wetfix AP17	0,4 % Wetfix BE	0,4 % Wetfix AP17
0	5	60	75	70	0
1	-	35	50	40	60
2	-	20	40	30	50

Kuva 55. Kuumasäilytysajan bitumin peittoasteeseen (rullapullokoee).

Akzo Nobelin johtopäätös rullapullokokeen perusteella oli, että bitumin ja kiviaineksen riittävän tartunnan varmistamiseksi tulee bitumiin lisätä tartuketta. Wetfix AP 17 säilyi parhaiten kuumassa bitumissa, jos kuumasäilytysaika on useita päiviä.

Rullapullokokeen tulosten perusteella valittiin bitumin Nynas 70/100 tartukkeeksi Wetfix AP17 ja tartukepitoisuudeksi 0,4 % bitumin massasta.

Asfadur-projektin aiemmissa laboratoriokoenäytteissä sideaine oli bitumia 50/70. Tartukkeen maahantuojan ilmoituksen mukaan bitumin tunkeumaluokka ei vaikuta rullapullokokeen tulokseen, jos bitumin happamuus ei muutu ja tästä syystä rullapullokokeen tulokset olisivat samat myös bitumille 50/70 [12].

Vedenkestävyys

Tartukekokeilun laboratoriotestien tulokset tartuketta sisältävän ja ilman tartuketta valmistetun SMA 16 päällysteen vedenkestävyydestä on esitetty taulukossa 24.

Tartukkeella ei ollut merkittävää vaikutusta SMA-päällysteen vedenkestävyyteen.

Taulukko 24. Tartukkeen vaikutus SMA16 massan vedenkestävyyteen (Tartuke 0,4 % Wetfix AP17, menetelmä SFS-EN 12697-12., menetelmä B)

		Tyhjätila IPK %	HVL *) kPa	HVJ *) MPa
Tartuke	Testinäyte	6,9	1 251	79,4
	Ref.näyte	6,9	1 446	108,6
	Testi vs Kuiva		86,5 %	73,1 %
Ei tartuketta	Testinäyte	6,5	1 271	67,3
	Ref.näyte	6,5	1 481	97,7
	Testi vs Kuiva		85,8 %	68,9 %

Jäätymis-sulamiskestävyys

Tartukekokeilun tulokset SMA 16 päällysteen jäätymis-sulamiskestävydestä on esitetty taulukossa 25.

Taulukko 25. Tartukkeen vaikutus SMA16 massan jäätymis-sulamiskestävyteen (10 jäätymis-sulamissykliä (Tartuke 0,4 % Wetfix AP17)).

		Tyhjätila IPK %	HVL *) kPa	HVJ *) MPa
Tartuke	Testinäyte	6,8	1 110	64,8
	Märkä referenssinäyte	6,8	1 503	110,4
	Kuiva referenssinäyte	6,9	1 305	89,3
	Testi vs Märkä		73,9 %	58,7 %
	Testi vs Kuiva		85,1 %	72,6 %
Ei tartuketta	Testinäyte	6,4	1 259	74,3
	Märkä referenssinäyte	6,4	1 596	108,4
	Kuiva referenssinäyte	6,6	1 438	94,4
	Testi vs Märkä		78,8 %	68,6 %
	Testi vs Kuiva		87,5 %	78,7 %

Tartukkeella ei ollut merkittävää vaikutusta SMA-massan jäätymis-sulamiskestävyyskokeen tuloksiin. Tartukemassoille saatiin jopa hieman heikommät jäätymis-sulamiskestävyysarvot kuin ilman tartuketta valmistetuille.

Näytteiden tyhjätilat olivat tavoitteen mukaisten vaihtelurajojen sisällä, mutta sekä vedenkestävyys että jäätymis-sulamiskokeessa tartuketta sisältävien näytteiden tyhjätilat olivat noin 0,4 prosenttiyksikköä korkeammat kuin ilman tartuketta valmistetuilla näytteillä.

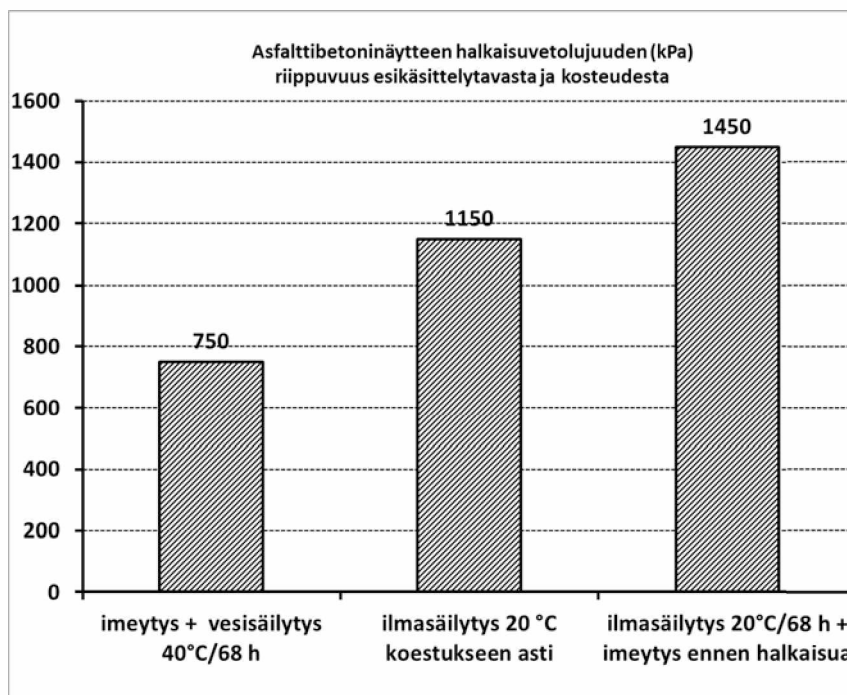
3.8.3 Vertailunäytteen imeytyksen vaikutus halkaisuvetolajuuteen

Halkaisuvetolajuusmenetelmällä tehtiin suppea kokeilu, jolla pyrittiin selvittämään asfalttinäytteen kosteustilan ja esikäsitteilytavan vaikutus lujuteen. Päälyste oli optimitiiviyteen tiivistetty AB 16, sideainepitoisuus oli 5,4 % (bit 70/100). Näytteiden tyhjätilat olivat välillä 1-4 % ja ikä koestushetkellä 3 d. Näytteitä valmistettiin tavanomaista vedenkestävyyскоetta varten (5+5 kpl) ja niiden lisäksi yksi ylimääräinen 5 näytekappaleen sarja, jolla selvitettiin näytteen vedellä kyllästysasteen vaikutusta halkaisuvetolajuuteen. Kaikki näytteet tutkittiin samana päivänä. Ylimääräinen 5 näytteen sarja imeytettiin vasta juuri ennen temperointia ja temperoitiin sen jälkeen vedessä lämpötilassa +5 °C.

Näytteiden säilytys, esikäsitteily ja temperointi on kuvattu taulukossa 26, halkaisuvetolajuudet kuvassa 56 ja halkaisuvetolajuuksien suhdeluvut taulukossa 27.

Taulukko 26. Halkaisuvetolajuusnäytteiden säilytys, esikäsitteily ja temperointi.

Näytesarja (5 rinnakkaisnäytettä)	Näytteen säilytys ja esikäsitteily ennen halkaisua	Temperointi ennen halkaisua
märkä (vedenkestonäytt.)	imeytys + vesisäilytys 40°C/68 h	vedessä 10°C 5 h
kuiva (vedenkestonäytt.)	ilmasäilytys 20 °C koestukseen asti	ilmassa 10°C 5 h
imeytys ennen halkaisua	ilmasäilytys 20°C/68 h + imeytys ennen halkaisua	vedessä 10°C



Kuva 56. Asfalttibetoninäytteen esikäsitteilyn ja kosteustilan vaikutus halkaisuvetolajuuteen (5 rinnakkaisnäytettä).

Taulukko 27. Näytteen säilytystavan, vedellä kyllästysasteen ja niiden yhteisvaikutus asfalttibetoninäytteiden halkaisuvetolujuuksien suhteeseen.

Ominaisuus, jota lujuudesti mittaa	HVL-suhteen laskentakaava	HVL-suhde
		%
Vesisäilytyksen 40°C/68 h vaikutus	100 x HVL (märkä)/HVL (imeytys ennen halkaisua)	52
Huokosten vedellä täyttö-asteen vaikutus	100 x HVL (imeytys ennen halkaisua)/HVL (kuiva)	126
Vesisäilytyksen ja vedellä täyttö-asteen yhteisvaikutus	100 x HVL (vesisäilytys 40°C/68 h)/HVL (kuiva)	65

Taulukon 27 perusteella voidaan päätellä, että:

- pelkkä standardin mukainen vesisäilytys alensi halkaisuvetolujuutta 48 %, kun säilytys oli standardin mukainen, mutta näytteet halkaistiin samassa kosteustilassa,
- vettä täynnä olevat huokokset paransivat AB-massan halkaisuvetolujuuksia 26 % kuivien näytteiden halkaisuvetolujuuteen verrattuna,
- standardin mukainen vedenkestävyysarvo oli 65 %.

Tuloksena oli, että kuivan asfalttibetoninäytteen pelkkä alipaineimeytys paransi sen halkaisuvetolujuutta verrattuna kuiviin näytteisiin, joihin ei imeytetty vettä. Kuivat näytteet olivat kuitenkin lujempia kuin 68 h lämpimässä vedessä säilytetyt näytteet.

Tämän kokeilun mukaan asfaltin vedenkestävyydestin testinäytteet ja niiden vertailunäytteet tulisi tutkia samassa kosteustilassa.

Nykyinen vedenkestävyyden tutkimusmenetelmä antaa virheellisen tuloksen asfaltin kestävydestä pitkäaikaista vesisäilytystä vastaan, koska märkien ja kuivien näytteiden kosteustilat poikkeavat toisistaan tavalla, mikä voi vaikuttaa tuloksiin. Vedenkestävyysskoeksessa vesi vaikuttaa näytteisiin ainakin kahdella eri tavalla. Vesisäilytyksessä oleviin näytteisiin vesi vaikuttaa tavalla, joka voi heikentää tartuntaa ja vaikutuksen suuruus riippuu mm. kiviaineksen mineraalikoostumuksesta. Halkaisuvetolujuuskokeen suoritushetkellä näytesarjojen erilaiset kosteustilat aiheuttavat eroja halkaisuvetolujuustuloksiin. Imeytetyistä näytteistä voi lisäksi valua vettä ulos painovoimaisesti temperoinnin aikana tai temperoinnin ja halkaisun välillä, ellei veden valumista näytteistä ole estetty.

Koska yleisessä käytössä oleva ja asfalttinormien vedenkestävyyksvaatimusten todentamiseen käytettävä testimenetelmä sisältää näin paljon epävarmuustekijöitä, tulisi standardimenetelmää muuttaa siten, että jatkossa vedenkestävyysskoeksessa näytteet saatetaan samaan kosteustilaan ennen temperointia ja pidetään samassa kosteustilassa halkaisuvetolujuuksien määrittämiseksi.

Kun normien testimenetelmää muutetaan, tulisi normien vaatimustaso tarkistaa muutetun menetelmän mukaiseksi

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Tulosten vertailu tavoitteisiin

4.1.1 Jäätymis-sulamiskestävyyden testimenetelmän kehittäminen

Menetelmän kehittämisen tavoitteena oli saada käyttöön tutkimus- ja testaustarkoituksiin soveltuva jäätymis-sulamiskestävyyden laboratoriokoemenetelmä. Erityistä huomiota tuli kiinnittää menetelmän tarkkuuteen, riittävään nopeuteen ja mahdollisuuksiin käyttää sitä useissa eri laboratorioissa.

Kehitettävästä menetelmästä tuli selvittää olennaiset menetelmäparametrit ja menetelmän avulla tuli selvittää jäätymis-sulamissyklien määrän vaikutus dynaamisen jäykköysmoduulin muuttumisen arvioimiseen.

Menetelmän toistettavuus tuli selvittää kolmella asfalttityypillä (SMA, AB ja PAB-B) ja lisäksi tuli selvittää jäätymis-sulamiskoemenetelmän ja nykyisin käytettävän asfaltin vedenkestävyyden testausmenetelmän välinen yhteys.

Projektin vaiheen 1 päättyessä jäätymis-sulamiskokeen testimenetelmästä oli selvillä:

Jäätymis-sulamiskokeen toteutusperiaate.

Asfaltin jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimasta varten kehitettiin kaksi vaihtoehtoista toteutustapaa:

- menetelmä A: Näytteiden jäätyminen-ilmassa ja sulaminen vedessä
- menetelmä B: Näytteiden jäätyminen ja sulaminen vedessä (näytepurkeissa).

Molemmat testin toteutustavat on esitetty Asfadur-projektin tuottamassa menetelmäkuvuksessa PANK-4306. Testit voidaan suorittaa joko automaattisella laitteella tai käsityönä.

Tarvittava jäätymis-sulamissyklien määrä. 10 jäätymis-sulamissykliä erotteli paremmin kuin 50 sykliä massareseptien erot ja jäätymis-sulamiskestävyydeltään hyvää kiviainesta sisältävät massat jäätymis-sulamiskestävyydeltään huonommista. Alhaisemman syklimäärän käyttö nopeutti menetelmää olennaisesti. Riittävä jäätymis-sulamissyklien määrä oli 10 kpl.

Yksittäisen syklin pituus. Jäätymis-sulamissyklin pituuden tuli täyttää kaksi vaatimusta: syklin tuli olla niin pitkä, että näyte ehti jäätyä ja sulaa läpikotaisin ja toiseksi näytteen lämpötilan tuli tasaantua tavoitelämpötilaan ennen syklin jäätymis- tai sulamisvaiheen päättymistä. Automaattilaitetta käytettäessä oli yksittäisen jäätymis-sulamissyklin pituus 12 h menetelmässä A ja 24 h menetelmässä B. Käsityönä syklin pituus oli 24 h sekä molemmissa menetelmissä (A ja B).

Jäätymis-sulamiskokeessa käytettäväksi nesteeksi soveltui pelkkä vesi (esim. vesi-johtovesi) paremmin kuin suolaliuos.

Näytteen tyhjätila. Jäätymis-sulamiskestävyyttä tutkittiin näytteillä, joilla oli korkeampi tyhjätila hyvin tiivistetyllä reseptin mukaisella SMA-päällysteellä. Toisaalta voitiin todeta, että päällysteiden kevättalven reikiintymiskohdat sijoittuivat erityisesti pääl-

lystekaištojen saumakohtiin, paikkausten reunoihin ja ohuimpiin päällystekohtiin. Nämä ovat kaikki kohtia, joihin usein saattaa jäädä tavanomaista korkeampi tyhjätila. Menetelmään PANK-4306 valittiin tavoitetyhjätilaksi 8-10 % ja määritysmenetelmäksi ulkomittamenetelmä.

Jäätymisnopeuden muutos. Näytteen lämpötilan muutosnopeus oli selvitetty osin koekellisesti ja osin laskennallisesti. Erittäin merkittävästi lämpötilan muutosnopeuteen vaikutti, jäätykö näyte ilmassa vai nesteupotuksessa. Jos näyte jäädytettiin ilmassa ja sulatettiin vedessä, jäätymis-sulamissyklin pituus aleni 50 %.

Halkaisuvetolujuuskoe soveltui paremmin kuin halkaisuvetojäykkyys tai jäykkyysmoduuli jäätymis-sulamiskoemenetelmän tutkimus- ja referenssinäytteiden tutkimiseen. Jotta halkaisuvetolujuuskokeen tulosten hajonta oli riittävän alhainen, tuli näytteiden tyhjätiloihin kiinnittää erityistä huomiota ja näytteet tuli järjestää kahteen toisiaan tyhjätilan osalta mahdollisimman hyvin vastaaviin ryhmiin.

Referenssinäytteiden käsittely. Referenssinäytteiden pitkäaikainen säilytys huoneenlämpötilassa aiheutti merkittävää lujuuden kasvua ja näytteiden vedellä kyllästymisaste vaikutti halkaisuvetolujuuksiin. Referenssinäytteet tulee säilyttää viileässä +5 °C koestusta edeltävään temperointiin asti. Ennen temperointia referenssinäytteet tulee saattaa (imeyttämällä) samaan kosteustilaan kuin jäätymis-sulamiskokeessa olleet näytteet.

Projektin vaiheen 2 alkaessa muutettiin projektisuunnitelmaa siten, että jäätymis-sulamiskokeisiin vaiheessa 2 suunniteltu rahoitus kohdistettiin veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen tutkimiseen jäätymis-sulamiskestävyystutkimusten asemasta. Tutkimuksen uudelleen suuntaamisen vuoksi projektisuunnitelman mukaisista tehtävistä jätettiin tutkimatta:

- jäätymis-sulamissykliin vaikutus optimityhjätilan mukaiseen SMA-massaan,
- menetelmän erottelukyky pehmeällä asfalttibetonilla (PAB),
- menetelmän toistettavuus asfalttityypeillä SMA, AB ja PAB.

SMA-massan jäätymis-sulamiskoemenetelmän ja vedenkestävyyskoemenetelmän välistä yhteys selvitettiin kahdella massakoostumuksella vaiheen 2 osan 1 yhteydessä ja sen osalta jäi selvittämättä vedenkestävyyskokeen erottelukyky massareseptien välillä (Koskenkylän optimi ja heikennetty koostumus). Massareseptien erottelukykyä tulisi selvittää myös suuremmalla bitumipitoisuuserolle kuin 0,2 prosenttiyksikköä (esim. 0,5 prosenttiyksikköä).

4.1.2 Jäätymis-sulamiskokeen kesto aika

VTT:llä oli ennen tutkimuksen aloitusta automaattinen, PC:n avulla ohjelmoitava jäädytys-sulatuslaite, jota käytettiin mm. STABIL-projektissa stabilointimassojen tutkimiseen siten, että näytteet jäädytettiin kylmässä ilmassa ja sulatettiin vedessä. Jäädytysvaiheen loppuessa laitteeseen pumpattiin ulkoisesta vesisäiliöstä automaattisesti huoneenlämpötilassa olevaa vesijohtovettä tai suolaliuosta, jolla näytteet sulatettiin. Sulatusvaiheen lopussa vesi pumpattiin takaisin ulkoiseen säiliöön ja näytteet jäädytettiin kylmällä ilmalla.

Koska kehitettävää jäätymis-sulamiskestävyuden testimenetelmää tuli voida käyttää useissa eri laboratorioissa, tuli sitä voida soveltaa myös käsityönä ilman automaattisesti PC:llä ohjattavaa laitteistoa. Asfalttinäytteet päätettiin sijoittaa kannellisiin

muoviastioihin, koska nesteupotuksessa tapahtuvan jäätyminen arvioitiin rasittavan näytteitä enemmän kuin jäädyttämisen ilmassa.

Tutkimuksen alussa tehty valinta näytteiden jäädyttämisestä nesteupotuksessa vaikutti merkittävästi kokeen kesto aikaan:

- Syklin sulamisvaiheessa täytyy näytteen ja purkissa olevan jään ensin lämmentää noin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta nolla-asteiseksi.
- Sen jälkeen nolla-asteisen jään tulee muuttua nolla-asteiseksi nesteeksi.
- Sulamisvaiheen lopuksi nolla-asteinen vesi lämpenee lähes lämpötilaan $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Veden olomuodonmuutokset sekä veden sekä asfaltin lämpötilanmuutokset tarvitsevat energiaa. Jos näyte jäädytetään tutkimuksessa käytetyn mukaisessa purkissa olevaan veteen upotettuna, kuluu veden ja näytteen jäädyttämiseen monikertainen määrä energiaa ja jäädytys myös kestää kauemmin verrattuna näytteen jäädytykseen ilmassa. Kun vesi jäätyy, se laajenee merkittävästi. Vesipurkin seinämä muodosti vastapaineen veden jäätympaineelle ja saattoi siten rajoittaa näytteen jäätymlaajenemista. Jäätymis-sulamiskokeen vaatimaan sykli pituuteen vaikutti erittäin merkittävästi, sulivatko näytteet ilmassa vai vedessä.

Jäätymis-sulamissykliä piti valita tarkoituksenmukaista valita kokeen ohjaus- ja suoritusteknisten syiden vuoksi siten, että sykli olivat samaan kellonaikaan aina samassa vaiheessa. Sykliä lämpötilaohjaus ohjelmoitiin siten, että näytteiden lämpötilat saavuttivat tasaantumisvaiheen ennen kuin jäätymisvaihe muuttui sulamisvaiheeksi tai päinvastoin. Tällöin sopivia sykliä pituuksia olisi 12 h ja 24 h. Automaattiohjauksella syklin raskaus oli käynnissä 7 vrk viikossa ja tarvittaessa sykliä vaihe saattoi vaihtua myös työajan ulkopuolella.

Kun jäätymis-sulamiskoe tehtiin käsityönä siirtäen näytteitä olosuhteesta toiseen aina sykliä vaiheen muuttuessa, oli syklin raskaus käynnissä 5 arkipäivää viikossa ja näytteet pidettiin pakkasessa yli viikonlopun. Yhdessä vuorokaudessa voitiin suorittaa käsityönä vain yksi jäätymis-sulamissykli.

Näytteiden tutkiminen vesiupotuksessa on tulosten perusteella suositeltavampaa kuin suolaliuoksessa, koska suolaliuoksen hidas jäätyminen ja erottumistaipumus jäätymisvaiheessa tekivät menetelmästä vaikeasti hallittavan. Projektin puitteissa laadittiin tehtyjen tutkimusten perusteella asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyyssuorituksen menetelmäkuvaus, joka on tulostettavissa PANK ry:n internet-sivulta [17].

4.1.3 Jäätymis-sulamiskokeen käyttö eri laboratorioissa

Asfaltin jäätymis-sulamiskestävyys voidaan tutkia käsityömenetelmällä useissa eri laboratorioissa. Käsityömenetelmä vie pitemmän ajan ja sitoo myös merkittävästi enemmän laborantin työaika kuin automaattisen jäädytys-sulatuslaitteen käyttö. Käsityönä tehtävän kokeen kustannus riippuu olennaisesti syklimäärästä.

4.1.4 Tutkimuksen uudelleen suuntaaminen

Projektin vaiheessa 1 tutkimusten painopiste oli jäätymis-sulamisen testimenetelmän kehittämisessä. Vaiheen 2 alkaessa projektin tutkimusten painopiste suunnattiin oh-

jausryhmän päätöksellä dynaamisiin vesipaineiskukokeisiin, joiden avulla selvitettiin asfaltin kykyä kestää veden ja lyhytaikaisten kuormitusten yhteisvaikutusta. Kokeella jäljiteltiin raskaiden ajoneuvojen pyörien aiheuttamaa paineiskua asfaltin pinnassa.

Vesipaineiskukokeet eivät sisällyneet alkuperäiseen projektisuunnitelmaan. Näin menetellen osa projektin alkuperäisistä tavoitteista korvattiin uusilla tavoitteilla.

Vaikka osa jäätyms-sulamistutkimuksista jätettiin tästä syystä tekemättä, voidaan todeta, että vesipaineiskukokeilla saatiin merkittävästi uutta tietoa vedellä kyllästyneen asfalttinäytteen kestävydestä nopeita, lyhytaikaisia kuormituksia vastaan.

4.1.5 Veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen tutkiminen

Veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen tutkiminen ei sisällynyt alkuperäiseen projektisuunnitelmaan ja se käynnistettiin projektin vaiheen 2 alkaessa projektisuunnitelmassa jäädytys-sulatuskestävyystutkimuksiin suunnatulla rahoituksella. Veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen selvittämistä varten toteutettiin koejärjestely, jonka avulla voitiin vesiupotuksessa ollut asfalttinäyte murtaa laboratoriossa voimakkailla dynaamisilla paineiskuilla, joilla jäljiteltiin kuorma-auton renkaan dynaamista painetta (1000-2000 kPa) asfaltin pinnassa. Tiesääasematietojen perusteella kevättalvella asfaltin pinnassa on yleisesti aurinkoisella säällä jopa +20 °C pintalämpötiloja. Paineiskukokeita tehtiin asfalttinäytteen lämpötiloissa +5...+20 °C. Jotta asfalttinäyte saatiin vaurioitumaan tiestöllä esiintyvillä kuormituspainoilla käytössä olleessa ajassa, koestuslämpötilaksi valittiin kokeilujen jälkeen 20 °C.

Paineiskokeissa asfalttinäytteen vedellä kyllästysaste vaikutti voimakkaasti sen kykyyn kestää nopeita dynaamisia paineiskuja. Jos asfaltin huokokset olivat täynnä vettä, asfaltti kesti dynaamisia paineiskuja paremmin kuin vastaava asfalttinäyte, johon kohdistettiin paineiskut kuivassa tilassa huokokset täynnä ilmaa. Vettä täynnä olevien huokosten vaikutus dynaamisten paineiskujen kestävyteen oli systemaattinen ja toistui kaikissa suoritetuissa paineiskukokeissa.

Asfaltin tyhjätilassa voi olla huokosia, jotka ovat toisiinsa yhteydessä muodostaen labyrinttimaisen kanavaverkon ja siinä voi olla myös umpihuokosia, jotka eivät ole toisiinsa yhteydessä. Nesteet eivät puristu kokoon. Jos huokostila on täynnä vettä, näytteen kokoonpuristuminen edellyttäisi, että vastaava vesimäärä ehtisi virrata näytteestä ulos tai veden paine ehtisi rikkoa näytteen kuormituksen aikana. Asfaltin huokostilassa virtausvastukset hidastavat veden virtausta ulos näytteestä. Asfaltti rikkoutuu, kun kokoonpuristuma kasvaa riittävästi. Suoritetuissa syklisissä dynaamisissa paineiskukokeissa hetkellinen kuormitus rikkoi nopeammin kuivat näytteet, joiden ilman täyttämä huokostila puristui kokoon vähäisemmällä määrällä toistuvia kuormituksia verrattuna märkiin näytteisiin, joiden huokostila oli täynnä vettä.

Asfalttinäytteen vedellä kyllästysasteen vaikutus edellä kuvatulla tavalla näytteen lujuuteen tai kestävyteen kuormitustilanteessa riippuu monesta asiasta esim.

- massan koostumuksesta
- näytteen valmistuksesta ja käsittelystä ennen kuormitusta
- tyhjätilasta, sen muodosta ja jakaumasta
- näytteen lämpötilasta esikäsittelyjen ja kuormitusten aikana
- kuormitustavasta, kuormitusten suuruudesta, määrästä ja taajuudesta.

4.1.6 Projektin loppuvaiheen menetelmämuutokset

Kun lähes kaikki projektin laboratoriokokeet oli tehty, todettiin vaiheen 2 tutkimustulosten perusteella ns. märkien näytteiden vedelläkyllästysasteen erittäin suuri vaikutus lyhyisiin kuormitusaikoihin perustuvien puristuskokeiden tuloksiin (esim. halkaisuvetolujuuskoe ja dynaaminen iskukoe). Tämä oli asfalttialalle uutta tietoa eikä sitä ollut siksi otettu etukäteen huomioon tutkimuksia suunniteltaessa. Kotimaisessa asfalttialan sanastossa otettiin käytteen käyttöön uusi termi ”asfaltin vedellä kyllästysaste”.

Tämä aiheutti useita muutoksia tutkimustulosten perusteella laadittuihin jatkosovellutuksiin ja tarvittaviin jatkotutkimuksiin:

- Projektissa kehitettyä jäätymis-sulamiskokeen menetelmäkuvausluonnosta muokattiin siten, että menetelmään sisältyvissä halkaisuvetolujuuskokeissa otetaan huomioon näytteiden vedelläkyllästysasteen vaikutus tuloksiin.
- Vastaava muutosehdotus näytteiden vedelläkyllästysasteen huomioon ottamiseksi tehtiin myös vedenkestävyyden menetelmästandardiin SFS-EN 12697-12, menetelmä B.
- Näiden menetelmämuutosten tarkennuksia ja vaikutuksia ehdotetaan selvitetäväksi mahdollisissa jatkotutkimuksissa (ks. kohta 7).

5 Yhteenveto

5.1 Yleistä

Tausta

Asfadur- projektin lähtökohtana oli tarve kehittää luotettava menettelytapa asfalttipäällysteiden säänkestävyyden arviointiin. Nykyisin käytössä olevien sään- ja vedenkestävyyden tutkimusmenetelmien (esim. eurooppalaisen standardi SFS-EN 12697-12, menetelmä B) toistettavuus ja erotuskyky oli todettu epätydyttäväksi. Asfaltin säänkestävyysongelmien ratkaisun perusedellytyksenä pidettiin, että käytettävissä olisi tarkka ja riittävän nopea menetelmä asfalttipäällysteen säänkestävyyden arviointia ja toteamista varten.

Päällysteen säänkestävyyden parantamistarpeen toivat selkeästi esiin tie- ja katuverkon päällysteillä erityisesti leutoina talvina yleistyneet säänkestävyysongelmat, havainnot ilmaston muuttumisesta, aiemmin tehdyt asfaltin säänkestävyydetutkimukset, kokemukset ja tieto sekä toisaalta tiedon puute säänkestävyyteen vaikuttavista tekijöistä sekä uuden urakointikäytännön asettamat vaatimukset. Leutoina talvina päällysteen jäätymis-sulamissykliä määrä oli kasvanut olennaisesti kylmempiin talviin verrattuna. Ilmaston muuttuminen oli muuttanut asfalttipäällysteiden rasitusolosuhteita toisenlaisiksi kuin mihin käytössä olleet päällysteet oli kehitetty.

Tieverkolla päällysteen säänkestävyysongelmat näkyivät aiempaa yleisemmin päällysteiden purkautumina ja reikiintymisenä erityisesti pakkasjakson jälkeen kevättalvella. Ilmastoperäiset päällystevauriot aiheuttavat vuosittain suuria korjauskustannuksia ja vaarantavat liikenneturvallisuutta.

Tavoite

Asfadur-projektin alkuperäinen tavoite oli kehittää laboratoriokoemenetelmä, joka soveltuu asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyyden testaamiseen. Projektin aikana tavoitetta suunnattiin uudelleen siten, että tutkimuksen avulla pyrittiin kehittämään menetelmä, jonka avulla voidaan tutkia veden ja kuormituksen yhteisvaikutus asfalttimassan kestävyteen.

Sisällön rajaus

Asfadur- projektin sisältö rajattiin tutkimuksen valmisteluvaiheessa asfaltin jäätymis-sulamisen tutkimusmenetelmän kehittämiseen, menetelmän testaamiseen, erotuskyvyn ja toistettavuuden selvittämiseen. Projektin ulkopuolelle rajattiin rahoittajien reunaehtona päällysteen säänkestävyyden parantaminen koostumusteknisin keinoin (esim. lisäaineilla), koska vastuu päällysteiden teknisestä kehittämisestä oli uuden rakentamiskäytännön mukaisesti siirretty alan urakoitsijoille. Selvästi virheellisen koostumuksen omaavat asfalttimassat (esim. sideaineen optimipitoisuuden alitus yli 0,2 % -yksikköä) rajattiin myös tutkimusaineiston ulkopuolelle.

Toteutustapa

Vaikka projektin keskeinen tavoite alkuperäisen suunnitelman mukaan oli jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimusmenetelmän kehittämisessä, varauduttiin jo projekti-

suunnitelmassa tilanteeseen, jossa projektin aikana saadun tiedon perusteella tutkimuksen painopistettä voitaisiin tarvittaessa muuttaa. Projektin toteutusta ohjaava rahoittajien muodostama ohjausryhmä asetti projektin käynnistysvaiheessa Menetelmätekni- sen pienryhmän, jonka tehtävänä oli yhdessä PANK ry:n Laboratoriotoimikunnan kanssa ohjata erityisesti tutkimusmenetelmien kehittämistä ja tarvittaessa tehdä ehdotuksia projektin sisällön tarkistamiseksi ja uudelleen suuntaamiseksi. PANK ry:n hallitus seurasi projektin toteutusta ja teki omalta osaltaan projektin rahoituspäätökset vaiheittain ja ohjasi samalla koko projektin toteutuksen vaiheistusta.

Projektin toisessa vaiheessa tutkimusten painopiste muutettiin veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen tutkimiseen asfaltin jäätymis-sulamiskestävyyden asemasta.

Lemminkäinen Infra Oy ja Destia Oy suhteittivat tutkimuksen asfalttimassat, valmis- tivat asfalttinäytteet ja määrivät niiden tyhjätilat. VTT suunnitteli tutkimuksen, teki valittujen asfalttimassojen laboratoriokokeet ja laati tutkimusraportin. Projektin Me- netelmätekni- sen pienryhmä ohjasi tutkimuksen menetelmätekni- stä kehitystyötä.

5.2 Suhteitustavoitteet ja näytevalmistus

Menetelmätekni- sen pienryhmä asetti tutkittavien asfalttimassojen suhteitustavoit- teet Asfalttinormien yleisten vaatimusten ja ohjeiden mukaisiksi. Laboratoriokokei- den asfalttinäytteitä valmistettiin sekä suhteituksen mukaisella optimisideainepitoi- suudella että 0,2 % -yksikköä optimia alhaisemmalla sideainepitoisuudella. Eniten tutkittiin SMA-päällysteen säänkestävyyttä, koska reikiintymisvaurioita oli ollut run- saasti myös vilkkaasti liikennöidyillä päätteillä.

Jotta veden pääsy asfalttinäytteiden sisään varmistettiin laboratoriokokeissa, oli näy- tevalmistuksessa päällystenäytteiden tyhjätilatavoite yleensä 6–7 % (sallittiin 6–8 % IPK-menetelmän mukaan). Tavanomaisessa päällystystyössä saavutetaan yleensä alhaisempi tyhjätila. Asfalttinormit sallivat kuitenkin päällysteen yksittäisille sauma- näytteille 2 % -yksikköä korkeamman tyhjätilan kuin ajokaistalta otetuille näytteille. Asfalttinormien mukaan saumojen yksittäisten näytteiden tyhjätilavaatimus oli siten $\leq 8\%$ (IPK-menetelmällä), mikä vastasi projektin näytevalmistuksen tyhjätilan tavoit- tetasoa. Tiellä reikiintymisvaurioita oli runsaasti juuri saumojen läheisyydessä.

Asfalttipäällysteen jäätymis-sulamiskestävyydestä tutkimusten näytteet valmistettiin si- ten, että asfalttimassa tiivistettiin laatoiksi laboratorion keinujuurällä, laatoista porat- tiin D 100 mm näytteet, joiden päät oikaistiin sahaamalla (näytekorkeus 60 mm). Yh- tä jäätymis-sulamiskoetta varten valmistettiin 5 kpl jäätymis-sulamissykleihin mene- viä näytteitä ja 5 kpl niiden vertailunäytteitä.

5.3 Tutkimusmenetelmät

Projektin ensimmäisessä vaiheessa tutkimusten painopiste oli asfaltin jäätymis- sulamiskestävyyden ja toisessa vaiheessa veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen tutkimusmenetelmän kehittämisessä. Vertailumenetelmä oli asfalttimassan veden- kestävyyden tutkimusmenetelmä, standardi SFS-EN 12697-12, menetelmä B. Tutki- muksen avulla pyrittiin kehittämään menetelmä, joka olisi riittävän nopea, jotta sitä voitaisiin käyttää säänkestävän asfalttimassan suhteituskokeisiin (toteutusaika näy- tevalmistus mukaan lukien enintään 2 viikkoa). Menetelmästä pyrittiin kehittämään

sellainen, että sitä voitaisiin käyttää urakoitsijoiden omissa laboratorioissa ilman kaltaita investointeja uusiin laitteisiin. Sillä tuli olla myös riittävä toistettavuus ja erotuskyky, jotta sen perusteella voitaisiin valita massan koostumus säänkestävyyden perusteella.

Halkaisuvetolujuuskoe

Asfalttinäytteiden halkaisuvetolujuudet määritettiin standardin SFS-EN 12697-23 mukaisesti. Ennen koestusta näytteet temperoitiin lämpötilaan +10 °C. Halkaisuvetolujuuskoe tehtiin (kuormitusleukojen) vakiosiiirtymänopeudella 50 mm/min (eli 0,83 mm/s).

Halkaisuvetolujuuskoe on nopea suorittaa ja yleisesti käytetty menetelmä monissa asfalttialan sovelluksissa esim. asfaltin suhteutuksessa sekä asfaltin vedenkestävyyden, jäätymis-sulamiskestävyyden ja kemikaalienkestävyyden määrittämisissä.

Jäätymis-sulamiskestävyyuskoe

Jäätymis-sulamiskokeissa käytettiin pääosin VTT:n automaattista tutkimuslaitetta, joka pystyttiin ohjelmoimaan siten, että asfalttinäytteiden jäätymis-sulamissyklit ja näytteiden lämpötilojen muutokset toteutuivat automaattisesti suunnitellulla tavalla. Laitteisto koostui jäädytys-sulatusarkusta, joka sisälsi sisäisen näytealtaan sekä arkun lämpötilan ohjausyksiköstä, mikrotietokoneesta ja ulkoisesta vesisäiliöstä.

Samalla laitteella voidaan suorittaa jäätymis-sulamistutkimuksia kahdella eri menetelmällä:

- menetelmä A: Jäätyminen ilmassa ja sulaminen vedessä
- menetelmä B: Jäätyminen ja sulaminen vedessä (tai suolaliuoksessa).

Yhtä testiä varten tarvittiin kymmenen asfalttinäytettä (D 100 mm, h 60 mm), joista viisi tutkimusnäytettä koestettiin jäädytys-sulatuslaitteessa. Viisi vertailunäytettä säilytettiin syklien ajan vapaasti ritilän päällä lämpötilassa +20 ...+ 22 °C (viimeisissä kokeissa +5 °C:ssa).

Ennen jäätymis-sulamissykliä aloitusta tutkimusnäytteiden huokostila imeytettiin alipaineen avulla täyteen vettä. Molemmissa menetelmissä tutkimusnäytteet jäädytettiin ja sulatettiin syklisesti useita kertoja.

Pääosa kokeista tehtiin menetelmällä B, jossa asfalttinäytteet olivat sekä jäätymis- että sulamissykliä varten muovi- ja muovipurkeissa upotettuina joko vesijohtoveteen tai 1-3 prosenttiseen suolaliuokseen. Tutkimuksen avulla selvitettiin testin menetelmäparametrit: testineste, minimi- ja maksimilämpötila, näytteen jäätymis- ja sulamisnopeus, kokeeseen soveltuvat jäädytys- ja sulatussykliä varten pituudet, tarvittava kokonaissyklimäärä ja kokeen kokonaiskesto.

Jäätymis-sulamiskokeiden loppuvaiheessa kokeiltiin suppeammalla koesarjalla menetelmää A, jossa asfalttinäyte jäädytettiin kylmässä ilmassa ja sulatettiin vedessä. Jäätymis-sulamissykliä varten tutkimusnäytteet olivat märkiä sulamissykliä varten jälkeen ja siksi kuivien vertailunäytteiden huokostila imeytettiin alipaineella täyteen vettä. Sen jälkeen kaikille näytteille tehtiin halkaisuvetolujuuskoe (näytteen lämpötila +10 °C ja kuormitusleukojen siirtymänopeus 50 mm/min). Koetuloksista laskettiin jäätymis-sulamiskokeiden olleiden näytteiden ja niiden varasto-olosuhteissa säi-

lytettyjen vertailunäytteiden halkaisuvetolujuuksien suhde (%), joka kuvasi jäätymis-sulamiskestävyyttä. **Jäätymis-sulamiskestävyys voidaan tutkia myös käsityönä tehtävällä kokeella jäädyttämällä näytteitä toistuvasti pakastearkussa, kylmähuoneessa tai vastaavassa kylmässä olosuhteessa (joko ilmassa tai veteen upotettuina) ja sulattamalla ne vedessä.**

Jäätymis-sulamismenetelmästä on laadittu Asfadur-projektissa menetelmäkuvaus PANK 4306, jossa on esitetty kumpikin jäätymis-sulamismenetelmä (A ja B). Menetelmä on tulostettavissa PANK ry:n internet-sivulta osoitteesta www.pank.fi.

Veden ja kuormituksen yhteisvaikutuksen määrittäminen

Veden ja kuormituksen yhteisvaikutus tutkittiin laboratoriossa laitteella, jolla vedellä imeytettyyn, vesiupotuksessa olleeseen asfalttinäytteeseen kohdistettiin toistuvia, nopeita, lyhytaikaisia paineiskuja. Menetelmällä jäljiteltiin kuorma-auton pyörän kevättälvellä asfalttipäällysteen yläpintaan aiheuttamia paineiskuja, kun asfaltin pintakerrosten lämpötila on nollan yläpuolella ja alemmat kerrokset ovat vielä jäässä muodostaen joustamattoman vesitiiviin alustan.

Tutkimuksen alkaessa VTT suunnitteli ja rakensi paineiskulaitteen kuormitusjärjestelyn prototyypin. Menetelmä perustui uuteen tapaan käyttää ohjelmoitavaa servohydraulista MTS-puristuslaitetta. Prototyypillä kokeiltiin useita erilaisia tapoja ja koejärjestelyjä paineiskujen aikaansaamiseksi näytteen yläpinnassa.

Lukuisten kokeilujen jälkeen päädyttiin kuormitustapaan, jossa vesiupotuksessa olevien näytteiden yläpintaan aiheutettiin puolisinikäyrän muotoisia syklisiä nopeita, lyhytaikaisia kuormituksia. Paineiskusyklin kuormitus- ja lepovaiheen sekä niiden välissä olevien siirtymävaiheiden kokonaiskesto-aika oli noin 2,5 s. Paineiskukokeiden avulla pyrittiin selvittämään, millä tavoin kuormitustapa, kuormituksen suuruus, niitä edeltävät rasiuskokeet ja esikäsitteilyt, asfalttityyppi, asfaltin lämpötila, tyhjättila ja vedellä kyllästysaste vaikuttivat asfalttinäytteen kykyyn kestää syklisiä paineiskuja. Kokeen aikana määritettiin asfalttinäytteen aksiaalinen kokoonpuristuma syklimäärän funktiona. Yksittäinen paineiskukoe lopetettiin, kun näyte murtui tai valittu näytteen kokoonpuristuman raja-arvo saavutettiin. Paineiskukokeita tehtiin sekä alipaineessa imeytetyille, vesiupotuksessa olleille näytteille että kuiville näytteille.

Vedenkestävyyskoe

Jäätymis-sulamiskokeiden ja dynaamisten paineiskukokeiden tuloksia verrattiin eurooppalaisen standardin mukaisen asfalttimassan vedenkestävyysmenetelmän tuloksiin (standardi SFS-EN 12697-12 menetelmä B), koska tämä on yleinen suhteituskokeissa käytetty asfaltin säänkestävyyttä mittaava testimenetelmä. Vedenkestävyys ilmoitettiin vedellä imeytettyjen, vesiupotuksessa säilytettyjen näytteiden ja kuivien vertailunäytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvojen suhdeluvun (%) avulla.

5.4 Tulokset

Halkaisuvetolujuus

Asfadur-projektissa todettiin, että useissa eri menetelmissä käytetyt ”märät” näytteet ja niiden ”kuivat” vertailunäytteet eivät olleet halkaisuvetolujuuskokeen aikana keskenään vertailukelpoisessa kosteusilassa ja että tämä vaikutti lujuuskoetuloksiin. Rinnakkaisnäytteiden tyhjätilojen välille sallittiin vain vähäisiä eroja, koska tyhjätila vaikuttaa lujuustuloksiin.

Asfalttinäytteen uudeksi tutkimusolosuhdeparametriksi halkaisuvetolujuuskokeessa valittiin ”asfalttinäytteen vedellä kyllästysaste”, joka ilmaisee, kuinka suuri osa asfalttinäytteen tyhjätilasta (huokostilavuudesta) on veden täyttämä. Asfaltin vedellä kyllästysaste oli Asfadur-projektin tulosten perusteella erittäin merkittävä vettä sisältävän asfalttinäytteen halkaisuvetolujuuteen vaikuttava tekijä. Käsite ”vedellä kyllästysaste” haettiin asfalttialan tutkimukseen geotekniikan terminologian puolelta, koska esim. Suomen Asfalttinormeissa tai asfalttipäällysteiden testausmenetelmissä ei mainittu tällaista tunnuslukua.

Jos asfalttinäytteen tyhjätila on täynnä vettä, näytteen vedellä kyllästysaste on 100 %. Tutkimustulosten perusteella todettiin, että vedellä kyllästysasteen ollessa 100 % tyhjätilassa oleva vesi tuki asfalttinäytettä halkaisuvetolujuuskokeen lyhytaikaisen, nopean kuormituksen aikana, koska vesi on kokoonpuristumatonta. Tästä syystä vedellä kyllästyneen asfalttinäytteen halkaisuvetolujuuskoetulos oli näennäisesti suurempi kuin asfalttinäytteen todellinen lujuus.

Asfaltin jäätyismekanismi nesteupotuksessa

Jäätymis-sulamistutkimuksen alkuvaiheessa vertailtiin näytepurkeissa olleiden, suolaliuokseen tai veteen upotettujen asfalttinäytteiden erilaisia jäätyismekanismejä keskenään. Kukin asfalttinäyte oli menetelmän B mukaisessa jäätymis-sulamiskokeessa upotettuna vähän näytettä suuremmassa purkissa veteen tai suolaliuokseen. Purkissa näytettä ympäröi nestekerros, jonka paksuus oli näytteen sivuilla noin 17 mm, yläpinnassa 10 mm ja pohjassa 6 mm.

Kun näyte oli upotettu suolaliuokseen, jäätymisvaiheen alkaessa suolaliuoksesta erottui lämpötilan alentuessa puhdasta vettä purkin yläosaan, jossa se jäättyi. Samaan aikaan väkevöityvä suolaliuos painui painavampana purkin pohjakerrokseen. Jäätymisrintama eteni pystysuunnassa ylhäältä alaspäin siten, että aluksi vain pintaan erottunut vesi ja näytteen yläosa jäättyivät, kun pohjalle erottunut väkevöitynyt suolaliuos ja näytteen alaosa pysyivät sulassa tilassa. Lämpötilan edelleen alentuessa erottuminen jatkui, kunnes kaikki ylempiin kerrokseen erottunut puhdas vesi oli jäänyt. Vasta sen jälkeen purkin alaosaan erottunut, väkevöitynyt suolaliuos alkoi kiteytyä. Kylläinen natriumkloridiliuos kiteytyy vasta noin $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa.

Vesiupotuksessa näytepurkeissa olevien näytteiden jäätyismekanismi oli olennaisesti erilainen ja yksinkertaisempi. Vesi jäättyi samaan aikaan koko näytteen korkeudelta ja jäätymisrintama eteni purkin sisäpinoilta kohti näytteen keskipistettä. Ensin jäättyi tällöin näytettä ympäröivä vesikerros. Kun asfalttinäyte jäättyi sen jälkeen, sitä tuki vaakasuunnassa tapahtuvaa jäätymislaajenemista vastaan purkin ulkoseinämä sekä purkin seinämän ja näytteen välissä oleva jääkerros.

Kun näyte jäädytettiin ilman ympäröimänä ritilän päällä (menetelmä A), osa huokosvedestä ehti valua pois näytteestä ennen jäätymistä. Näytteen ulkopinnan jäätyminen esti kuitenkin pian veden valumisen näytteestä. Ilmassa jäädytetyllä näytteellä ei ollut vastaavaa sivutukea kuin vesipurkinäytteillä. Voidaan todeta, että näytteen jäätyessä ilmassa, jäätymismekanismi oli olennaisesti erilainen kuin näytteen jäätyessä vesipurkeissa.

Näiden veden ja suolaliuosten jäätymismekanismiin kohdistuneiden kokeiden perusteella valittiin jäätymis-sulamiskokeimenä näytteiden upotusnesteeksi vesi suolaliuoksen asemasta, koska veden jäätymismekanismi oli paremmin hallittavissa kokeen aikana ja koska tehdyissä kokeissa ei havaittu veden ja suolaliuoksen käytöllä kovin merkittäviä selkeitä eroja asfalttinäytteen jäätymis-sulamiskestävyyden kannalta.

Jäätymis-sulamiskestävyys

Jäätymis-sulamiskestävyydellä voi olla merkittävä rooli tie- ja katuolosuhteissa asfaltin reikiintymisen aiheuttajana. Erityisen paljon tiepäällysteiden reikiintymistä oli todettu asfaltin saumojen läheisyydessä. Laattamaista päällysteen pintakerrosten irtaamista oli havaittu erityisesti kohteissa, joissa ylin päällystekerros oli ollut ohut suhteessa massan maksimiraekokoon.

Laboratoriossa suoritettujen jäätymis-sulamiskokeiden erottivat toisistaan säänkestävyyden kannalta hyvää ja vähän heikompaan kiviainesta sisältäneet asfalttimassat. Kun poikettiin enintään 0,2 % -yksikköä optimikoostumuksen mukaisesta bitumipitoisuudesta, se ei näkynyt jäätymis-sulamiskestävyyseroina. Tältä osin projektin jäätymis-sulamiskokeissa käytetyn menetelmäversion erotuskyky ei riittänyt suhteituskokeiden perusteeksi. Suuremmilla sideainepitoisuuspoikkeamilla jäätymis-sulamiskestävyysmenetelmien erottelukykyä ei tutkittu.

Vedenkestävyysstandardin mukainen menetelmä tuotti eri massakoostumusten vertailussa saman tuloksen kuin jäätymis-sulamiskoe, joka kesti lisäksi kauemmin. Molempien menetelmien erottelukyky oli siten yhtä hyvä tai huono, mutta molemmat sisälsivät myös epätarkkuutta näytteiden erilaisten kosteustilojen vuoksi.

Jäätymis-sulamiskokeen koestuksen jälkeen kuivat näytteet oli kuitenkin imeytetty täyteen vettä ennen halkaisua, jotta ne olisivat olleet samassa kosteustilassa kuin määrät näytteet. Tämän jälkeen tehdyissä halkaisuvetolujuuskokeissa vettä täynnä ollut huokostila lujitti näennäisesti molempien näytesarjojen näytteitä. Vaikka molempien näytesarjojen näytteillä oli sama vedellä kyllästysaste, saattoi veden täyttämän huokostilan vaikutus lujuustulokseen osittain peittää vähäisen bitumipitoisuuden muutoksen vaikutuksen lujuteen.

Projektin tulosten perusteella laadittiin asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyys-testin menetelmäkuvaus PANK-4306, jossa on pyritty vähentämään halkaisuvetolujuuskokeen näytteiden liian korkeasta vedellä kyllästysasteesta johtuvaa virhettä. Jäätymis-sulamiskokeessa 10 syklin ajan olleet tutkimusnäytteet ja niiden kuivina säilytetyt vertailunäytteet saatetaan ennen halkaisuvetolujuuskokeita samaan vedellä kyllästysasteeseen (100 %) ja sen jälkeen näytteiden tyhjätaloista valutetaan painovoimaisesti osa vedestä pois. Tämän jälkeen tehtävien halkaisuvetolujuuskokeiden aikana sekä tutkimus- että vertailunäytteiden vedellä kyllästysasteet ovat yhtä suuret, mutta huokokset eivät ole kuitenkaan täynnä vettä. Tämä parantaa todennäköisesti

PANK-menetelmän erotuskykyä verrattuna sen kehitysvaiheessa Asfadur-projektissa käytettyihin menetelmäversioihin.

Mitä pitempi oli tutkimusnäytteisiin kohdistuva esikoestusvaihe ennen tutkimusnäytteiden ja niiden vertailunäytteiden halkaisuvetolujuuden testausta, sitä enemmän myös vertailunäytteet ovat saattaneet muuttua varastoinnin aikana. Vertailunäytteet säilytetään usein korkeammassa lämpötilassa kuin jäätymis-sulamiskokeen tutkimusnäytteet. Korkeampi säilytyslämpötila nopeuttaa vertailunäytteiden lujittumista varastoinnin aikana ja se voi vaikuttaa merkittävästi tuloksiin, kun verrataan tutkimusnäytteitä ja vertailunäytteitä keskenään (esim. pitkäaikaiset jäätymis-sulamiskokeet tai vesisäilytyskokeet). Tästä syystä PANK-4306 menetelmän mukaan vertailunäytteet tulee säilyttää lämpötilassa +5 °C jäätymis-sulamissykliä ajan.

Veden ja kuormituksen yhteisvaikutus (vesipaineiskujen kestävyys)

Veden useat erilaiset, samanaikaiset, vaihtoehtoiset ja usein erisuuntaiset vaikutukset asfalttinäytteiden testaustuloksiin ovat merkittäviä kaikissa testimenetelmissä, joissa tutkitaan laboratorioissa säärasitusten jälkeen märkien asfalttinäytteiden lujuutta tai kestävyyttä, verrataan niitä kuivien vertailunäytteiden vastaaviin tuloksiin ja tehdään näiden tulosten perusteella päätelmiä asfaltin vedenkestävyydestä, jäätymis-sulamiskestäväyydestä, kemikaalienkestävyydestä ym. toiminnallisista ominaisuuksista.

Erytystä mielenkiintoa herätti paineiskukokeen tulos, jonka mukaan vesiupotuksessa tällä menetelmällä koestettu SMA- tai AB-näyte, jonka huokostila oli täynnä vettä, kesti enemmän nopeita syklisiä paineiskuja kuin kuiva näyte. Tulos oli tässä suhteessa samanlainen kaikissa paineiskukokeissa, kaikissa tutkituissa lämpötiloissa (+5...+20 °C) ja kaikilla tutkimuksessa käytetyillä asfaltin pintapaineilla (1000...7000 kPa).

Todellisuudessa myös tässäkin kokeessa asfalttinäytteen huokosissa olevan veden kokoonpuristumattomuus ja veden virtausvastus asfaltin huokostilassa lisäsivät merkittävästi veden kyllästäjän asfalttirakenteen hetkellistä kuormankantokykyä lyhytaikaisten syklisten kuormitusten aikana.

Vesi voi vaikuttaa vesiupotuksessa olevan asfalttinäytteen lujuuteen lyhytaikaisen kuormituksen aikana ainakin kahdella eri suuntiin vaikuttavalla tavalla:

- Jos asfaltin huokokset ovat täynnä vettä lyhytaikaisen kuormituksen aikana, kokoonpuristumaton vesi voi parantaa asfalttinäytteen hetkellistä kuormituskestävyyttä ja vähentää sen kokoonpuristumista.
- Jos vesi on ollut pitkän aikaa asfaltin huokosissa, se on voinut heikentää bitumin ja kiviaineksen välistä tartuntaa sekä samalla asfaltin halkaisuvetolujuutta. Tartunnan pysyvyyteen vaikuttaa merkittävästi kiviaineksen mineraalikoostumus.
- Jos asfaltin tyhjätila on vain osittain veden täyttämä, huokosvesi ei paranna asfaltin lujuutta lyhytaikaisen kuormituksen aikana. Veden vaikutus lujuuteen riippuu myös huokostilan suuruudesta ja muodosta.

Vedenkestävyys

Asfaltin vedenkestävyyskoe, joka perustuu vesisäilytyksessä olleiden märkien näytteen ja niiden kuivien vertailunäytteiden halkaisuvetolujuuksien suhteeseen, on ollut eräs asfalttimassan toiminnallisen suhteituksen perusmenetelmä ASTO-projektin ajoista lähtien yli 20 vuoden ajan. Nykyään menetelmä on eurooppalainen standardi SFS-EN 12697-12, menetelmä B. Menetelmän erotuskykyä on epäilty ja sen toistettavuutta on pidetty heikkona. Asfadur-projekti esittää konkreettisia ehdotuksia menetelmän epävarmuustekijöiden vähentämiseksi.

EN-standardin mukaisessa vedenkestävyyskokeessa veden kyllästäjän määrän näytteen halkaisuvetolujuuskokeessa saadaan todennäköisesti usein liian suuri lujuustulos, koska märkä näyte otetaan suoraan vesiupotuksesta. Kokeessa on tarkoitus mitata voima joka tarvitaan näytteen halkaisemiseen, mutta sen lisäksi mittaustulokseen vaikuttaa systemaattinen virhe, koska kokoonpuristumaton vesi asfaltin veden täyttämässä huokosissa aiheuttaa puristusta vastustavan voiman ja estää asfalttinäytteen kokoonpuristumista. Tämä parantaa näennäisesti asfaltin vedenkestävyyttä.

Edellä kuvattujen veden vaikutusmekanismien perusteella voidaan todeta, että vettä sisältävien ns. ”märkien” asfalttinäytteiden lujuudenmittaustulokseen vaikuttaa aina asfaltin vedellä kyllästysaste ja se tulisi siksi ottaa huomioon. Jos kyllästysaste on 100 %, veden täyttämä tyhjätila lisää näennäisesti asfaltin halkaisuvetolujuutta (näytteen kokoonpuristumattomuuden vuoksi).

Vedenkestävyyttulokseen vaikuttaa kuitenkin myös pitkäaikaisen vesisäilytyksen aikana mahdollisesti tapahtuva bitumin ja kiviaineksen välisen tartunnan heikkeneminen. Vedenkestävyyskokeen tulokseen vaikuttaa siten ainakin kaksi samanaikaista, mutta erisuuntaista veden vaikutustekijää. Tämä tuo vastauksen myös kysymykseen, miksi useissa aiemmin tehdyissä kokeissa vedenkestävyysominaisuuksiltaan hyvien kiviainesten vedenkestävyyttä kuvaava tartuntaluku oli saattanut olla yli 100 %. Vesisäilytys ei ollut näissä tapauksissa heikentänyt asfalttinäytteen koossapysyvyyttä ainakaan yhtä paljon kuin veden täyttämät huokokset olivat parantaneet näytteen halkaisuvetolujuuskokeen tulosta.

Asfalttimassan vedenkestävyyden määrittämiseen käytettävä eurooppalainen standardi sisältää edellä kuvatuista syistä johtuvan systemaattisen virheen eikä anna siksi luotettavaa tietoa asfaltin vedenkestävyydestä.

Koska vedenkestävyyden määrittäminen menetelmän virheellinen, useiden eurooppalaisten maiden asfalttinormien vaatimukset asfalttimassan vedenkestävyydelle perustuvat epäluotettavaan menetelmään. Kun vedenkestävyyden testimenetelmää muutetaan, tulisi myös asfalttinormien vedenkestävyyden vaatimukset tarkastaa ja tarvittaessa muuttaa.

Vedenkestävyyden määrittäminen menetelmästandardin virhe tulisi korjata siten, että sekä vesisäilytyksessä olleet tutkimusnäytteet että niiden kuivina säilytetyt vertailunäytteet saatetaan ennen halkaisuvetolujuuskoea samaan vedellä kyllästysasteeseen. Halkaisuvetolujuuskokeen aikana asfalttinäytteiden vedellä kyllästysasteen tulisi vastata näytteiden kosteustilaa, jossa vesisäilytyksessä olleiden tutkimusnäytteiden halkaisuvetolujuus on pienimmillään.

Näytteiden halkaisuvetolujuuskokeen mukaista minimilujuutta vastaavaa vedellä kyllästysaste tulisi selvittää kokeellisesti. Ennen kuin tämä on selvitetty, voidaan näytteet saattaa ennen halkaisua ensin 100 % vedellä kyllästysasteeseen ja valuttaa osa huokosvedestä sen jälkeen pois painovoimaisesti ennalta valitun vakioajan kuluessa. Tällöin tutkimus- ja vertailunäytteet ovat samassa vedellä kyllästysasteessa, mutta tyhjätila ei ole kuitenkaan täynnä vettä. Tällöin näytteet ovat ainakin paremmin vertailukelpoisia keskenään kuin nykyisen käytännön mukaan ja tästä syystä vedenkestävyytulosten luotettavuus paranee.

6 Johtopäätöksiä

Asfadur-projektin tavoitteena oli kehittää menettelytapa asfaltin säänkestävyyden määrittämiseksi toistuvien jäätymis-sulamisvaiheiden avulla.

Projektin aikana tämä menetelmä kehitettiin ja sen menetelmäparametrit selvitettiin. Tutkimuksen aikana tehdyissä laboratoriokeissa käytetty jäätymis-sulamiskokeen menetelmäversio ei pystynyt erottamaan asfalttimassan 0,2 %-yksikön muutoksen vaikutusta jäätymis-sulamiskestävyyteen. Tähän saattoi vaikuttaa, että näissä ko-keissa asfalttinäytteen vedellä kyllästysaste oli halkaisuvetolujuskokeen aikana 100 %, mikä johti näennäisesti todellista suurempaan lujuustulokseen, koska veden täyttämät huokokset tukivat näytettä nopean kuormituksen aikana. Tämä saattoi vai-keuttaa suhteellisten pienten koostumuserojen (bitumipitoisuusero 0,2 %-yks.) mah-dollisesti aiheuttamien tutkimus- ja vertailunäytteiden halkaisuvetolujuserojen ha-vaitsemista.

Menetelmäkehitystyön yhteydessä selvitettiin myös, millä tavalla asfaltin huokosti-lassa olevan suolaliuoksen jäätyismekanismi poikkeaa veden jäätymistavasta asfal-tissa. Tämän lisäksi kehitettiin laboratoriokeumenetelmä, jolla voidaan tutkia asfalt-timassan kyky kestää veden ja kuormituksen yhteisvaikutusta.

Tutkimuksessa otettiin käyttöön suomalaisessa asfalttitekniikassa uusi käsite ”asfalt-tipäällystenäytteen vedellä kyllästymisaste”, jota tarvitaan jatkossa esim. asfaltin ve-denkestävyyden ja jäätymis-sulamiskestävyyden määrittämissä, jos projektin suositukset toteutuvat.

Kun asfalttinäytteen huokostila on täynnä vettä, asfaltin vedellä kyllästysaste on 100 %. Tällöin asfalttinäyte kestää merkittävästi paremmin lyhytaikaisia, nopeita kuormituksia kuin kuiva näyte. Tämä tulee ottaa huomioon kaikissa asfaltin testime-netelmissä, joissa tutkitaan vettä merkittävästi sisältävän asfalttinäytteen lu-juusominaisuuksia lyhytaikaisten kuormitusten perusteella tai verrataan niitä vertai-lunäytteiden vastaaviin lujuuksiin.

Tutkimus osoitti asfaltin vedenkestävyyden eurooppalaisen standardin (SFS-EN 12697-12, menetelmä B) antavan systemaattisesti virheellisen tuloksen asfaltin ve-denkestävyydestä. Tutkimuksessa esitettiin myös, millä tavoin standardia tulisi muut-taa systemaattisen virheen poistamiseksi.

Samassa yhteydessä, kun eurooppalainen standardimenetelmä mahdollisesti muute-taan, tulisi myös asfalttinormien vedenkestävyysvaatimukset tarkistaa niissä maissa, joissa tämä standardi tai sitä vastaava muu menetelmä on käytössä päällysteen suunnittelussa tai vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa.

7 Jatkoimet

RYM-SHOK-tutkimusohjelman valmistelu

Asfaltin reikiintymiseen ja purkautumisvaurion estämiseen liittyviä tutkimuksia on suunniteltu jatkettavaksi valmisteilla olevassa Infra-alan RYM-SHOK-tutkimusohjelmassa. Asfaltin vaurioitumisen osalta tutkimus tulisi aloittaa kenttätutkimuksilla, joiden avulla selvitettäisiin tiestöltä otettujen päällystenäytteiden perusteella ja silmämääräisin havainnoin:

- miten asfaltin vaurioituminen tapahtuu
- millaiset kohdat vaurioituvat (vaurioitumisen kartoitus)
- mitkä ovat toteutuneet reseptit
- mitkä olivat laatutulokset.

Kenttätutkimuksen perusteella haetaan todennäköisiä syitä ja syy-yhteyksiä asfaltin purkaantumiselle. Ensin selvitetään mitä ja miten on tapahtunut. Sen jälkeen reikiintymisilmiö mallinnetaan.

Mallintaminen edellyttää myös laboratoriokokeita, joilla selvitetään mallin parametrejä ja verifioidaan mallia. Mallin avulla voidaan laboratoriokokeet suunnata tarkemmin oikeisiin painopisteisiin.

Vedenkestävyysskoeken luotettavuuden parantaminen

Voimassa olevaa asfalttimassan vedenkestävyyden eurooppalainen testausmenetelmä (standardi SFS-EN 12697-12, menetelmä B) edellyttää, että vedenkestävyys tutkitaan suhteituksen mukaisella massalla halkaisuvetolujuuskokeilla, joissa vedessä säilytettyjen näytteiden vedellä kyllästysaste on noin 100 % ja niiden vertailunäytteiden vedellä kyllästysaste noin 0 %. Tämä aiheuttaa vedenkestävyyssarvoon systemaattisen virheen, minkä seurauksena kaikki tällä menetelmällä määritetyt vedenkestävyytulokset ovat virheellisiä.

Sekä tutkimusnäytteiden että vertailunäytteiden halkaisuvetolujuudet tulisi tutkia samassa näytteiden vedellä kyllästysasteessa, jonka tulisi vastata sitä tilannetta, jossa vesisäilytyksessä olleet tutkimusnäytteet vaurioituvat pienimmällä kuormituksella. Vedenkestävyysskoeken menetelmän luotettavuuden parantamiseksi tulisi tehdä tutkimus, jossa selvitetään:

- näytteiden vedelläkyllästysasteen vaikutus vedenkestävyytuloksiin,
- näytteiden vedellä kyllästysasteen tavoitetaso vedenkestävyysskoekessa
- menetelmä vedenkestävyysskoeken näytteiden vedellä kyllästysasteen säätämiseksi tavoitetasolle.

Jos vedenkestävyyden testimenetelmää muutetaan, tulisi menetelmän muutoksen vaikutus vedenkestävyyssvaatimuksiin selvittää kokeellisesti.

Jäätymis-sulamiskestävyyskoeken luotettavuuden parantaminen

Asfadur-projektissa kehitettiin kaksi menetelmävaihtoehtoa asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyys tutkimiseksi. Toinen näistä vaihtoehtoista (menetelmä A) otettiin mukaan tutkimukseen vasta projektin viime vaiheissa. Se lyhentää vedenkestä-

vyyskokeen suoritusaikaa noin 50 % verrattuna tutkimuksessa pääosin käytettyyn jäätymis-sulamiskokeen menetelmävaihtoehtoon B, kun käytetään automaattista jäädytys-sulatuslaitetta. Projektin jäätymis-sulamiskokeiden vertailunäytteet halkaistiin 100 % vedellä kyllästysasteessa, koska tuolloin ei otettu huomioon vettä täynnä olevan huokostilan vaikutusta näytetuloksiin.

Projektissa laaditun jäätymis-sulamiskokeen PANK 4306 menetelmän avulla tulisi selvittää tutkimuksen avulla, kumpi sen sisältämistä menetelmävaihtoehdoista (A vai B) soveltuu paremmin asfaltin jäätymis-sulamiskestävyyden tutkimiseen. Menetelmässä B kannattaisi vielä kokeilla myös suolaliuoksia.

Tämän menetelmän yhteydessä voidaan todennäköisesti käyttää halkaisuvetolujuuskokeissa samoja näytteiden vedellä kyllästysasteita koskevia ohjeita kuin vedenkestävyyskokeessa, jos sellaiset laaditaan vedenkestävyyskokeelle.

Internetissä tietoa Asfadur-projektista ja menetelmästä PANK-4306:

- www.liikennevirasto.fi/julkaisut, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä: Asfalttimassan kestävyys jäätymis-sulamista sekä veden ja kuormien yhteisvaikutusta vastaan.
- www.pank.fi/, Menetelmäkuvaus PANK-4306: Asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyys.

8 Summary

8.1 General

Background

The starting point for the Asfadur project (Resistance of asphalt mixture against freeze-thaw and the combined effect of water and loads) was the need to develop a reliable procedure for assessing the weather resistance of asphalt pavement. Currently used methods for determining weather resistance and water sensitivity (for example, European standard EN 12697-12, method B) had been found unsatisfactory with regard to repeatability and accuracy. It was considered a basic requirement for solving any weather resistance problems with asphalt that an accurate and sufficiently fast method be available for assessing and determining the weather resistance of asphalt pavement.

The need for improving the weather resistance of pavement was clearly indicated by weather resistance problems becoming more common on roads and streets particularly in mild winters, observations of climate change, previous asphalt weather resistance studies, experience and knowledge, and on the other hand, the lack of knowledge on factors contributing to weather resistance, and requirements set by new contracting practices. The number of pavement freeze-thaw cycles had substantially increased in mild winters compared to colder winters. Climate change had altered the stress conditions affecting asphalt pavement, which were now different from what the present pavement types had been developed for.

On the road network, the weather resistance problems were more commonly indicated as ravelling and potholes particularly after a period of freezing weather in late winter. Climate-induced pavement damage causes major repair costs annually and poses a danger to traffic safety.

Objective

The original objective of the Asfadur project was to develop a laboratory test method applicable for testing the freeze-thaw resistance of asphalt mixtures. During the project, the objective was redefined so as to develop a method for studying the combined effect of water and loading on the resistance of asphalt mixture.

Scope

At the preparation stage, the scope of the Asfadur project was limited to developing a method for studying the freeze-thaw of asphalt, testing the method and determining its accuracy and repeatability. As a boundary condition set by the financiers, the improvement of weather resistance by means of mixture technology (such as the use of additives) was left out of the scope of the project because in accordance with new construction practice, the technical development of pavement was now the responsibility of contractors. Asphalt mixtures with clearly incorrect composition (such as falling short of the optimal binder content by more than 0.2 percentage points) were also left out of the research material.

Method of implementation

Even though the crucial objective of the project, according to the original plan, was the development of a method for studying freeze-thaw resistance, the project plan contained provisions for changing the focus of the study as necessary on the basis of knowledge gained during the project. At the project start-up stage, the project implementation steering group consisting of the financiers set up a Method Technology subgroup which, jointly with the Laboratory Committee of PANK, had the task of directing the development of study methods in particular, and of making suggestions as necessary to review and redirect the scope of the project. The Board of PANK supervised project implementation and made its part of the project financing decisions stage by stage, while directing the overall schedule of stages in project implementation.

In the second stage of the project, the focus of studies was shifted to the combined effect of water and loading instead of the freeze-thaw resistance of asphalt.

Lemminkäinen Infra Oy and Destia Oy made the mix design for asphalt mixtures used in the study, produced the asphalt specimens and determined their voids. VTT planned the study, conducted laboratory tests on selected asphalt mixtures and prepared the study report. The Method Technology subgroup within the project directed methodical development of the study.

8.2 Mix design and production of specimens

The Method Technology subgroup defined the mix design objectives for the asphalt mixtures to be studied to match the general requirements and instructions in the Asphalt Specifications. Asphalt specimens for laboratory tests were produced with optimal binder content according to the mix design, as well as with binder content 0.2 percentage points short of the optimum. The main focus of study was the weather resistance of stone mastic asphalt (SMA) pavement because pothole damage had been very common also on main roads with heavy traffic.

To ensure water penetration into the asphalt specimens in laboratory tests, the voids target in the production of pavement specimens was usually 6% to 7% (allowed range 6% to 8% in accordance with the SSD (=saturated surface-dried) method). A lower percentage of voids is usually achieved in conventional pavement work. However, the Finnish Asphalt Specifications allow 2 percentage points higher voids content in individual joint specimens than in specimens taken from a traffic lane. Thus, in accordance with the Asphalt Specifications, the voids requirement for individual joint specimens was $\leq 8\%$ (using the SSD method), which corresponded to the voids target level for production of specimens in the project. Pothole damages on road were particularly common in the vicinity of joints.

The freeze-thaw resistance specimens were produced by compacting the asphalt mixture into slabs with the laboratory's roller, and specimens of D 100 mm were drilled out of the slabs and the ends were straightened by sawing (specimen height 60 mm). For each freeze-thaw test, five specimens for freeze-thaw cycles and five specimens for reference were produced.

8.3 Study methods

At the first stage of the project, the focus of studies was the research and development of a method for studying the freeze-thaw resistance of asphalt mixture, and at the second stage, this changed into a method for studying the combined effect of water and loadings. The reference method was the method for determining the water sensitivity of asphalt mixture in accordance with standard EN 12697-12, method B. The objective of the study was to develop a method that would be sufficiently fast for carrying out mix design tests on weather-resistant asphalt mixture (implementation time not more than two weeks including production of specimens). The aim was to develop a method that could be used in contractors' own laboratories without expensive investments in new equipment. It also had to have sufficient repeatability and accuracy in order to be used as a basis for selecting the composition of mixture on the basis of weather resistance.

Indirect tensile strength test

The indirect tensile strength of an asphalt specimen is determined using method EN 12697-23. Before the test, the specimens are usually tempered to +10 °C. The indirect tensile strength test is conducted at a constant movement speed (of the loading jaws) of 50 mm/min (in other words 0.83 mm/s).

The method is fast to implement and commonly used in many asphalt industry applications, such as asphalt mix design and the determination of water sensitivity, freeze-thaw resistance and chemical resistance of asphalt mixtures.

Freeze-thaw resistance test

The study was mainly carried out on VTT's automatic freeze-thaw equipment that could be programmed with the freeze-thaw cycles for asphalt specimens in accordance with the method description prepared within the project. The equipment consists of a freeze-thaw box containing an internal specimen pool, as well as a box temperature control unit, a microcomputer and an external water tank.

The same equipment can be used for freeze-thaw studies according to two different methods:

- Method A: Freezing in air and thawing in water
- Method B: Freezing and thawing in water (or saline solution).

Ten asphalt specimens (D 100 mm, h 60 mm) were required for each test, five of which were subjected to testing in the freeze-thaw equipment and five reference specimens were stored freely on a grid for the duration of the cycles at a temperature of +20 to +22 °C (in the last tests at +5 °C).

Before starting the freeze-thaw cycles, the pore volume of the study specimens was saturated with water using residual pressure. In both methods, the study specimens were cyclically frozen and thawed several times.

Most of the tests were carried out with method B in which the asphalt specimens were kept in plastic cans for both the freezing and thawing cycles, immersed in tap water or a 1% to 3% saline solution. The methodical parameters for the test were determined

through research: test liquid, minimum and maximum temperature, freezing and thawing rate of the specimen, durations of freezing and thawing cycles appropriate for the test, the required total number of cycles and the total duration of the test.

At the final stage of the freeze-thaw tests, experiments were made on a reduced test series with method A in which the asphalt specimen was frozen in cold air and thawed in water.

At the end of the freeze-thaw cycles, the study specimens were wet after the thawing cycles, and for this reason, the pore volume of the dry reference specimens was saturated with water using residual pressure. After this, all specimens were subjected to an indirect tensile strength test (specimen temperature +10 °C and movement speed of loading jaws 50 mm/min). The relation (%) between the indirect tensile strengths of specimens subjected to freeze-thaw stress and reference specimens stored in storage conditions was calculated from the test results, and this represented freeze-thaw resistance.

Freeze-thaw resistance can also be studied through a manual test by repeatedly freezing the specimens in a freezer, cold storage room or similar cold conditions (either in air or immersed in water) and thawing them in water.

The Asfadur project authored the freeze-thaw method description PANK 4306 that presents both of the freeze-thaw methods (A and B). The method can be printed out from PANK's Web pages at www.pank.fi/.

Determining the combined effect of water and loadings

The combined effect of water and loadings was studied in a laboratory using a device that subjected a water-saturated asphalt specimen to repeated rapid short-term pressure impacts. The method simulated the pressure impacts caused by a lorry wheel on the top surface of asphalt pavement in late winter when the temperature of the asphalt surface layers is above freezing and the lower layers are still frozen, creating an inflexible waterproof bottom.

In the beginning of the study, VTT designed and constructed a pressure impact machine loading arrangement. The method was based on a new way of using a programmable servo hydraulic compression device. Several different methods and test arrangements for creating water pressure impacts on the top surface of the specimen were tested on the loading arrangement.

After numerous tests, a loading method was chosen in which the top surface of specimens immersed in water was subjected to half-sinusoid-shaped cyclical rapid short-term loadings. The duration of the loading and rest phases of the pressure impact cycle, as well as the transition phases in between, was approximately 2.5 s. The aim of the pressure impact tests was to find out how the loading method, magnitude of loading, pre-loading stress tests and preparations, asphalt type, asphalt temperature, voids and water saturation level affected the resistance of an asphalt specimen against cyclical pressure impacts. During the test, the axial compression of an asphalt specimen was determined as a function of the number of cycles. Each pressure impact test was terminated when the specimen broke or the selected compression limit was reached. Pressure impact tests were conducted both on specimens that had been saturated with residual pressure and immersed in water, and on dry specimens.

Water sensitivity tests

The results of the freeze-thaw tests and the dynamic pressure impact tests were compared with the results of the asphalt mixture water sensitivity method according to the European standard (EN 12697-12 method B) because this is a common test method used for determining the weather resistance of asphalt in mix design tests. Water resistance is indicated by the ratio (%) between the indirect tensile strengths of water-saturated and water-immersed wet specimens and dry specimens.

8.4 Results

Indirect tensile strength

The Asfadur project determined that the "wet" specimens and their "dry" reference specimens used in several different methods are not in a mutually comparable moisture state during the indirect tensile strength test.

Only minor differences were allowed in the voids of parallel specimens. "Saturation level of the asphalt specimen" was chosen as a study condition parameter for the indirect tensile strength test. The parameter indicates the percentage of voids in the asphalt specimen that is filled by water. On the basis of the results of the Asfadur project, the saturation level of asphalt specimen is a very substantial factor affecting the indirect tensile strength of an asphalt specimen containing water.

If the voids of an asphalt specimen are full of water, the saturation level of the specimen is 100%. It was noted that at a saturation level of 100%, the water in the voids may reinforce the asphalt specimen during the momentary loading in the indirect tensile strength test because water is incompressible. For this reason, the indirect tensile strength test result of a water-saturated asphalt specimen may be greater than the true strength of the asphalt specimen.

Asphalt freezing mechanism in liquid immersion

At the initial stage of the freeze-thaw study, the different freezing mechanisms of asphalt specimens immersed in saline solution or water in sample cans were compared.

When each asphalt specimen was immersed in saline solution in a can slightly larger than the specimen in cold conditions, freezing took place so that at first, water separated from the saline solution to the top of the can, and simultaneously, the concentrating saline solution, which was heavier, sank to the bottom layers of the can. The freezing front proceeded vertically from top to bottom so that at first, only the water separated on the surface and the top part of the specimen froze, while the concentrated saline solution separated on the bottom and the bottom part of the specimen remained in unfrozen state. When the temperature dropped further, separation continued until water separated to the upper layers had frozen. Only after this, the saturated saline solution started to crystallize.

In water immersion, the freezing mechanism of the specimens in the sample cans was substantially different and simpler. The water froze simultaneously across the entire height of the specimen, and the freezing front proceeded from the inside surfaces of the can towards the centre of the specimen.

On the basis of these tests concerning the freezing mechanism of water and saline solutions, water was chosen instead of saline solution as the immersion liquid for specimens in the freeze-thaw method because the freezing mechanism of water was more controllable during the test, and because the tests did not indicate any significantly clear differences between the use of water or saline solution in terms of the freeze-thaw resistance of asphalt specimens.

Freeze-thaw resistance

Freeze-thaw resistance may play an important role as a factor causing the formation of potholes in asphalt. Potholes have been found in particularly large numbers in the vicinity of asphalt joints. Slab-type separation of surface layers has been observed particularly when the top layer of pavement has been thin in relation to the maximum grain size.

The freeze-thaw tests carried out in the laboratory separated out asphalt mixtures containing good and somewhat weaker aggregate in terms of weather resistance. A deviation of no more than 0.2 percentage points from optimal bitumen content was not reflected as differences in freeze-thaw resistance. With regard to this, the accuracy of the method was insufficient to serve as the basis for mix design tests. The accuracy of the freeze-thaw methods was not studied at greater binder content deviations. The asphalt mixture water sensitivity test method according to the European standard provided with lower costs as much and as unsatisfactory information as the freeze-thaw method for assessing the weather resistance of asphalt pavement. Results of both methods may however contain inaccuracy because of “wrong” water saturation levels of test specimens.

After the freeze-thaw tests, the dry samples had been saturated with water before splitting so as to bring them to the same moisture status with the wet samples. In indirect tensile strength tests conducted after this, the pore volume filled with water apparently reinforced the specimens of both series. Even though specimens of both series had the same saturation level, the effect of the water-filled pore volume on the strength result may have partially masked the strength effect of a minor change in bitumen content.

On the basis of the project results, a method description for the freeze-thaw resistance of asphalt mixture (PANK-4306) was authored. According to the description, after 10 cycles of freeze-thaw testing study specimens and their dry-stored reference specimens shall be brought to the same saturation level (100%). After this, part of the water shall be drained out of the pore volume of the specimens before indirect tensile strength tests. During the indirect tensile strength test of PANK method, the saturation levels of the study specimens and reference specimens are equal but the pores are not full of water.

Reference specimens are often stored at a higher temperature meanwhile the study specimens are in freeze-thaw cycles. A higher storage temperature accelerates the hardening of the reference specimens during storage and may significantly affect the results of comparison between the study specimens and the reference specimens (for example, long-term freeze-thaw tests or water storage tests). For this reason, in accordance with the PANK method, the reference specimens have to be stored at a temperature of +5 °C for the duration of the freeze-thaw cycles.

Combined effect of water and loadings

The several different, simultaneous, alternative and often divergent effects of water on the testing results of asphalt specimens are significant in methods used for studying the strength or resistance results of specimens in contact with water, comparing them with corresponding test results of dry reference specimens and making conclusions on the water sensitivity, frost resistance, stiffness and other functional properties of asphalt pavement on the basis of the results.

Particular interest was drawn to the pressure impact test result according to which specimens that had been immersed in water and had its pore volume full of water could withstand more rapid cyclic pressure impacts than dry specimens. The result was systematic in all pressure impact tests, at all of the temperatures studied (+5...+20 °C) and all asphalt surface pressures used in the study (1000...7000 kPa). Actually also in this test, the incompressibility of water in the pores of an asphalt specimen and the flow resistance of water in the pore volume substantially increased durability of a water-saturated asphalt structure during rapid, momentary, cyclic loadings.

Water affects a sample immersed in water in the following ways:

- If the pores of asphalt are full of water during momentary loading, the incompressible water improves the loading resistance of the asphalt specimen during momentary loading and reduces its compression. If water has been in the pores of asphalt for a long time, this may have weakened the adhesion between bitumen and aggregate. The mineral composition of the aggregate significantly affects the durability of adhesion. Thus an asphalt specimen may be subjected to two divergent water-induced strength-affecting factors during momentary loading.
- If the pore volume of asphalt pavement is partially filled with water, the pavement may become compressed, condensed, deformed and broken also during momentary cyclic loading.

On the basis of the influence mechanisms of water described above, it can be noted that the strength measurement result of "wet" asphalt specimens containing water is always affected by the saturation level.

Water sensitivity

An asphalt water sensitivity test based on the relation between the indirect tensile strengths of wet specimens stored in water and their dry reference specimens has been one of the basic methods of functional mix design of asphalt mixture for many years. The method is currently known as the European standard EN 12697-12, method B. The reliability of the method has been questioned and its repeatability has been considered poor. The Asfadur project presents concrete suggestions for reducing the uncertainty factors of the method.

In a water sensitivity test according to the EN standard, the indirect tensile strength test of a water-saturated wet specimen probably often indicates a too high strength result because the wet specimen is taken directly from water immersion and, according to the method standard, must be subjected to an indirect tensile strength test

within one minute. The purpose of the test is to measure the force required for splitting the sample but, in addition to this, systematic error affects the measurement result because incompressible water in the pores of asphalt prevents compression of the asphalt specimen and may cause a counterforce to compression.

This systematic error apparently affects the water sensitivity test results of asphalt pavement, but its effect also depends on voids content and voids shape of pavement. However, the water sensitivity result is also affected by potential weakening of the adhesion between bitumen and aggregate during storage in water. Thus the result of the water sensitivity test is affected by two simultaneous but divergent changes caused by water. This explains why the adhesion factor indicating the water sensitivity of aggregates with good water sensitivity properties can be more than 100%. In this case, water has not weakened the cohesion of the specimen to the same extent to which the water-filled pores have improved the result of the indirect tensile strength test.

The European standard used for determining the water sensitivity of asphalt mass has an inherent systematic error caused by the reasons described above and therefore does not provide reliable information on the water sensitivity of asphalt.

Because the method for determining water sensitivity is unreliable, the requirements for the water sensitivity of asphalt mixture in the asphalt specifications of several European countries are based on an unreliable test method. If the water sensitivity test method is changed, the requirement values for water sensitivity must also be reviewed and changed if necessary.

The flaw in the water sensitivity determination method standard should be rectified so that both the study specimens stored in water and the reference specimens in dry storage shall be brought to the same saturation level before the indirect tensile strength test. During the indirect tensile strength test, the saturation level of the asphalt specimens should correspond to a situation where the indirect tensile strength of study specimens stored in water is at its lowest.

The saturation level corresponding to the minimum in the indirect tensile strength test should be determined empirically. Before that saturation level has been determined, the specimens can be brought to a saturation level of 100%, and after this, part of the water can be drained by gravity. The study and reference specimens are then in the indirect tensile strength test at the same saturation level ($\neq 100\%$), which is at least more reliable than the present practice.

8.5 Conclusions

The objective of the Asfadur project was to develop a procedure for determining the weather resistance of asphalt using repeated freeze-thaw cycles.

During the project, the method was developed and its method parameters were determined. The method version used in the laboratory tests during the study was unable to differentiate the effect of a 0.2 percentage point change in asphalt mixture on freeze-thaw resistance. This might have been influenced by the fact that in these tests, the saturation level of the asphalt specimens was 100% during the indirect tensile strength tests, which made the strength result appear greater than actual because

the pores filled with water reinforced the specimen during momentary loading. This might have hampered the observation of potential differences in the indirect tensile strengths of study specimens and reference specimens caused by relatively small differences in composition (0.2 percentage points difference in bitumen content).

In connection with method development work, it was also determined how the freezing mechanism of saline solution in the pore volume of asphalt differs from the way water freezes in asphalt. In addition to this, a laboratory test method was developed for studying the resistance of asphalt mixture against the combined effect of water and loading.

A concept "saturation level of asphalt pavement specimen" will be required in the future in contexts such as the methods for determining the water sensitivity and freeze-thaw resistance of asphalt if the project's recommendations are realised.

When the pore volume of an asphalt specimen is full of water, the saturation level of the specimen is 100%. In this case the asphalt specimen is substantially more resistant against momentary rapid loadings compared to a dry specimen. This must be taken into account in all asphalt testing methods in which the strength properties of an asphalt specimen containing a substantial amount of water are studied or compared with a reference specimen.

The study proved that the European standard for the water sensitivity of asphalt (EN 12697-12, method B) provides a systematically incorrect result. The study also proposed changes to the standard in order to eliminate the systematic error. At the same time of potentially changing the European standard method, the water sensitivity requirements should also be reviewed.

8.6 Further actions

8.6.1 Preparation of the RYM-SHOK research programme

Plans have been made for continuing studies related to the prevention of formation of potholes and ravelling of asphalt in the infrastructure sector's RYM-SHOK research programme, which is in preparation. With regard to asphalt damage, research should be started with field studies determining the following things on the basis of pavement specimens taken from roads and visual observations:

- what is the mechanism of asphalt damage
- what kinds of locations are damaged (damage survey)
- which are the realised recipes
- what are the quality results.

Field research shall look for probable causes and causal relations affecting the ravelling of asphalt. At first, it shall be determined what has happened and how. After this, the phenomenon of pothole formation shall be modelled.

Modelling also requires laboratory tests for determining model parameters and verifying the model. With the help of the model, laboratory tests can be focused more accurately to the correct points of interest.

8.6.2 Improving the reliability of the water sensitivity test

The valid testing method for the water sensitivity of asphalt (standard EN 12697-12, method B) requires that water sensitivity be determined with an asphalt mixture according to the mix design in an indirect tensile strength test in which the saturation level of specimens stored in water is approximately 100% and the saturation level of the reference specimens is approximately 0%. This causes a systematic error in the water sensitivity value, due to which all water sensitivity results determined using this method are incorrect.

The indirect tensile strengths of the study specimens and the reference specimens should be studied at the same saturation level, which should correspond to the situation in which the study specimens stored in water are damaged at the lowest loading. In order to improve the reliability of the water sensitivity test method, a study should be carried out that would determine:

- the effect of the saturation level of the specimens on the water sensitivity results,
- the target saturation level for the water sensitivity test
- a method for adjusting the saturation level of specimens in the water sensitivity test to the target level
- revising the water sensitivity requirements for asphalt pavements to correspond with the corrected method if testing of mixture according to the mix design is reinstated.

8.6.3 Improving the reliability of the freeze-thaw test

The Asfadur project developed two alternative methods for studying the freeze-thaw resistance of asphalt mixture. One of the alternatives (method A) was introduced into the study only at the last stages of the project. It reduces the duration of the water sensitivity test by some 50% compared to the freeze-thaw testing method alternative B mainly used in the study when automatic freeze-thaw equipment is used. The reference specimens for the project's freeze-thaw tests were split at a saturation level of 100% because the effect of a water-filled pore volume on the test results was not accounted for.

The freeze-thaw testing method PANK 4306 authored in the project should be used to study which of the included method alternatives (A or B) is better suited for determining the freeze-thaw resistance of asphalt. It would be worthwhile to try saline solutions in method B.

In connection with this method, the same instructions related to the saturation levels of specimens can probably be used in both freeze-thaw tests if such instructions are prepared for water sensitivity tests.

Information about the Asfadur project and PANK-4306 method in internet:

- www.liikennevirasto.fi/julkaisut, Research Report of the Finnish Transport Agency: Resistance of asphalt mixture to freeze-thaw-cycles and combined effect of water and loadings. (original report only in Finnish with abstract and summary in English: Asfalttimassan kestävyys jäätymis-sulamista sekä veden ja kuormien yhteisvaikutusta vastaan)

- www.pank.fi/, Method description PANK-4306, Resistance of asphalt mixture to freeze-thaw cycles (original method description only in Finnish: Asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyys).

Kirjallisuusviitteet

- [1] Talonrakennuksen routasuojausohjeet. Tampere 2007, VTT ja Rakennustieto Oy.
- [2] Kuula-Väisänen, P., Sähköpostiviesti 17.5.2010.
- [3] Blomberg, T., Sähköpostiviesti 16.3.2010.
- [4] SFS 5447 (1988). Betoni. Säilyvyys. Jäädytys-sulatuskestävyys.
- [5] SFS 5449 (1988). Betoni. Säilyvyys. Pakkas-suolakestävyys.
- [6] Kuosa H., Uudet pakkasenkestävyydestit tulevat. Espoo 2003, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.
- [7] Valenza, J., Scherer, G. A review of salt scaling: Phenomenology, Cement and concrete research 37 (2007) s. 1007 - 1021.
- [8] Testing of the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage. CEN/TR 15177:2006.
- [9] Betoninormit 2004. Jyväskylä 2004, Suomen betoniyhdistys, by 50.
- [10] Determination frost susceptibility: Resistance to freezing and thawing of hydraulically bound mixtures. CEN TC227/ WG4/ TG5, N16, First draft 22.12.2008.
- [11] Jäädytys-sulatuskokeen testaus asfalttipäällysteen säänkestävyyden määrittämiseksi. Lemminkäinen Infra Oy, Keskuslaboratorio, Tutkimusselostus 09K1/1.9.2009.
- [12] Nordberg, Johan, Rolling bottle tests on Koskenkylä aggregate with Wetfix BE and Wetfix AP17 in Nynäs 70/100 bitumen. AkzoNobel, Surface Chemistry Ab, Asphalt Applications. Technical service report LR10012, 16.7.2010.
- [13] Johansson, Bo, Wetfix AP17, Trial report, Telko 6.10.2010.
- [14] Tartuketutkimus 2010. Tutkimusselostus VTT-R-01292-11/14.2.2011.
- [15] Alatyppö, V., Jauhiainen, P., Valtonen, J., Jäänsulatusaineita kestävä pällysteen kehittäminen. Espoo 2005, Teknillisen korkeakoulun julkaisu TKK-TIE-A58.
- [16] Helenelund, K. V., Maarakennusmekaniikka. Espoo 1974, TKY:n julkaisu 137.
- [17] Menetelmäkuvaus PANK-4306. Asfaltin jäätymis-sulamiskestävyys. Helsinki 2011, PANK ry.

SMA 16/ Koskenkylä massakoostumus jäätymis-sulamiskokeissa

Destia Oy:n valmistamat näytteet jäätymis-sulamiskokeisiin

DESTIA

Pvm:
20.08.2008
Nimi:
Sami Similä

ASFALTIN SUHTEITUS

Työmaa: SMA16 Koskenkylä Säänkestävyydetkimus

Bitumimäärä [%]: 6.0

Lajitteet

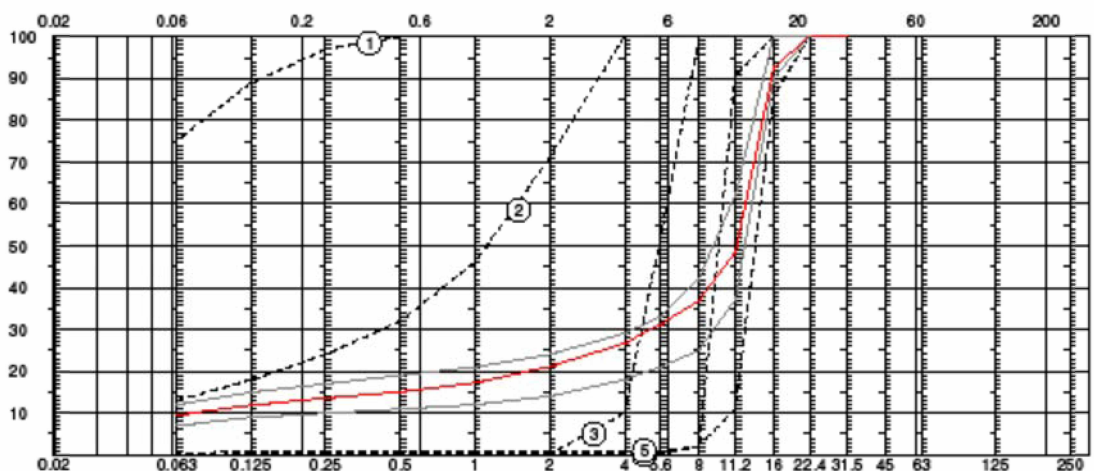
Lajite 1 KF, Sipoo
Lajite 2 CUT 0/4 Koskenkylä
Lajite 3 CUT 4/8 Koskenkylä
Lajite 4 CUT 8/11 Koskenkylä
Lajite 5 KaM 11/16 Koskenkylä

Massa: SMA 16
Bitumityyppi: B 50/70
Suhteitus -%
9.0 %
15.5 %
10.5 %
7.0 %
58.0 %

Seula	Tulos	Sall. ero	
[mm]	Läp.-%	Massa	Tie
31.5	100.0		
22.4	100.0		
16	92.4	-8 - +5	
11.2	48.3		
8	36.8	± 7	± 6
5.6	31.1		
4	26.6		
2	21.1	± 6	± 4
1	17.2		
0.5	15.1	± 4	± 3
0.25	13.6		
0.125	11.9		
0.063	9.5	± 2	± 2

Kuitu -% EKI-12 0,3 %

Kommentti:
RNO 89-08



SMA 16/ Koskenkylä massakoostumus jäätymis-sulamiskokeissa



Pvm:
20.08.2008
Nimi:
Sami Similä

ASFALTIN SUHTEITUS

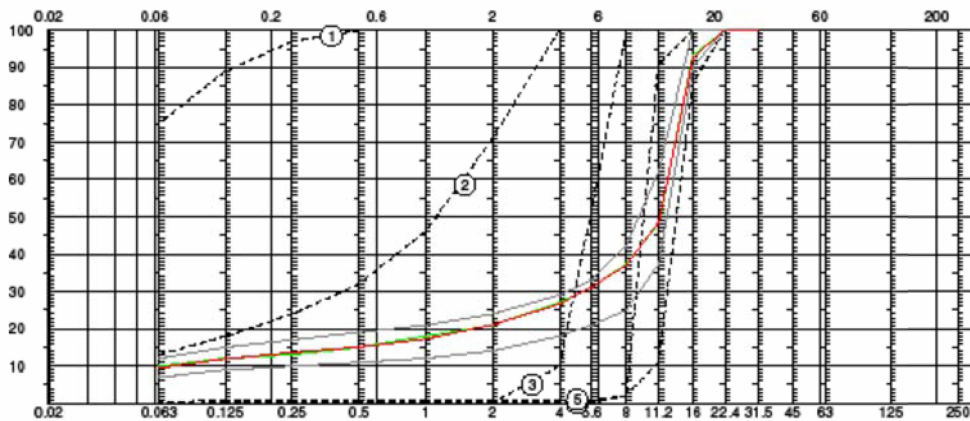
Työmaa: SMA16 Koskenkylä Sääkestävyytutkimus
Bitumimäärä[%]: 6.0

Lajitteet

Lajite 1 KF, Sipoo
Lajite 2 CUT 0/4 Koskenkylä
Lajite 3 CUT 4/8 Koskenkylä
Lajite 4 CUT 8/11 Koskenkylä
Lajite 5 KaM 11/16 Koskenkylä

Suhteitus -%
9.0 %
15.5 %
10.5 %
7.0 %
58.0 %

Laj.	KF, Sip	CUT 0/4	CUT 4/8	CUT 8/11	KaM 11/16	Tav.	Tulos	Ero	Hieron.
Prosentti	9.0 %	15.5 %	10.5 %	7.0 %	58.0 %				
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0
22.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0
16	100.0	100.0	100.0	100.0	86.0	93.0	92.4	0.6	0.5
11.2	100.0	100.0	100.0	91.0	11.0	48.0	48.3	-0.3	0.5
8	100.0	100.0	100.0	2.0	2.0	37.0	36.8	0.2	0.5
5.6	100.0	100.0	52.0	0.2	1.0	31.0	31.1	-0.1	0.5
4	100.0	100.0	10.0	0.2	1.0	27.0	26.6	0.4	0.5
2	100.0	71.0	0.1	0.2	1.0	21.0	21.1	-0.1	0.5
1	100.0	46.0	0.1	0.2	1.0	18.0	17.2	0.8	0.5
0.5	100.0	32.0	0.1	0.2	1.0	15.0	15.1	-0.1	0.5
0.25	97.0	24.0	0.1	0.2	1.0	13.0	13.6	-0.6	0.5
0.125	89.0	18.0	0.1	0.2	1.0	12.0	11.9	0.1	0.5
0.063	75.2	13.1	0.1	0.1	0.3	10.0	9.5	0.5	0.5



Copyright © Cuzze Ltd, licence: Destia

Allekirjoitus: _____

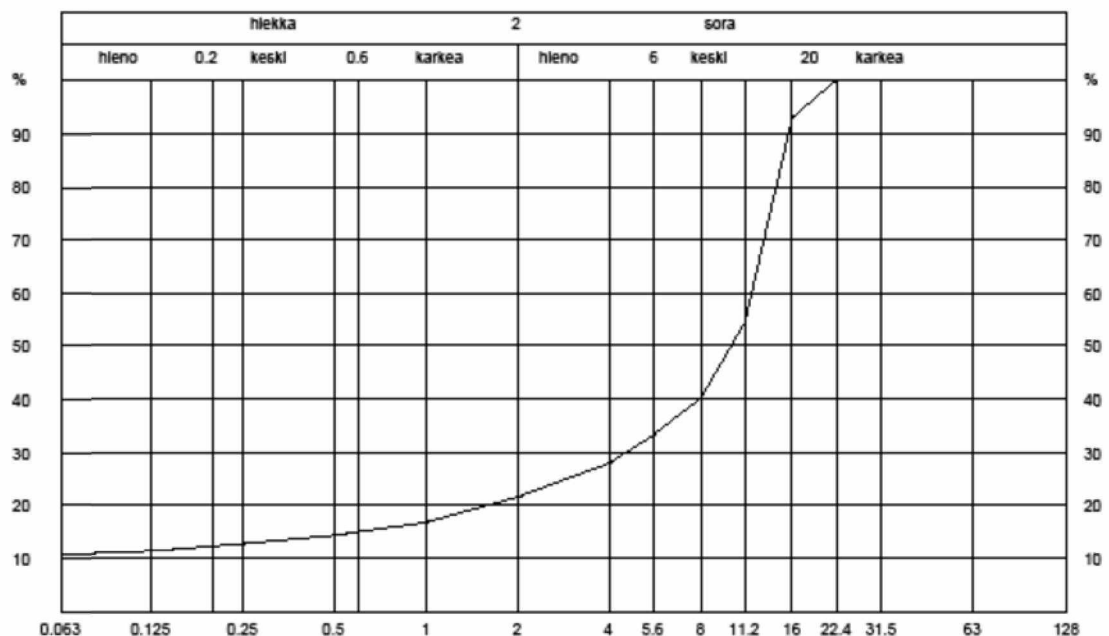
Koskenkylän kiviaineksen 0/16 mm rakeisuus



Näytetutkimustulokset

PANK-hyväksytty testausorganisaatio

SMA16	Side-%	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	11.2	16	22.4
Kpl	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Keskiarvo	5,92	10,71	11,49	12,94	14,44	16,94	21,66	28,02	33,23	40,07	54,22	92,91	100,00
Keskihajonta	0,16	0,60	0,64	0,70	0,83	0,86	1,16	1,83	2,32	2,37	3,08	1,80	0,00
Polkkeamat Kpl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Polkkeamat %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94	0,00	0,00	0,00
TMP-%	2,62	1,65	0,00	0,00	0,17	0,00	0,19	0,00	0,00	10,82	0,00	0,00	0,00
Alaohjearvo	5,60	8,00			12,00		17,00			31,00			
Yläohjearvo	6,40	12,00			18,00		25,00			43,00			
Ylitys kpl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ylitys %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lask. ohje	6,00	10,00			15,00		21,00			37,00			
Ohjearvo	6,00	10,00			15,00		21,00			37,00			



Tulos koskee vain testattua näytettä

Destia Oy / Espoon laboratorio
 Turuntie 207
 02740 Espoo
 etunimi.sukunimi@destia.fi
 040 - 776 1754

Tutkija:

SMA 16/ Patavuori massakoostumus jäätymis-sulamiskokeissa

Lemminkäinen Infra Oy:n valmistamat näytteet jäätymis-sulamiskokeisiin

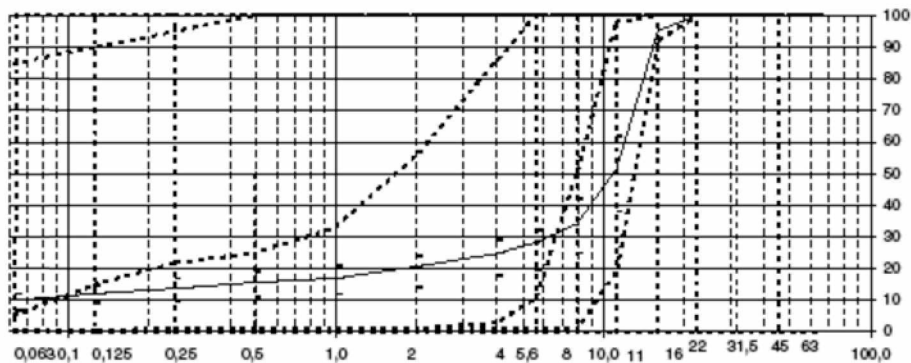
SUHTEITUS
02.03.09



LEMMINKÄINEN
INFRA

Keskuslaboratorio

Päälyste:		SMA16					Jäätymis-sulatus				
Asf.asema:		Laboratorio							Projektinumero:		
Sideaine:		B5070	5,6	%					8K15		
Täytejauhe:		KF	9,0	%							
Lisäaine:		Kuitu	0,35	%							
Kivianekset:		Patavuori									
OHJEU											
Numero									Bitumi	Alaraja	Yläraja
Nimi		KF	KaM5/5	KaM5/11	KaM11/16				Ohje		
Tiheys		2700	2980	2980	2980	2700	2700	2700			
% -osuudet		9	16	14	61				Suhteet	alaraja	yläraja
0,063		85	6	1	1				10		
0,125		90	15	1	1				12		
0,25		95	22	1	1				14		
0,5		100	25	1	1				16		
1		100	33	1	1				17		
2		100	56	1	1				21		
4		100	86	3	1				25		
5,6		100	100	11	1				28		
8		100	100	51	1				34		
11,2		100	100	98	19				51		
16		100	100	100	92				95		
22,4		100	100	100	100				100		
31,5		100	100	100	100				100		
45		100	100	100	100				100		
63		100	100	100	100				100		



Kuvaajassa ohjealue		2		Kuvaajassa normialue	
Lisätietoja					
Tehnyt:		Tarkastanut:			
LEMMINKÄINEN INFRA OY		Posti		Puh.no 02071 5000	
Keskuslaboratorio		PL 10		Fax no 02071 53915	
Sammonmäki Tuusula		04361 TUUSULA		Internet www.lemminkainen.fi	

VTT:n automaattinen jäädytys-sulatuslaite



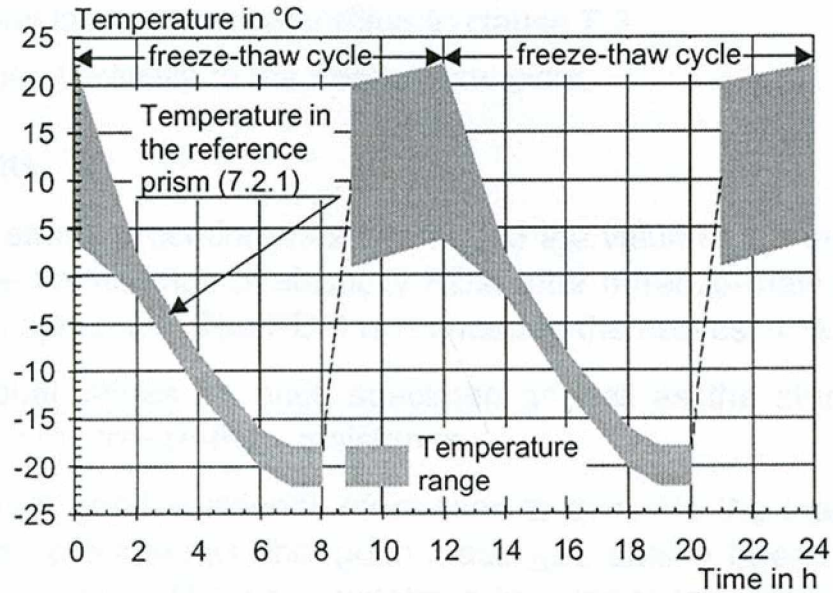
Kuva 57. Jäädytys-sulatuslaitteen näyteallas ja ohjausyksikkö. (syklien ohjaus automatiikalla PC:n avulla).



Kuva 58. Jäädytys-sulatuslaitteen ulkoinen vesisäiliö varusteineen.

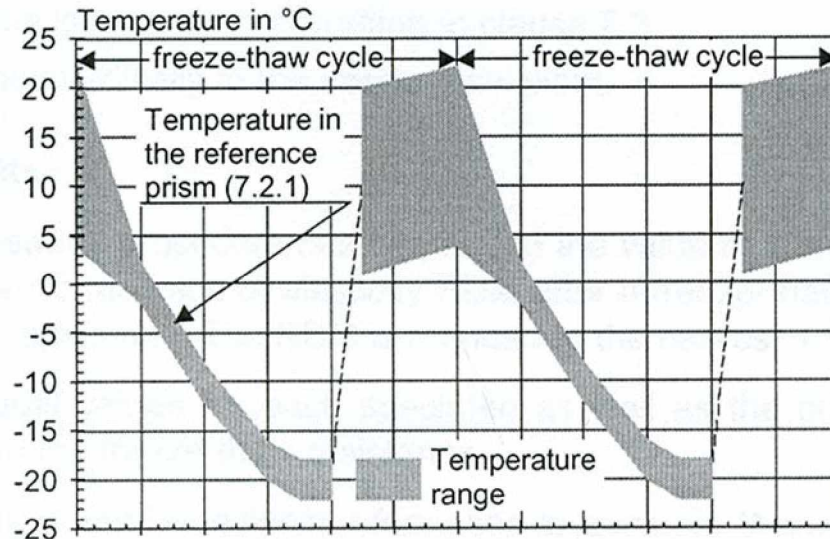
Asfalttinäytteen lämpötila jäätymis-sulamissykliä aikana

(Lämpötilan ohjealue projektin loppuvaiheessa)



Kuva 59.

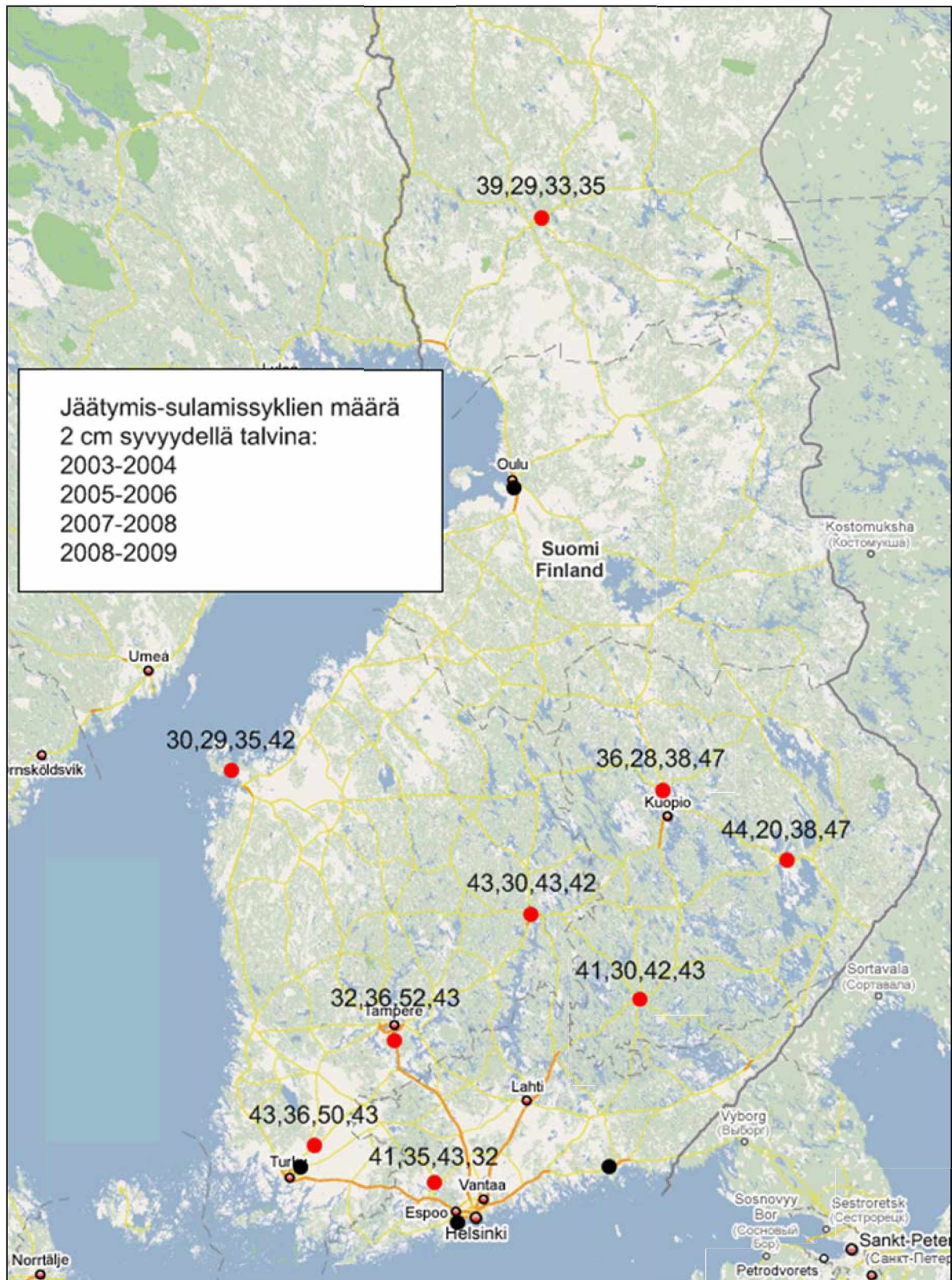
Jäätymis-sulamiskokeen näytteiden lämpötilan sallittu vaihteluväli syklien aikana näytteen keskeltä mitattuna, kun syklin pituus on 12 h. (menetelmän CEN/TR 15177:2006-06 mukainen lämpötila).



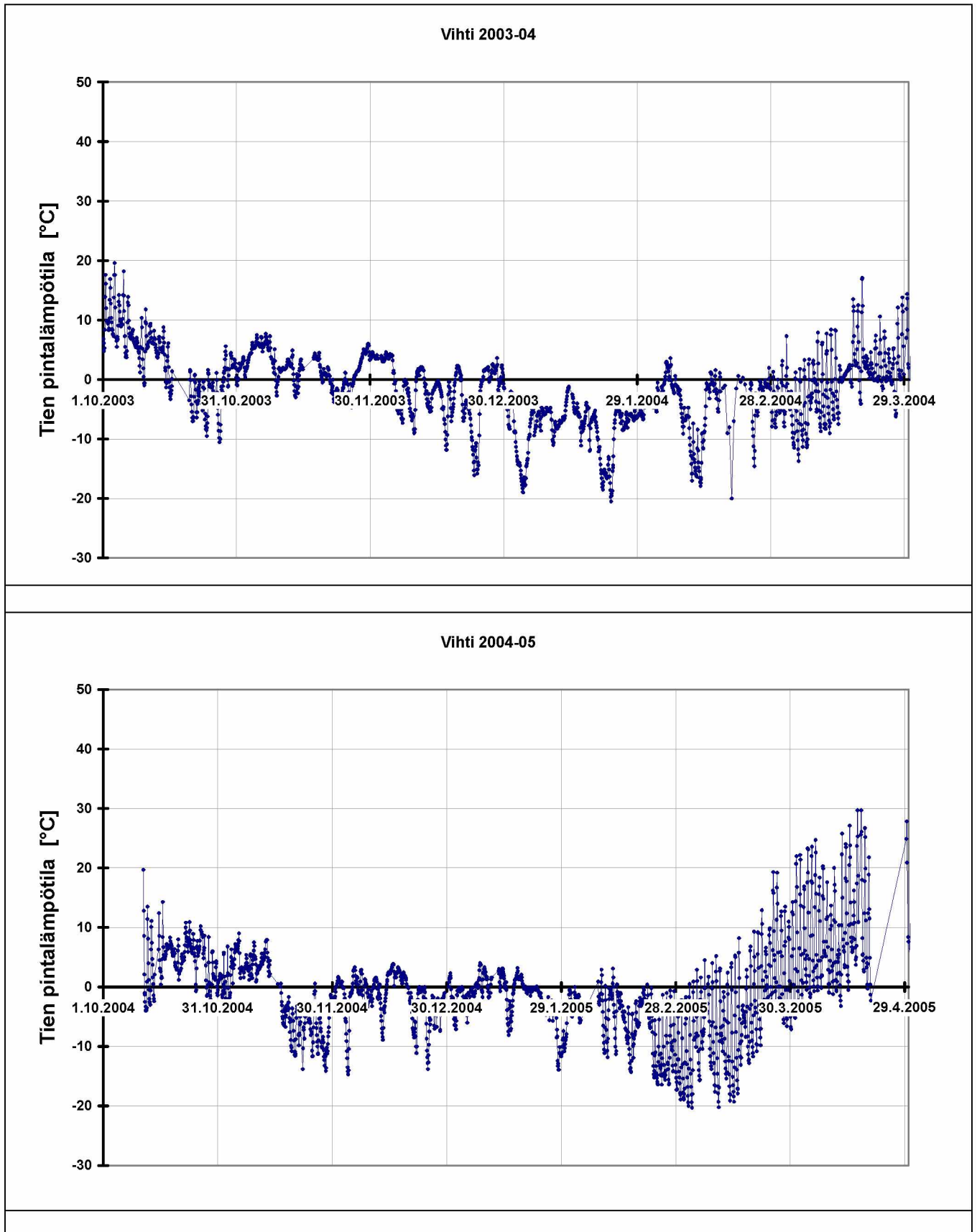
Kuva 60.

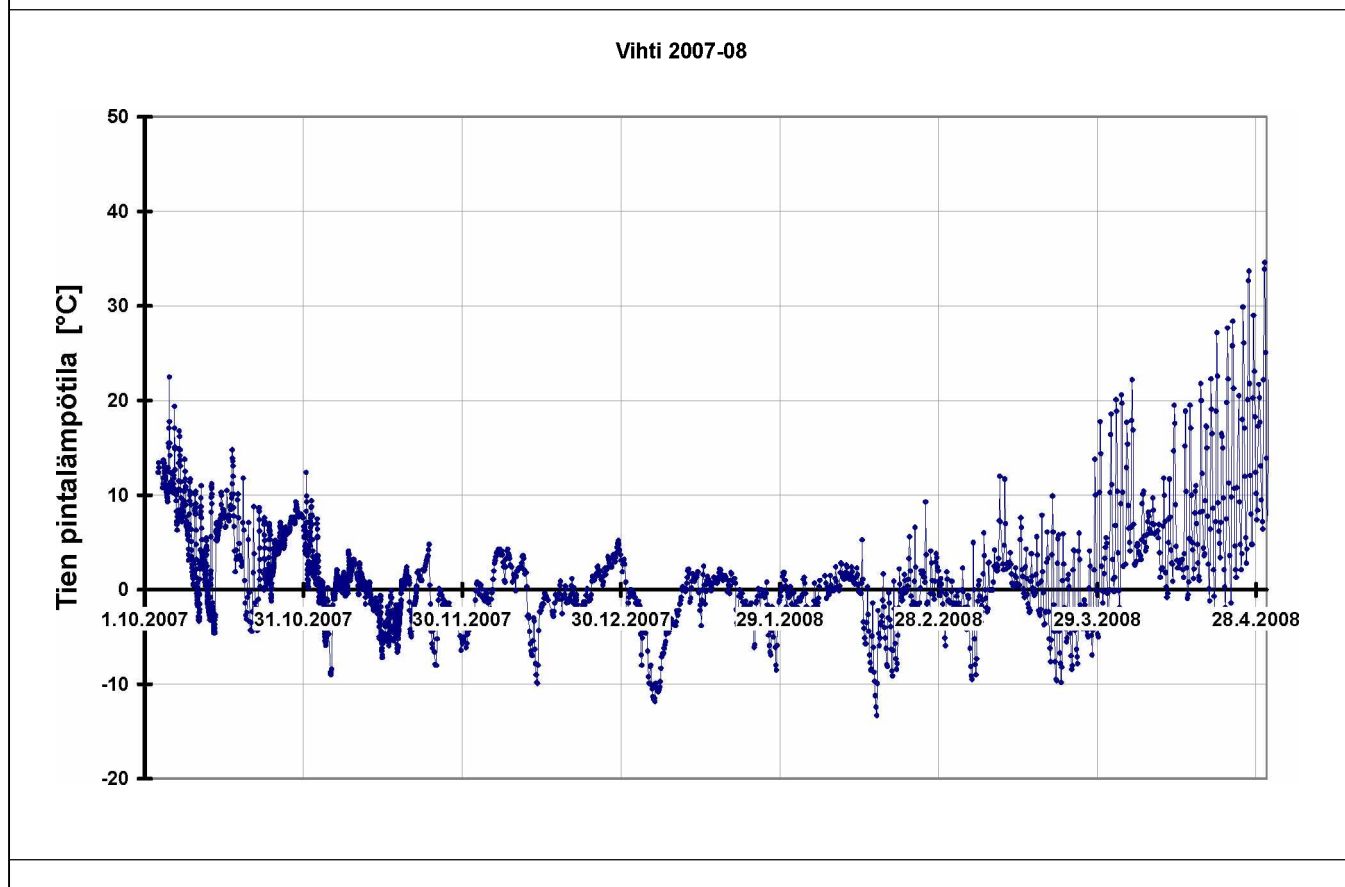
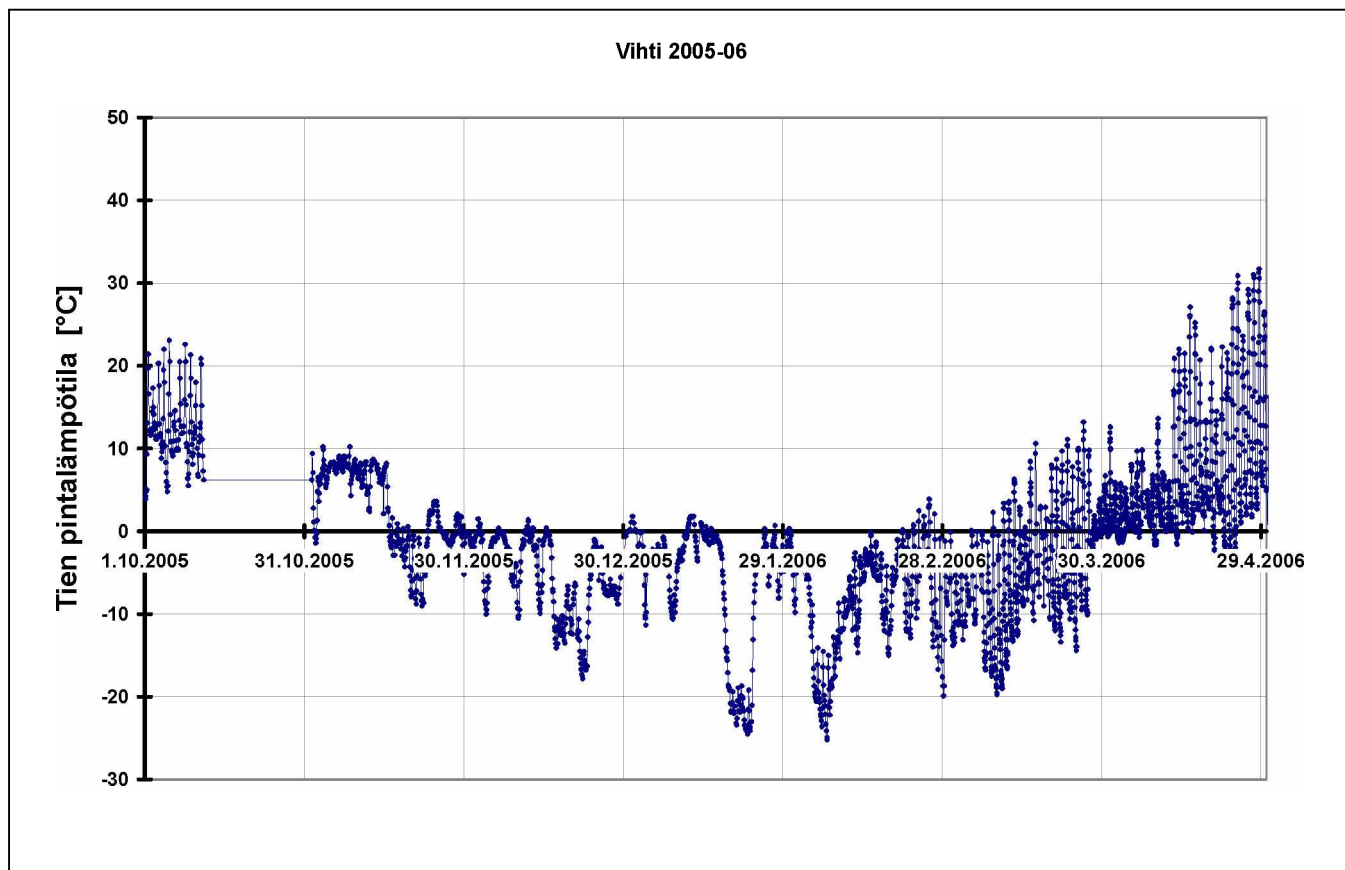
Jäätymis-sulamiskokeen näytteiden lämpötilan sallittu vaihteluväli syklien aikana näytteen keskeltä mitattuna, kun syklin pituus on 24 h. (modifioitu menetelmästä CEN/TR 15177:2006-06).

Tiesääasemat jäätymis-sulamissyklien laskennassa

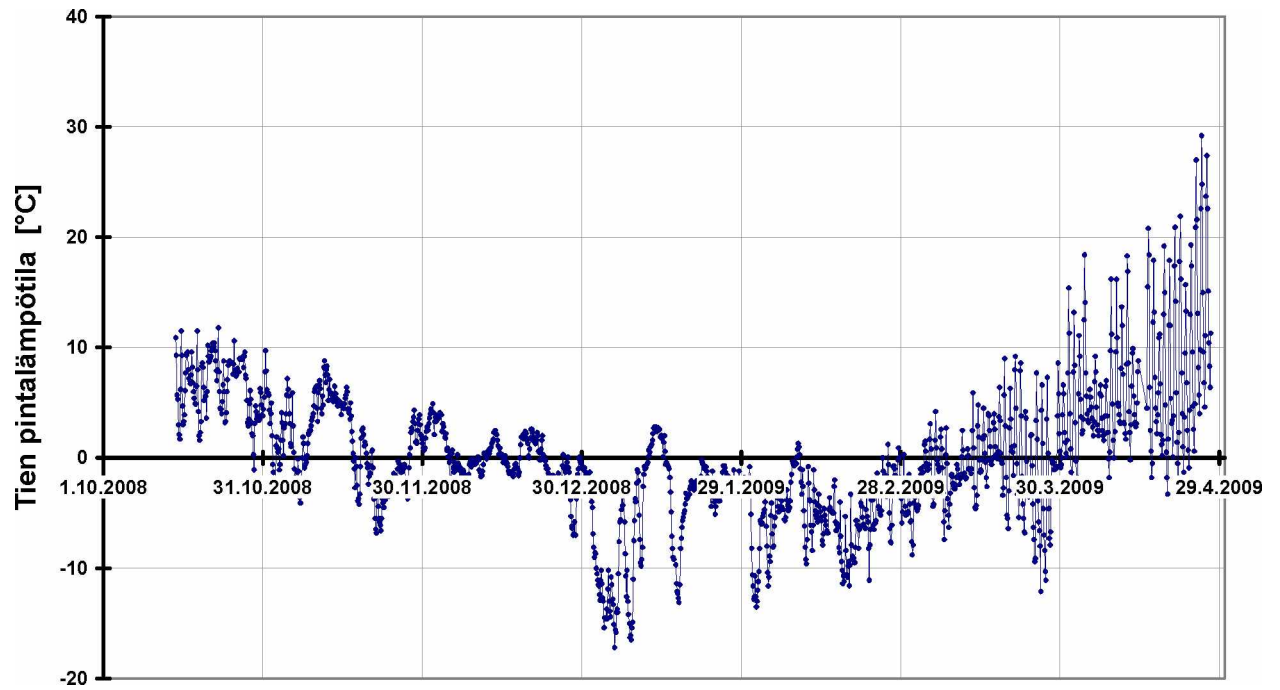


Asfaltin pintalämpötiloja v. 2003-09 tiesääasemilla

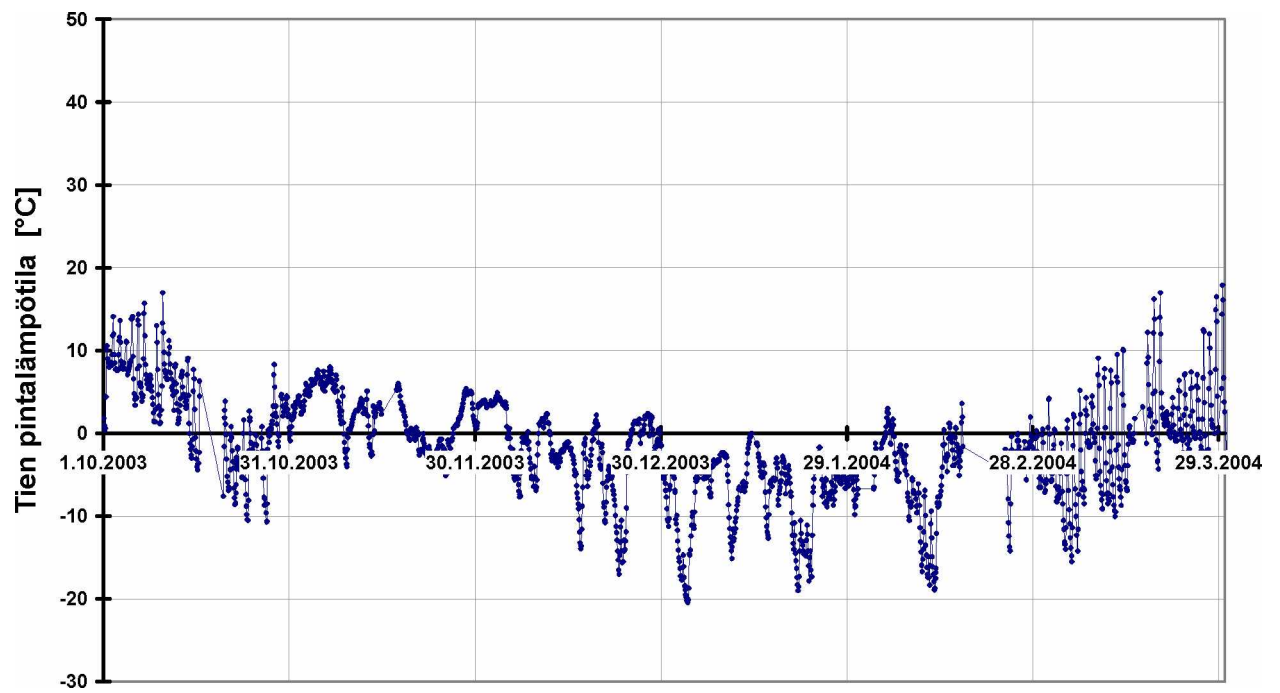




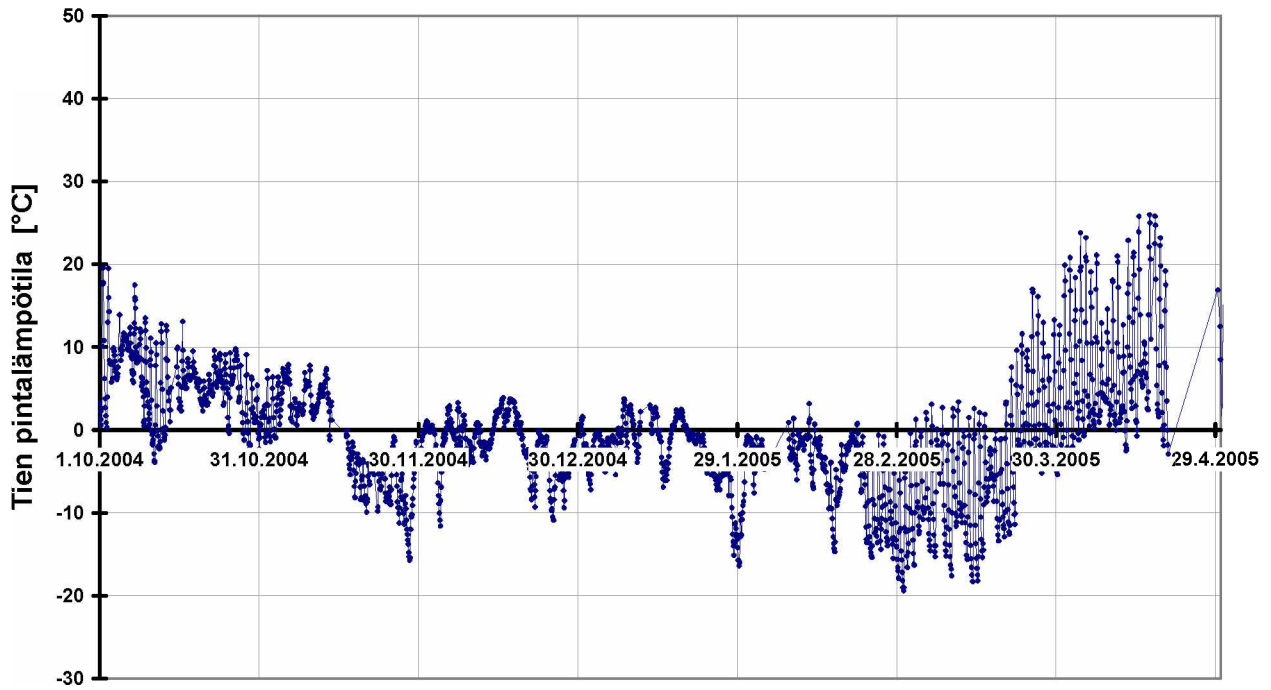
Vihti 2008-09



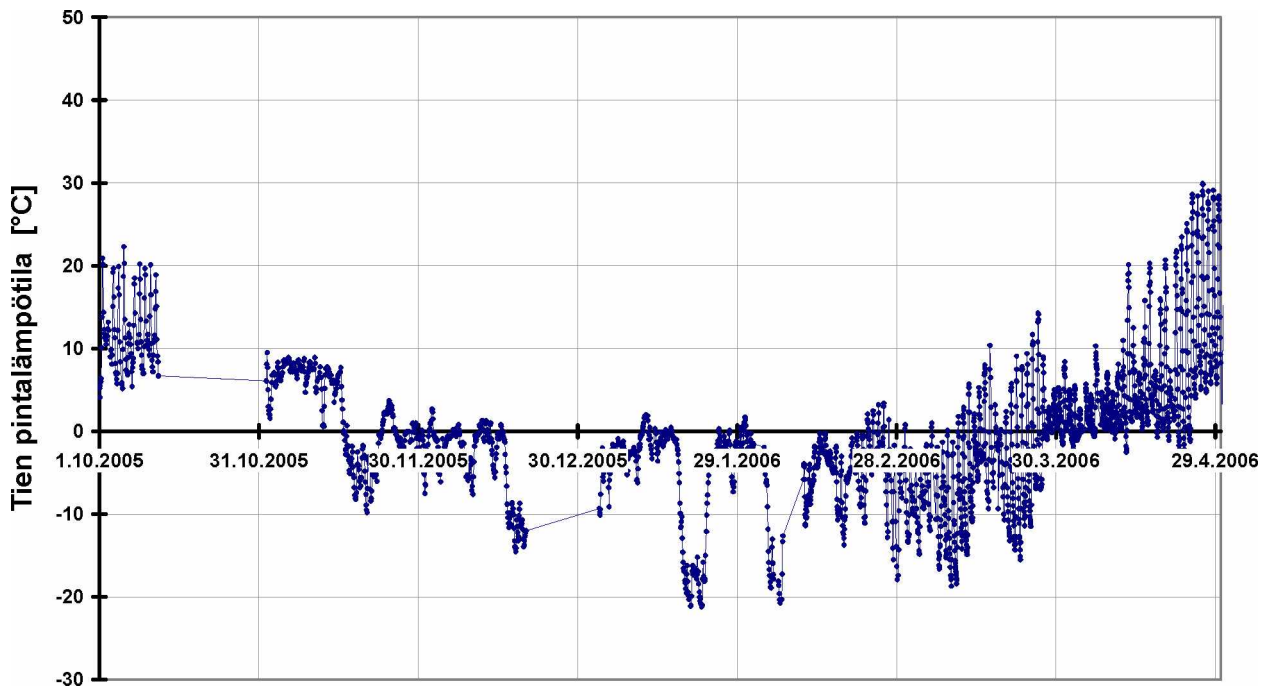
Aura 2003-04

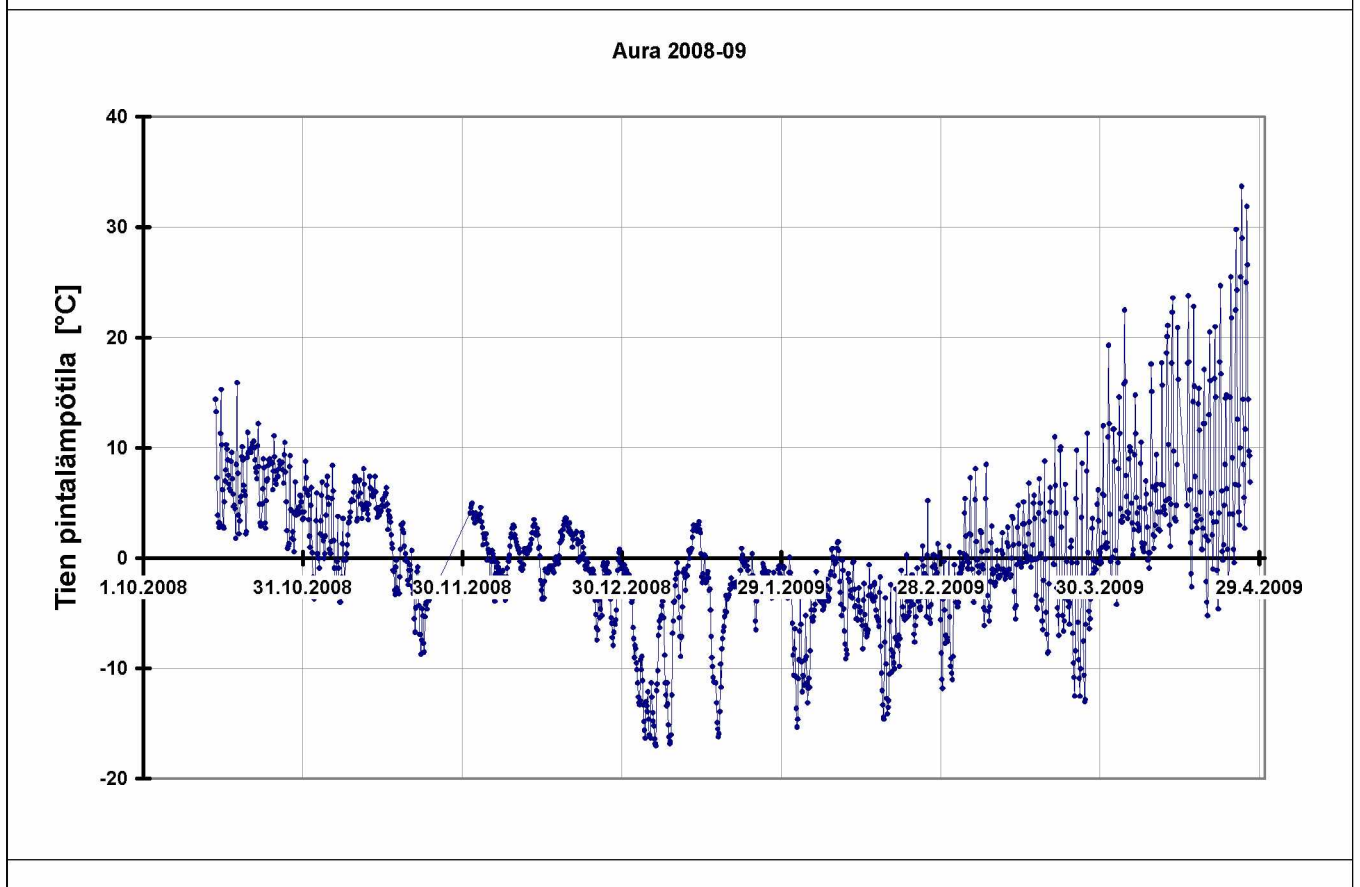
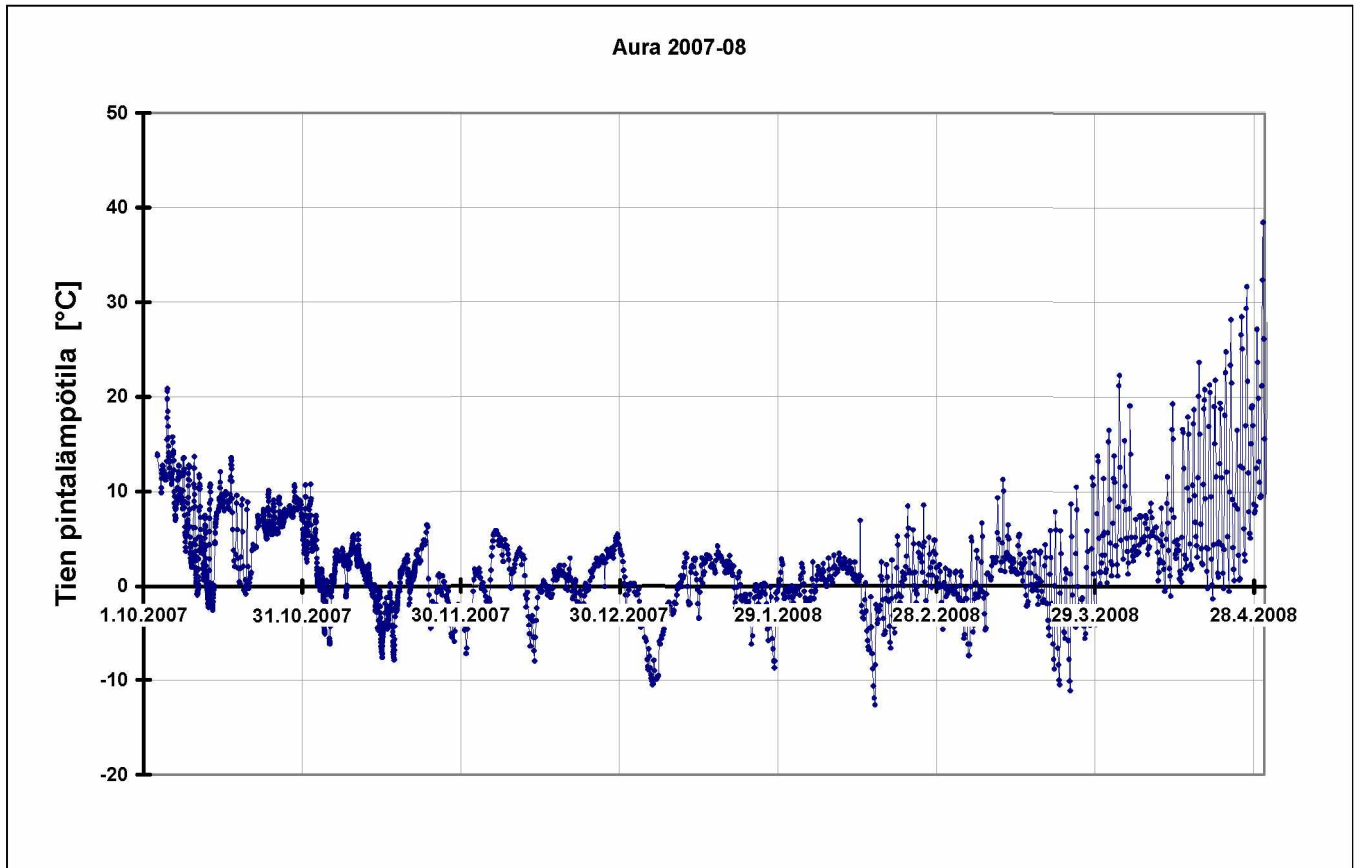


Aura 2004-05

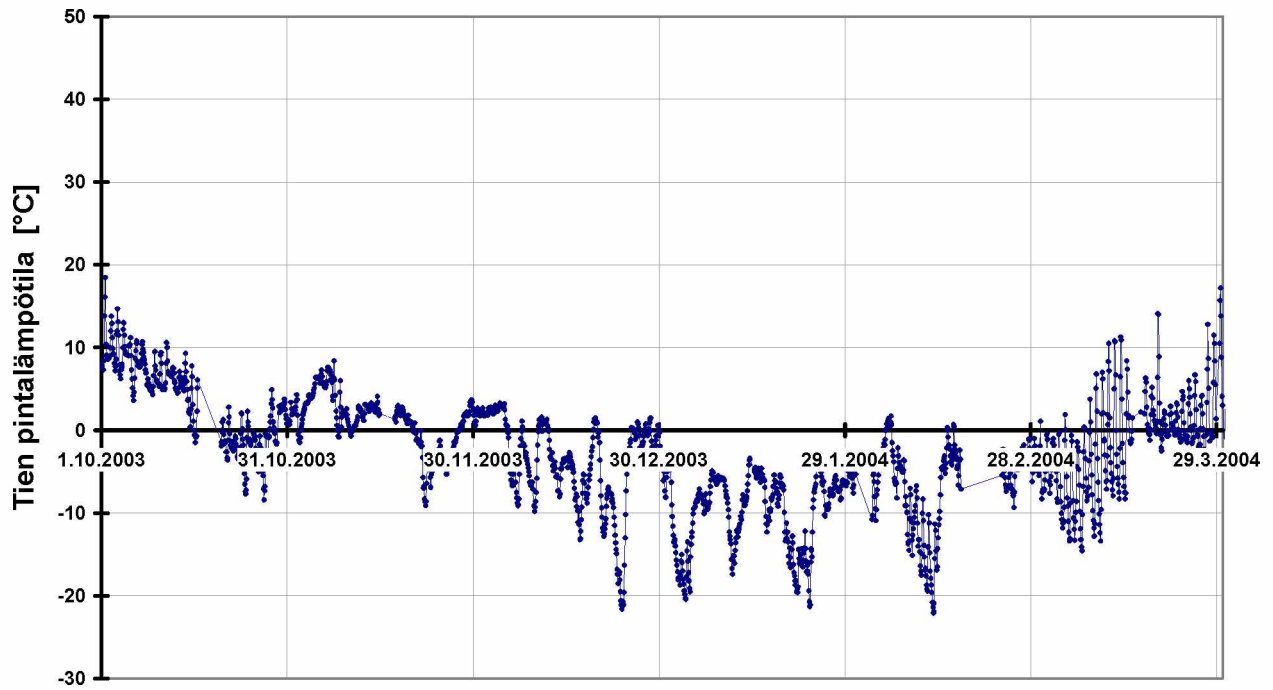


Aura 2005-06

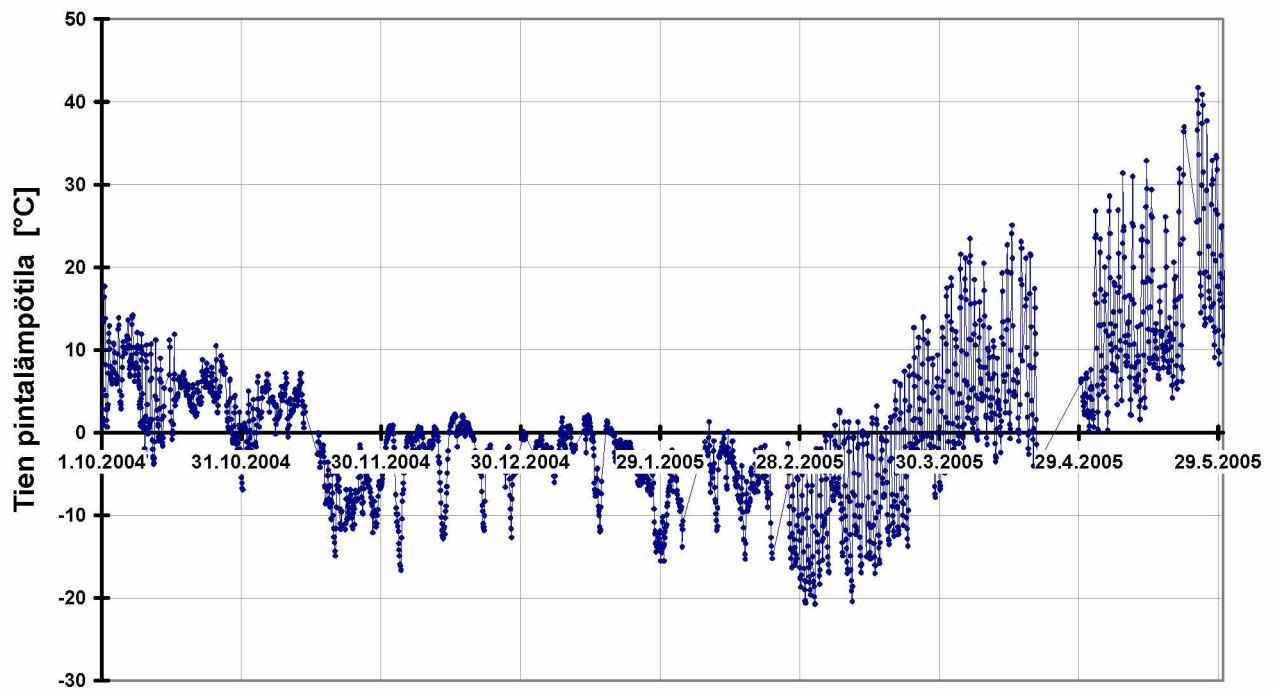




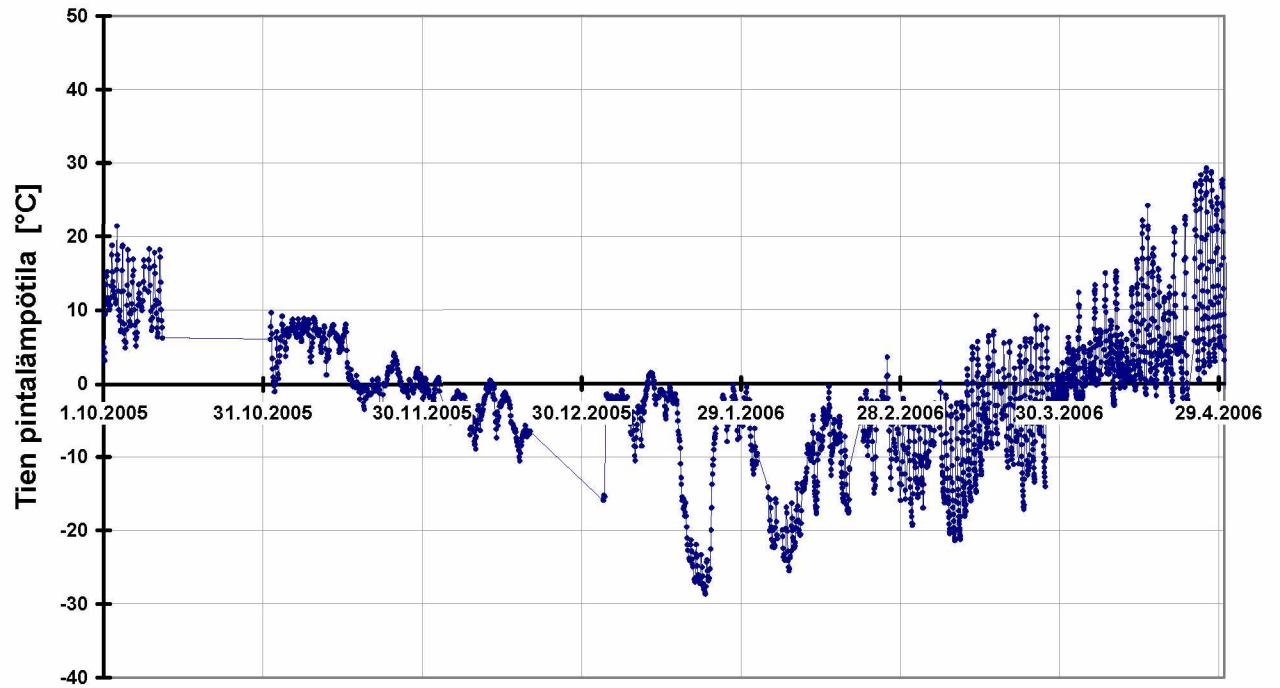
Mikkeli 2003-04



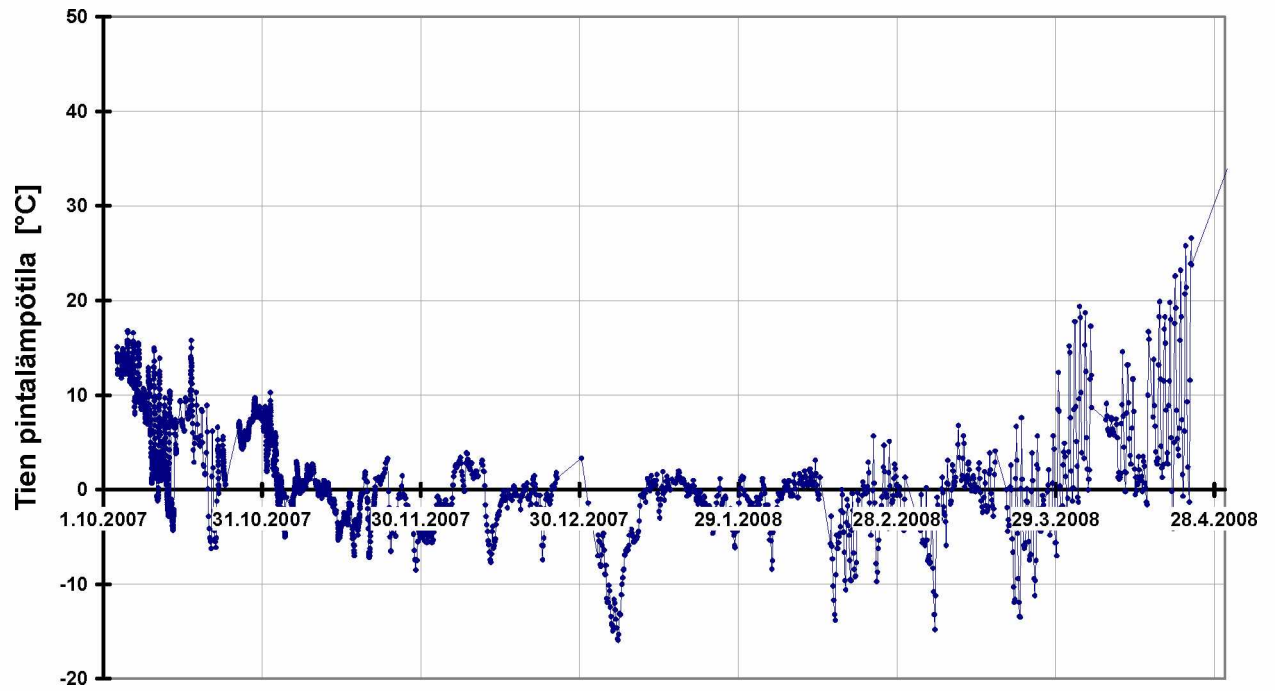
Mikkeli 2004-05



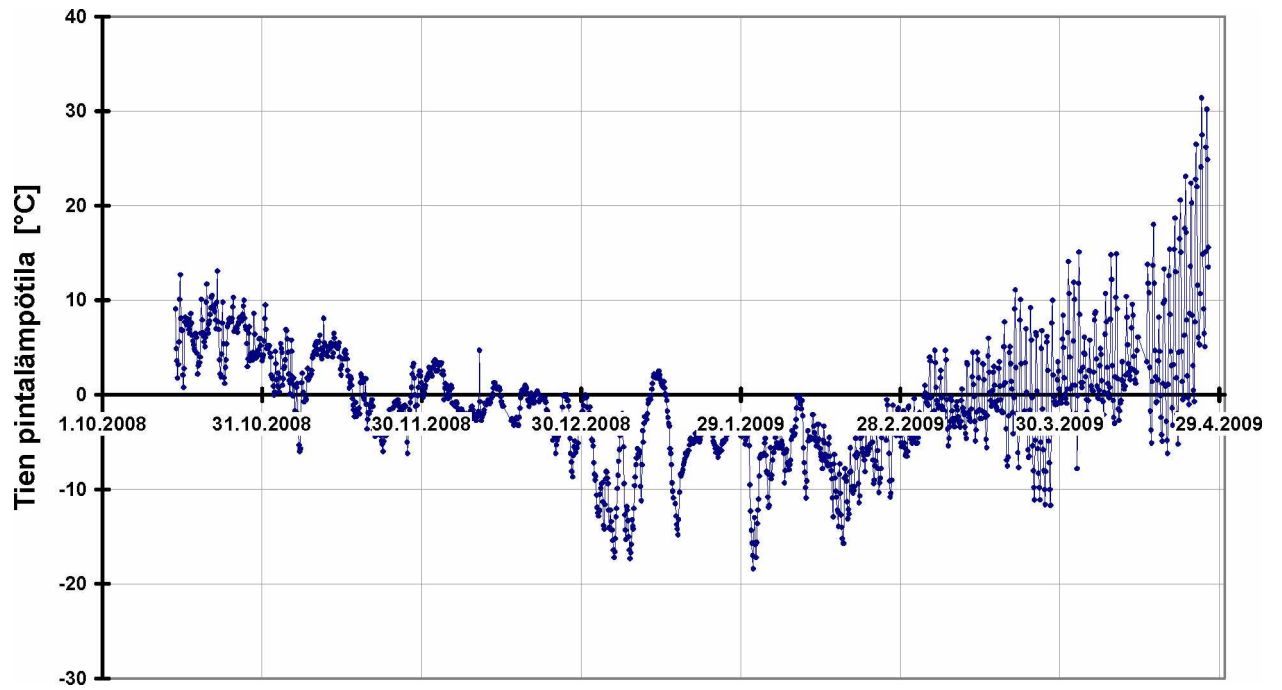
Mikkeli 2005-06



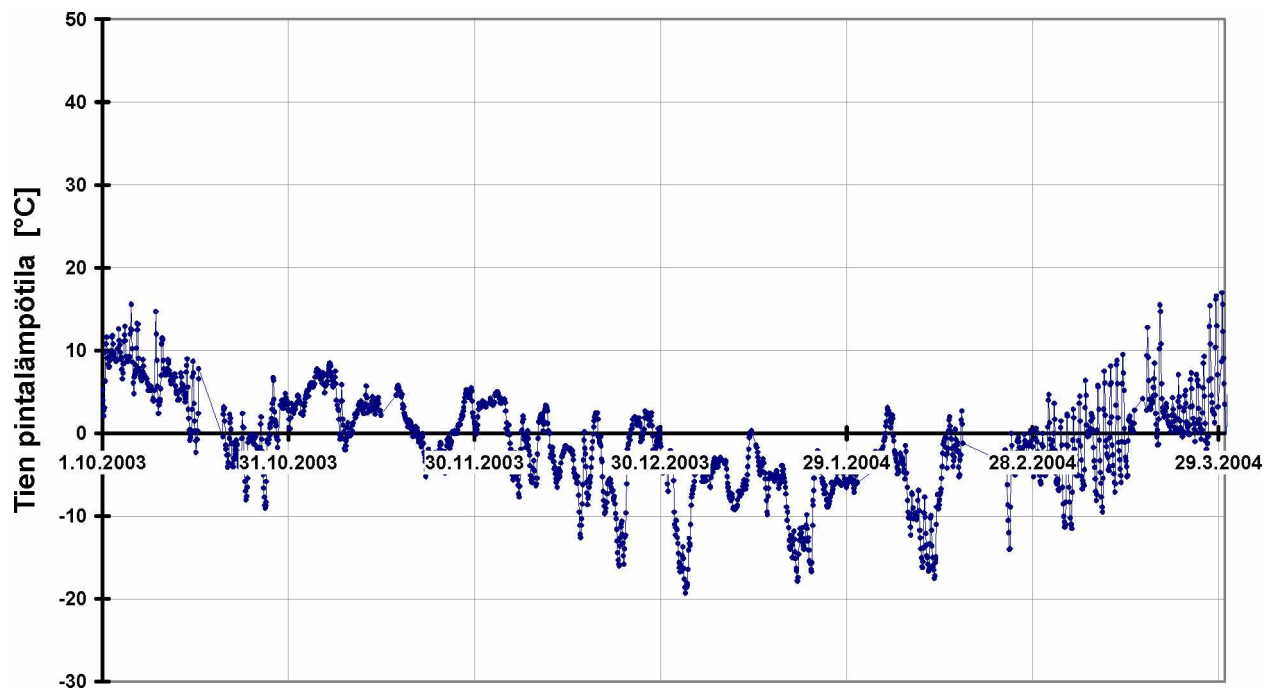
Mikkeli 2007-08



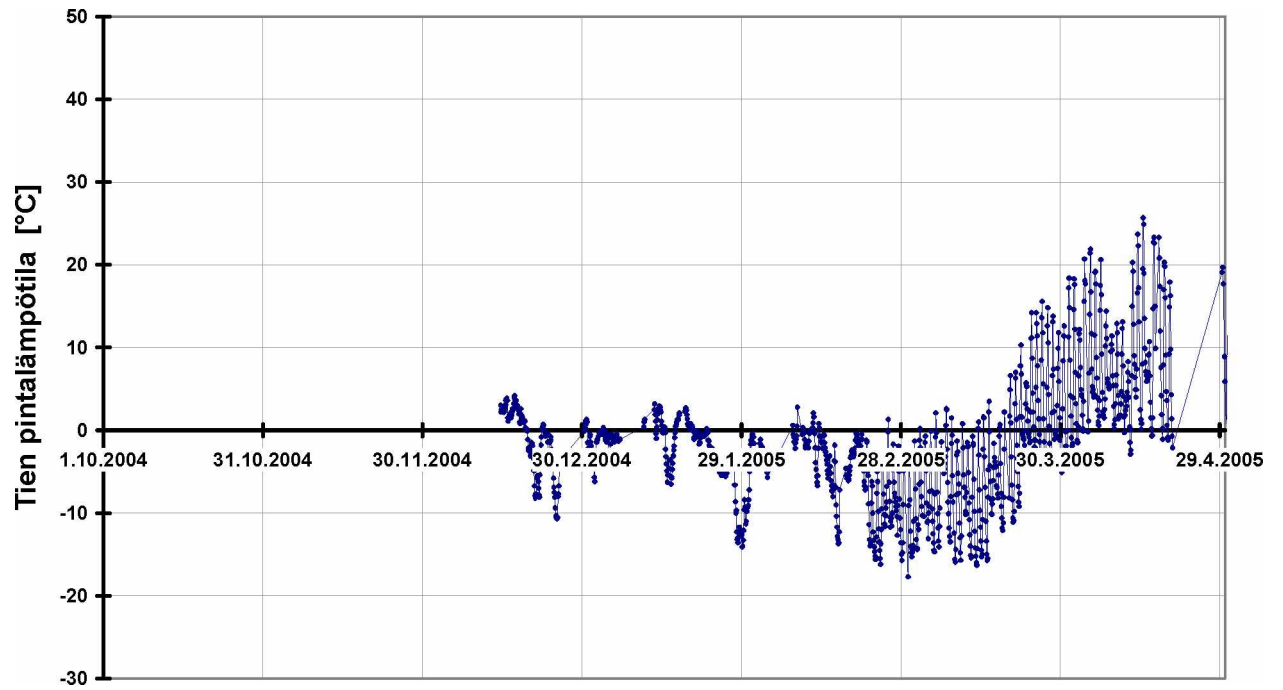
Mikkeli 2008-09



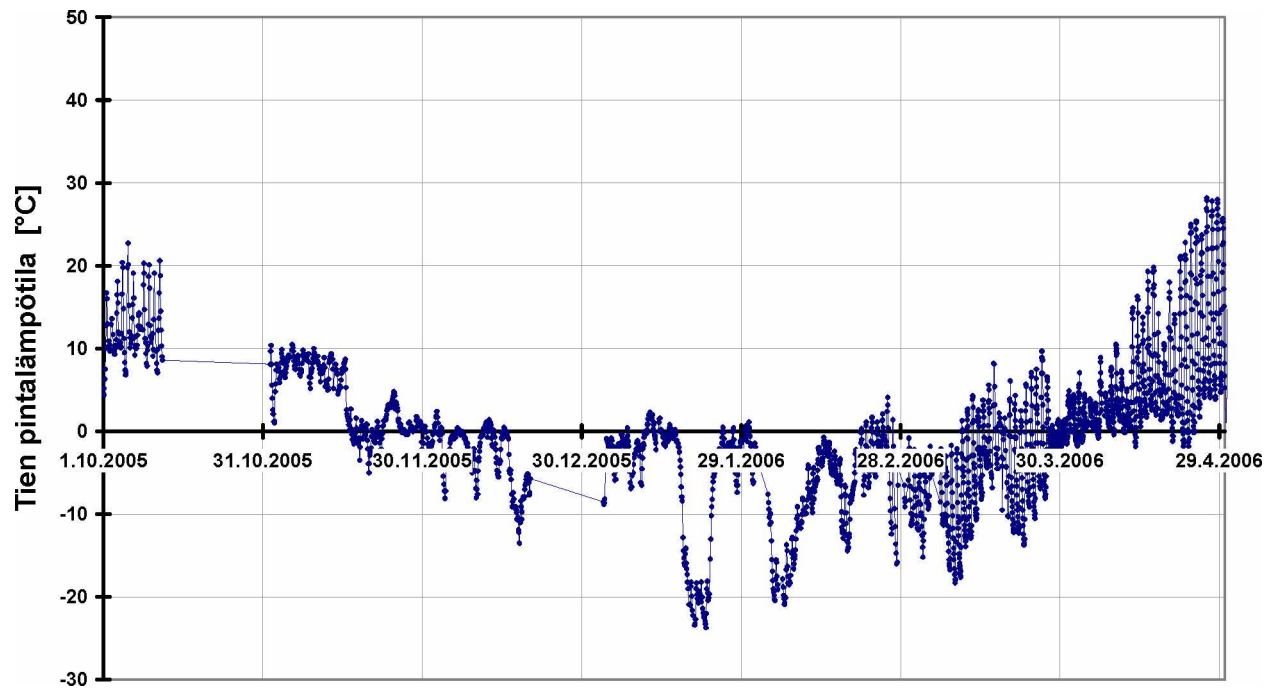
Tampere 2003-04



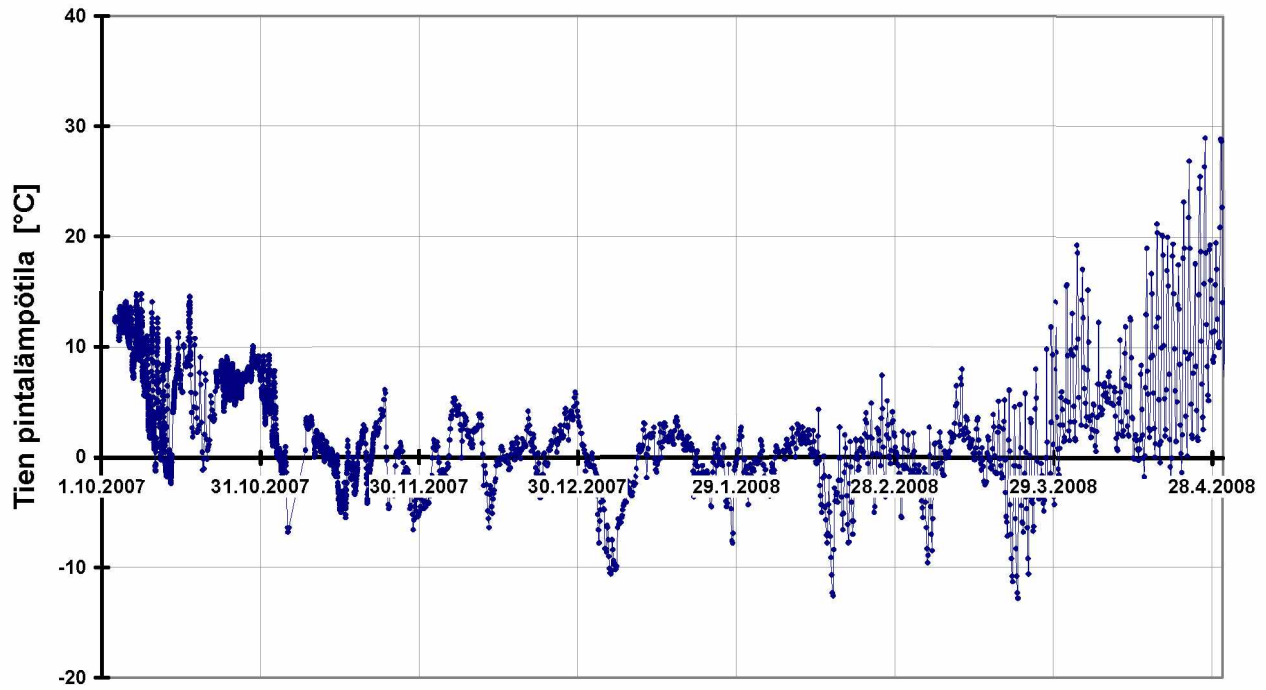
Tampere 2004-05



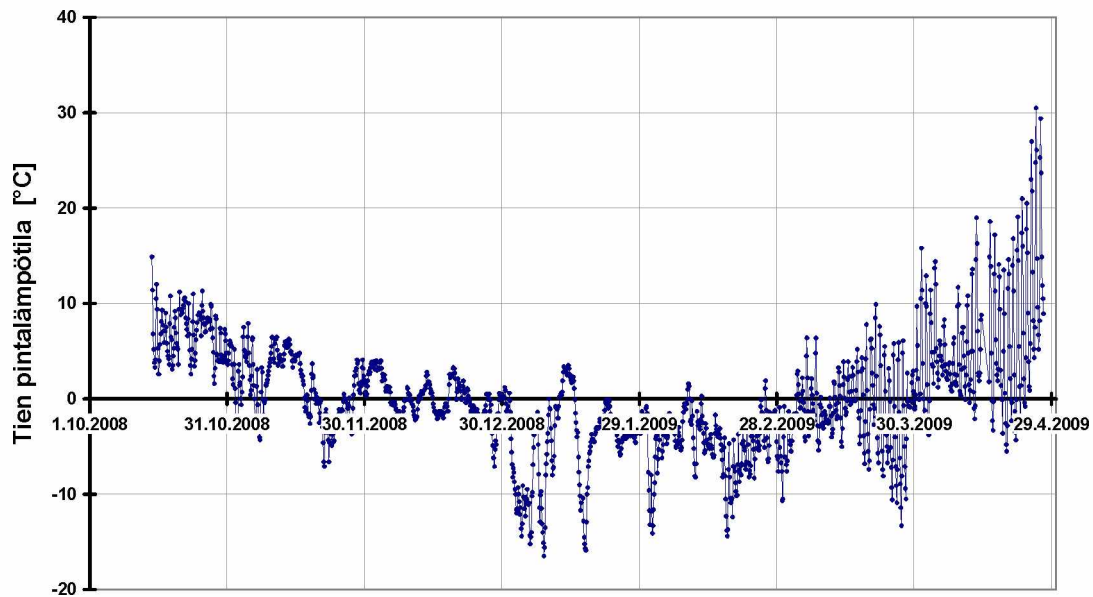
Tampere 2005-06



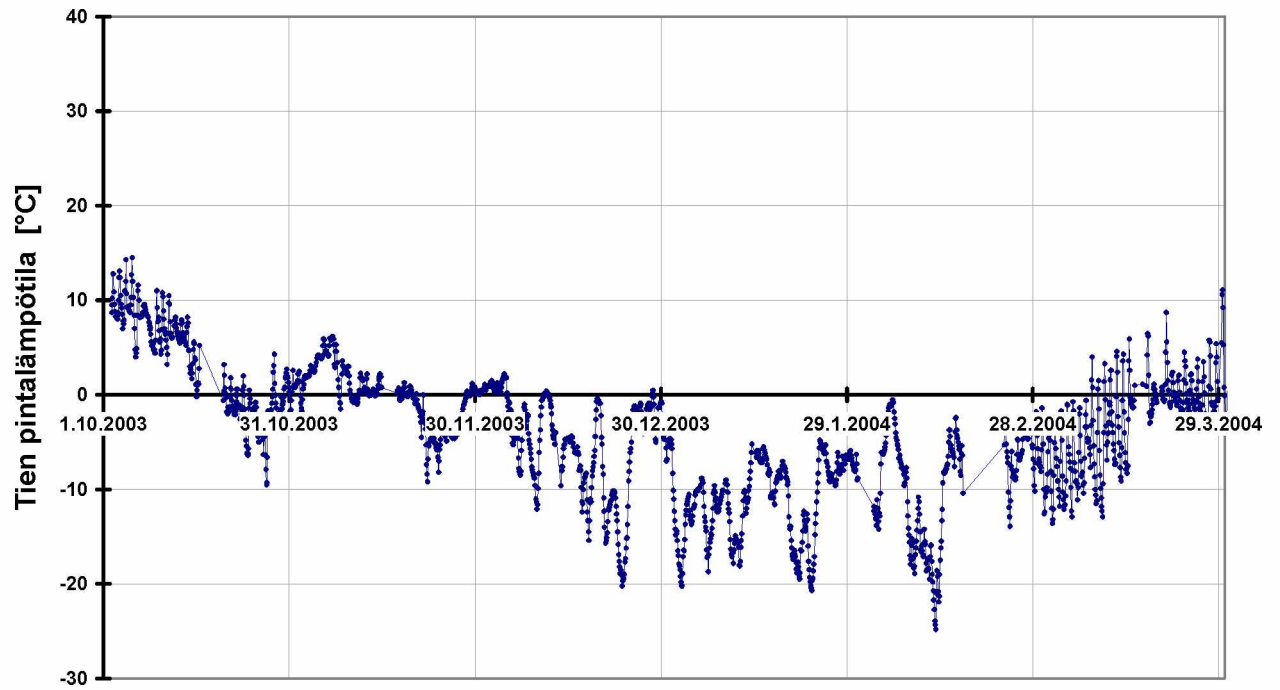
Tampere 2007-08



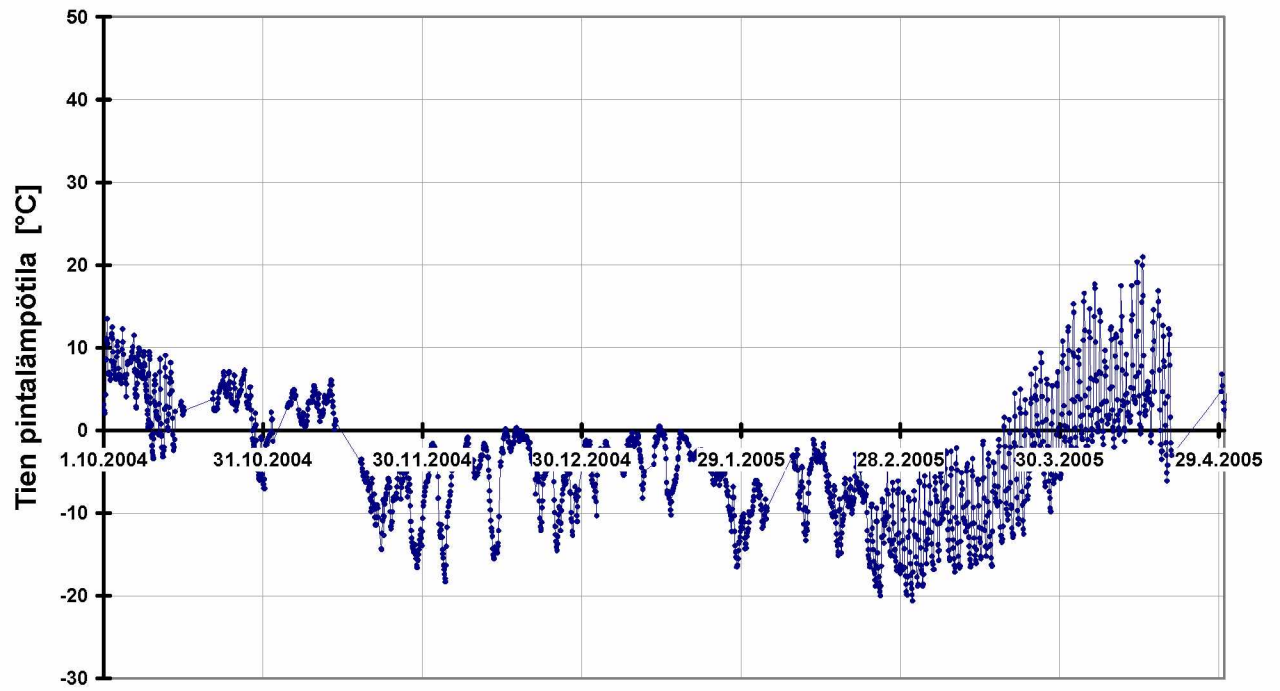
Tampere 2008-09

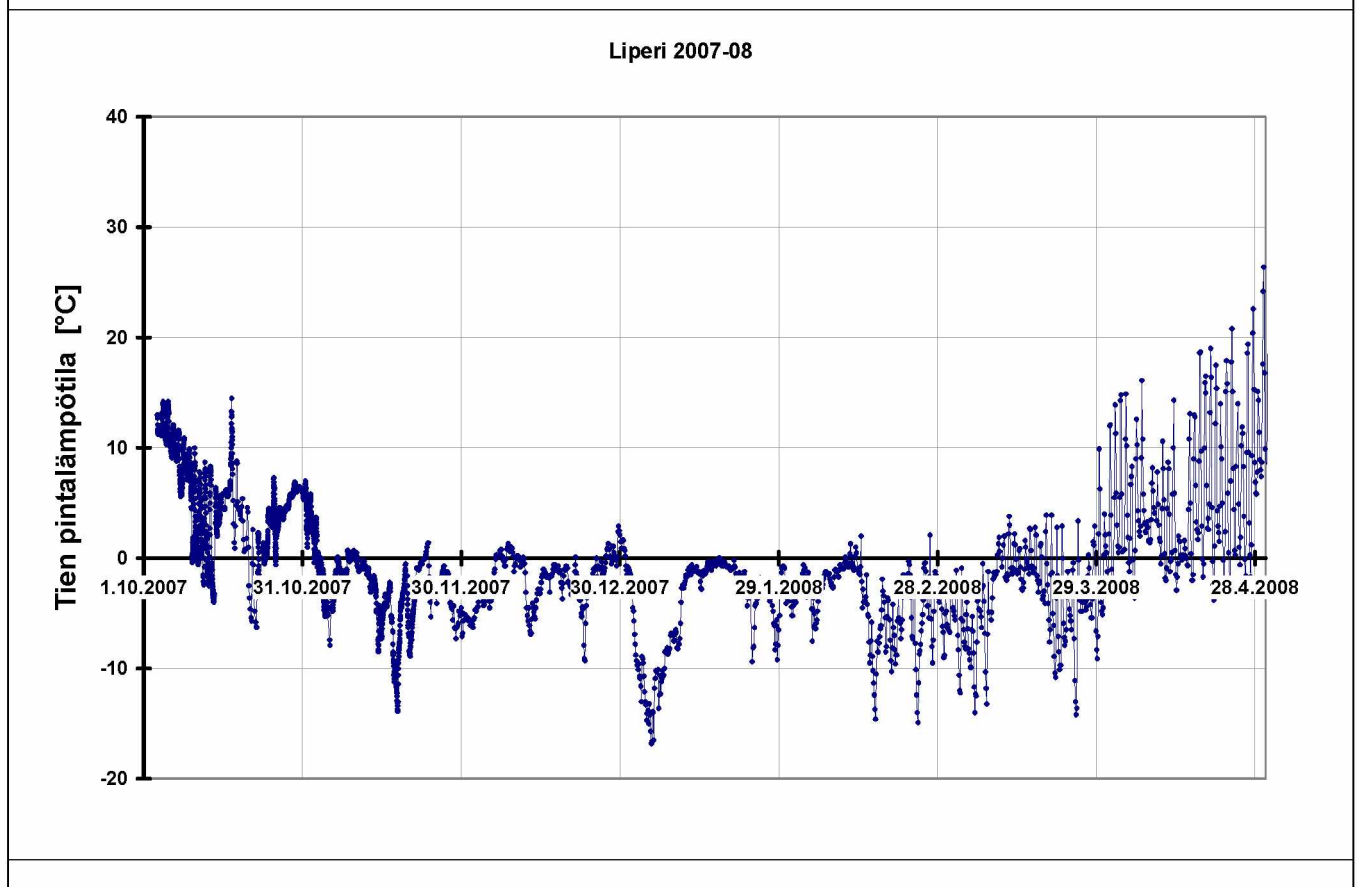
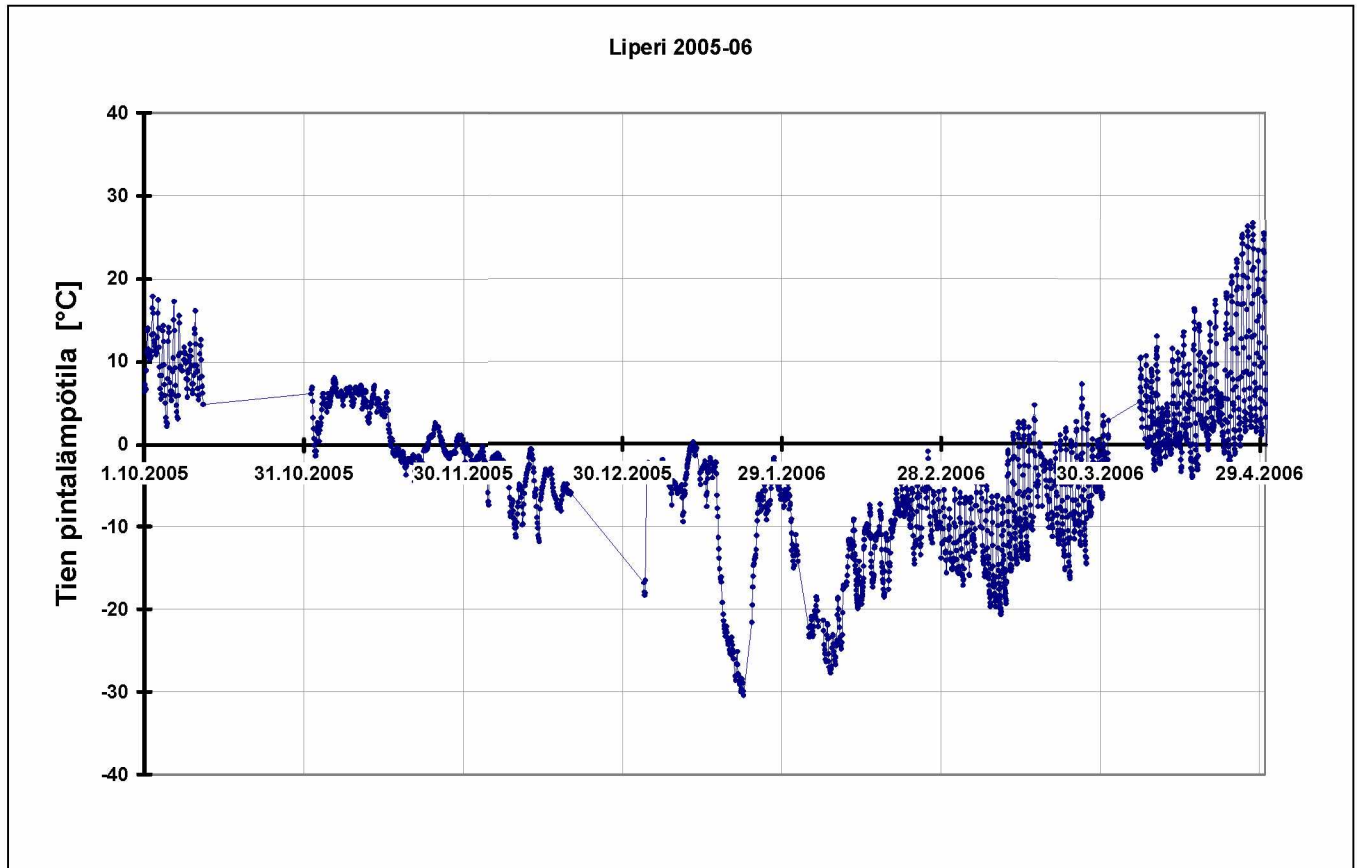


Liperi 2003-04

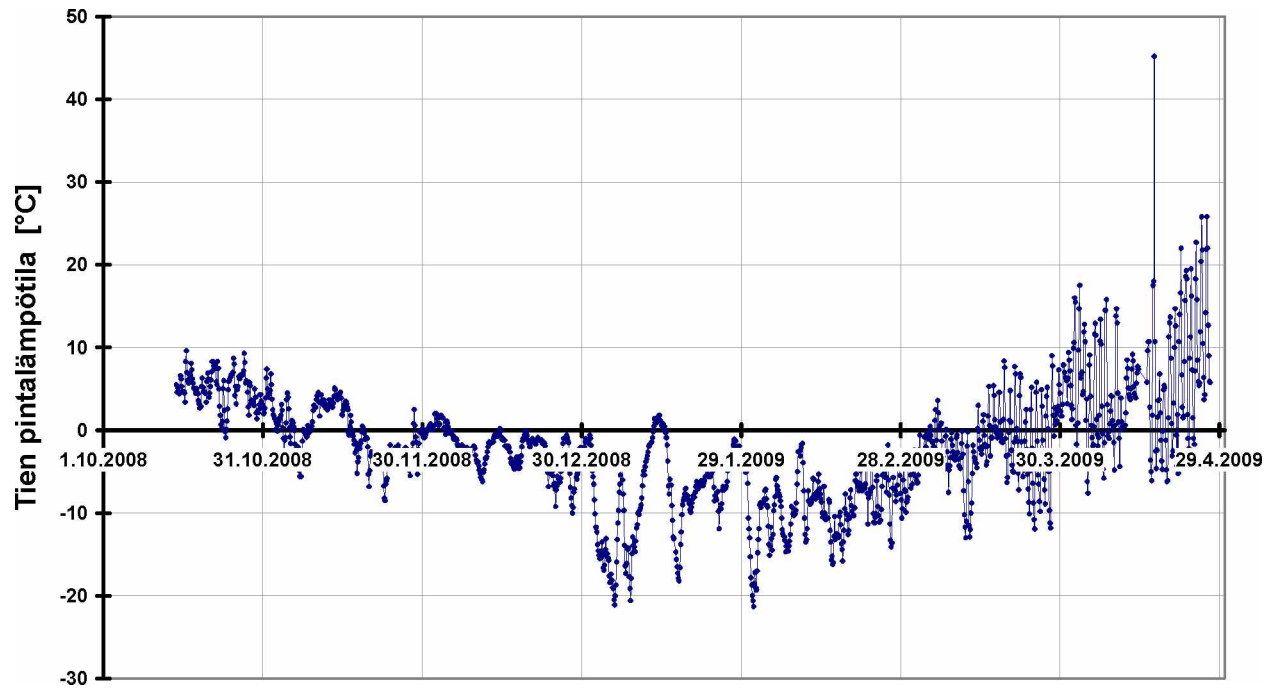


Liperi 2004-05

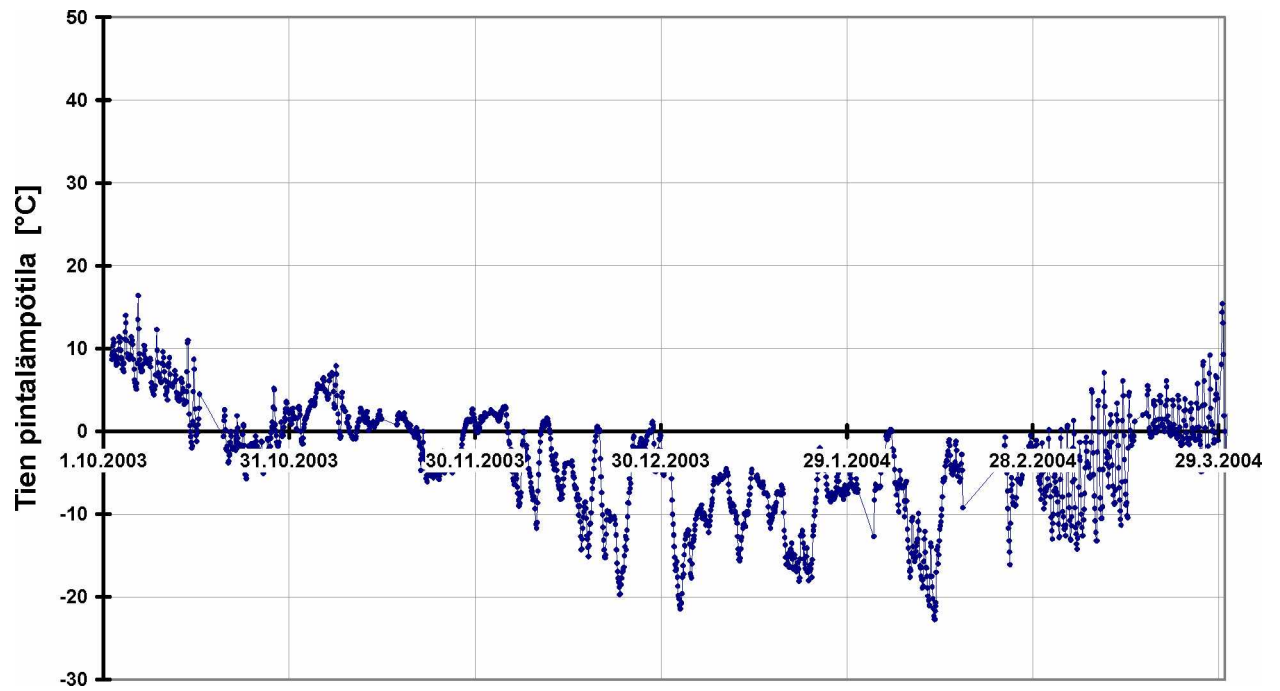




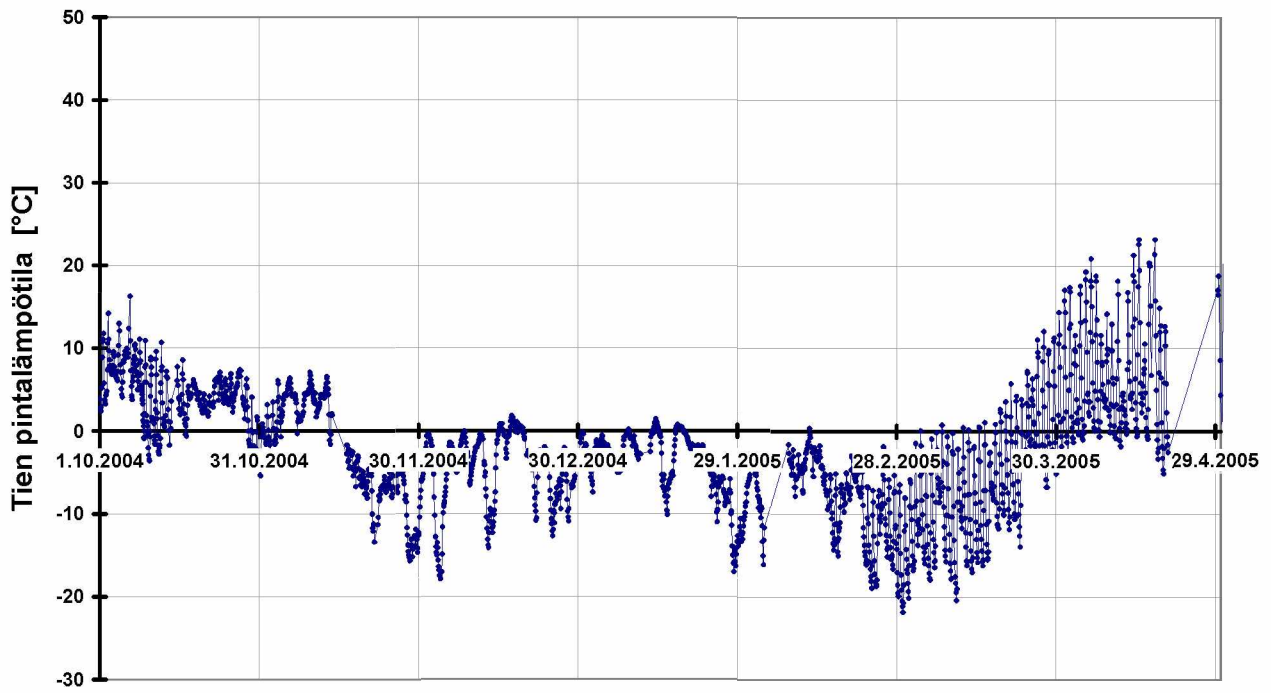
Liperi 2008-09



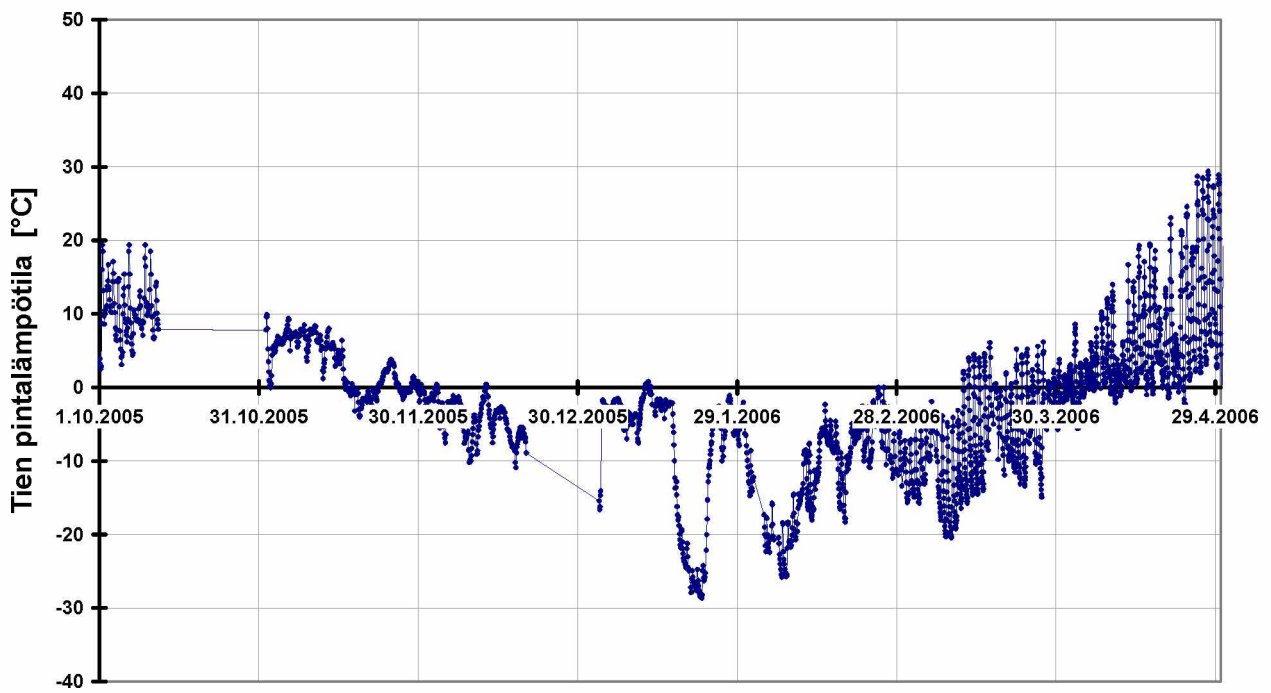
Siielinjärvi 2003-04



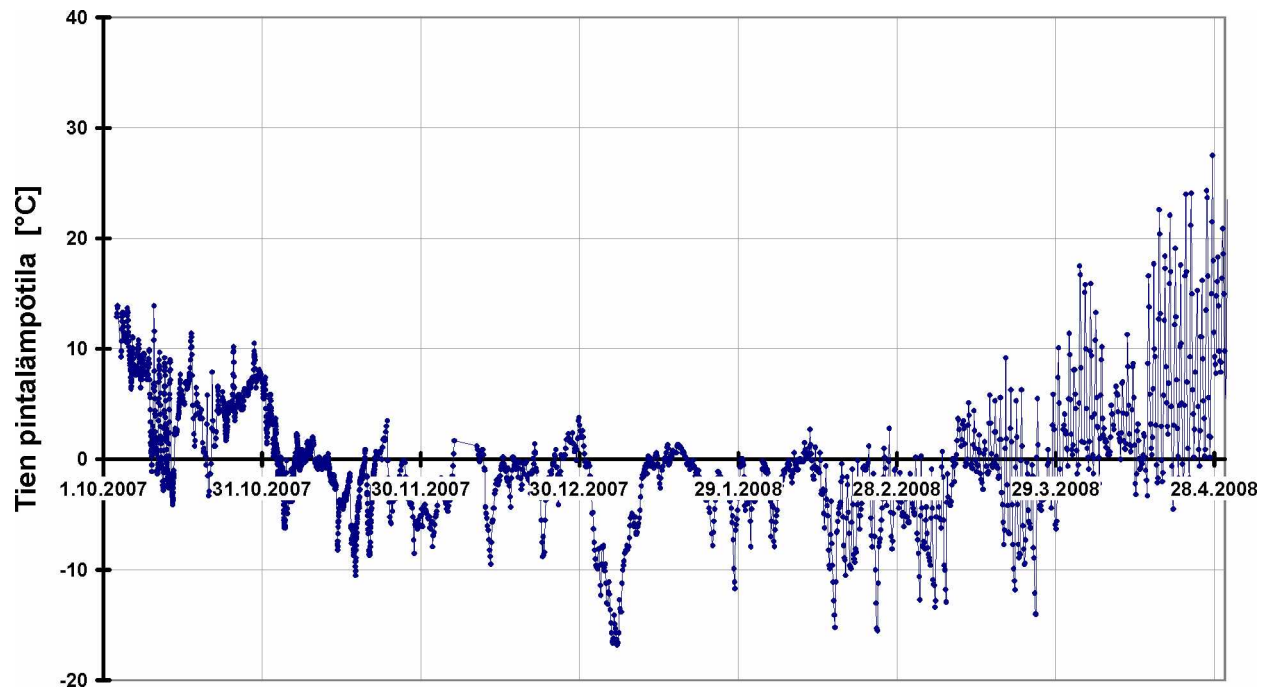
Siilinjärvi 2004-2005



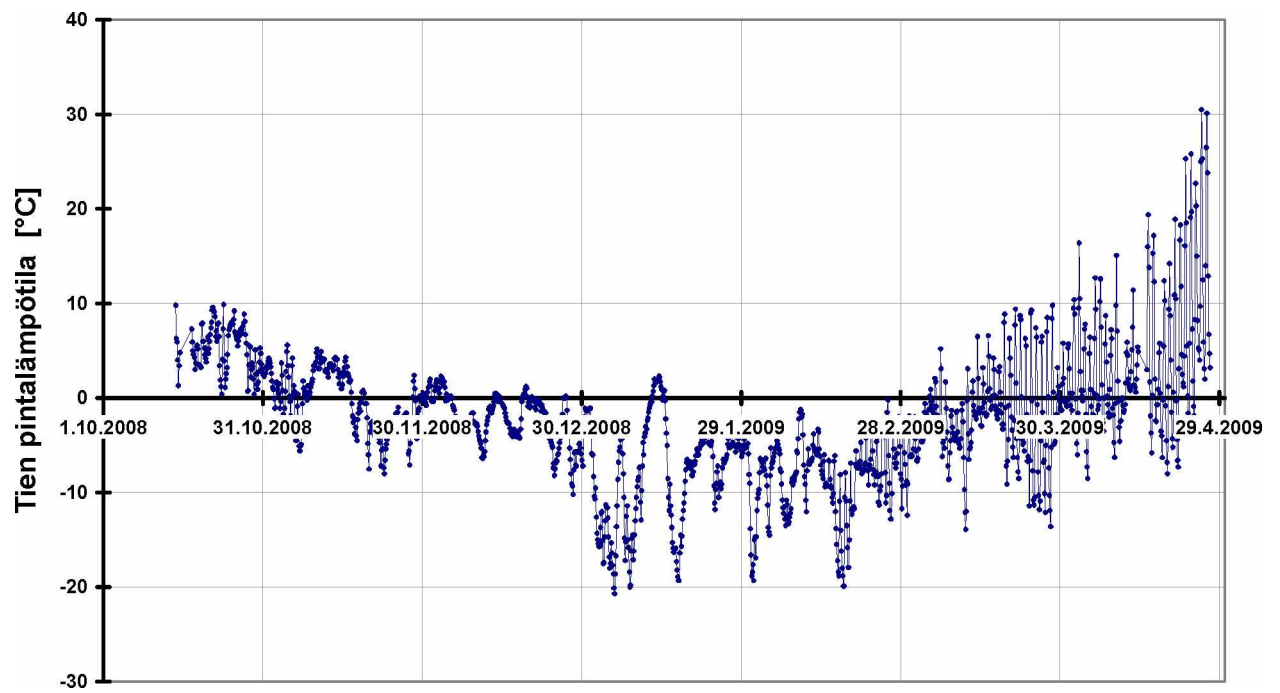
Siilinjärvi 2005-06



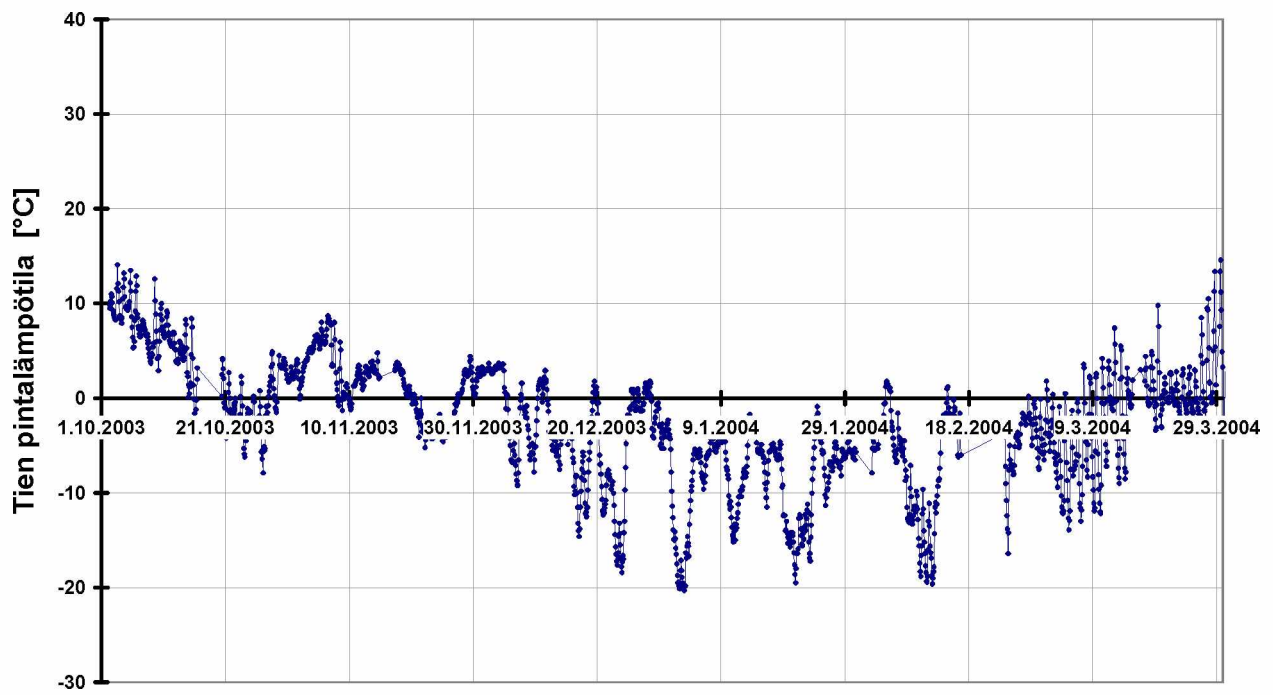
Siilinjärvi 2007-08



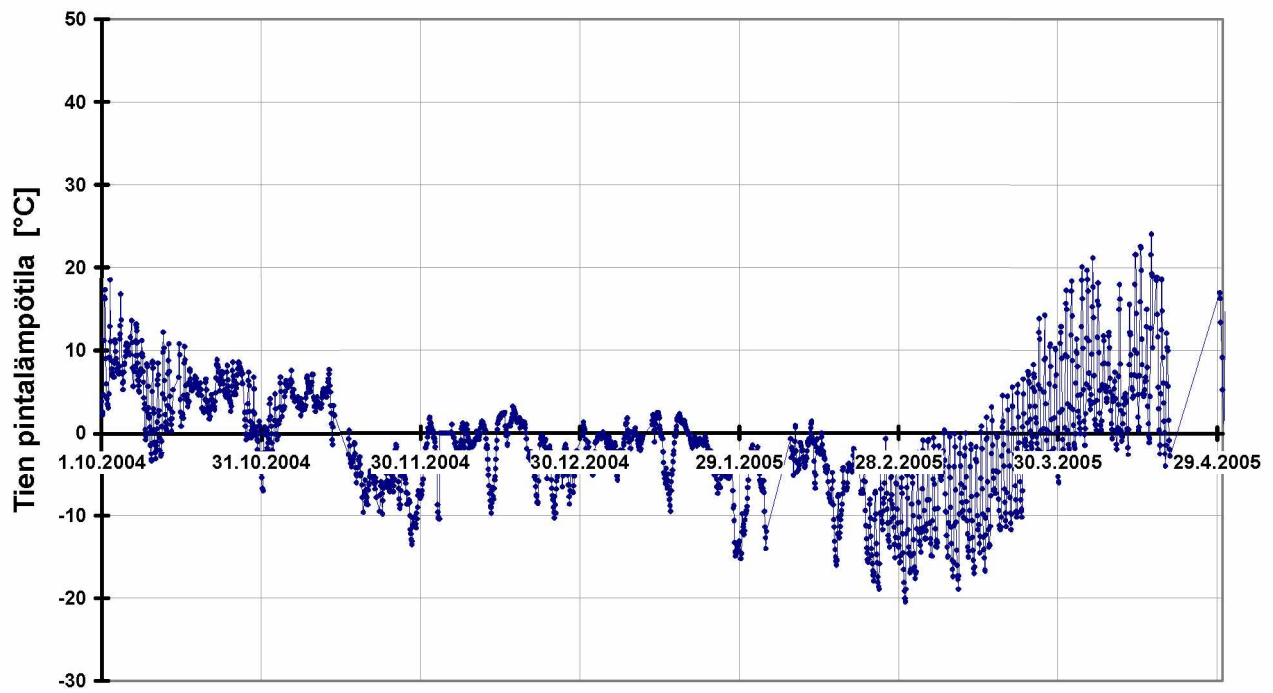
Siilinjärvi 2008-09



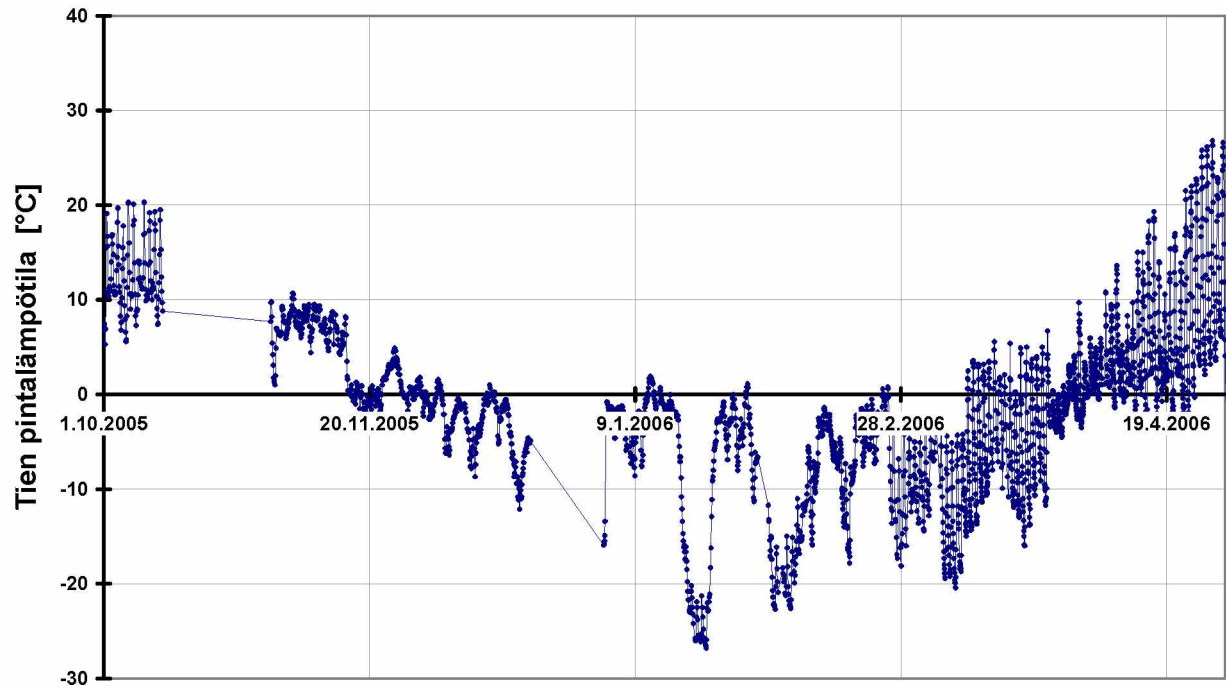
Jyväskylä 2003-04



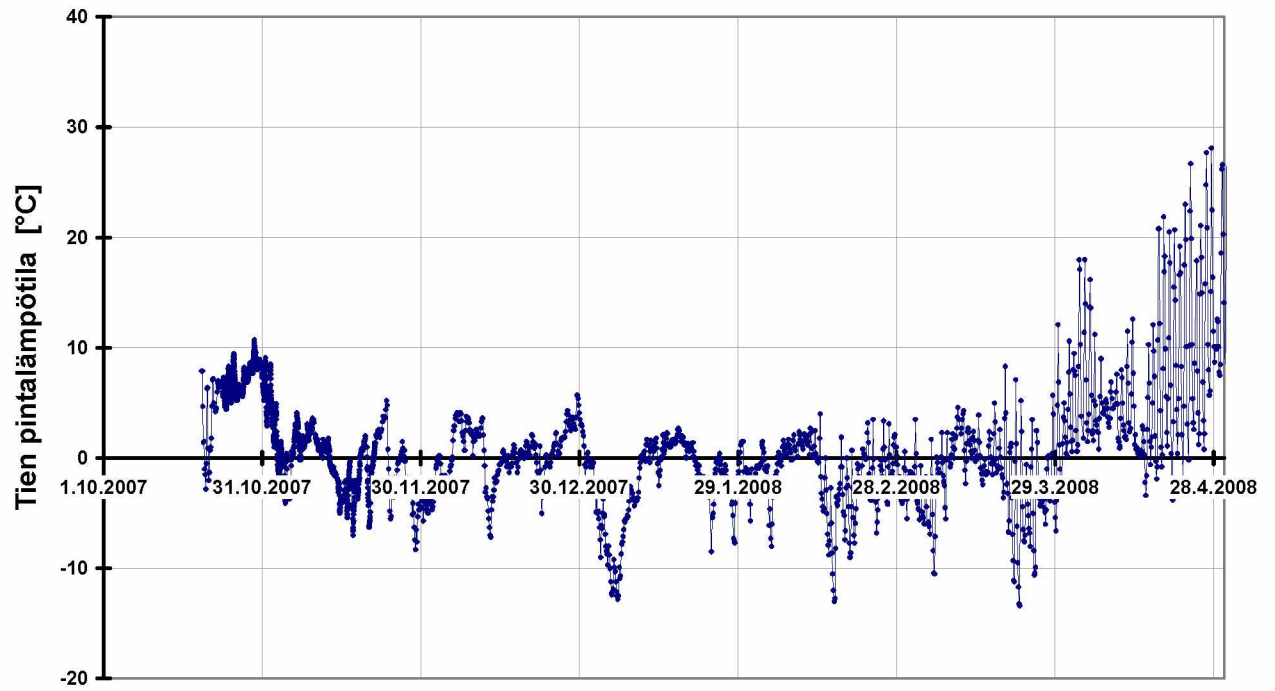
Jyväskylä 2004-05



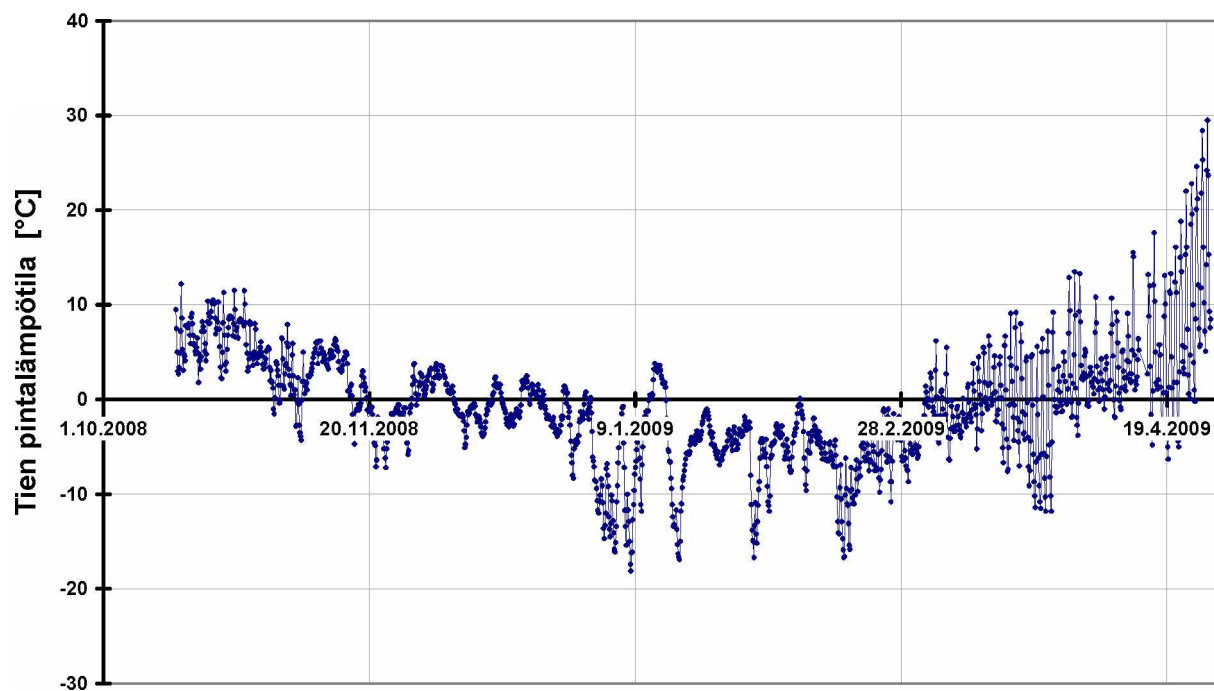
Jyväskylä 2005-06



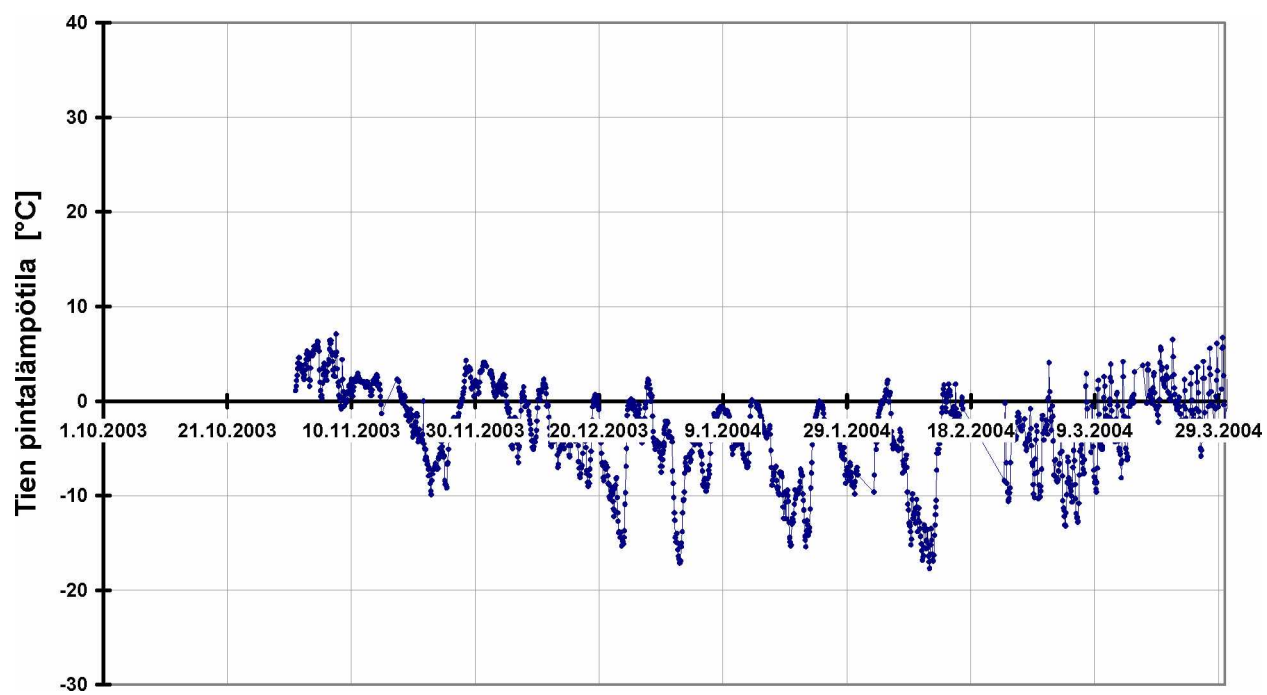
Jyväskylä 2007-08



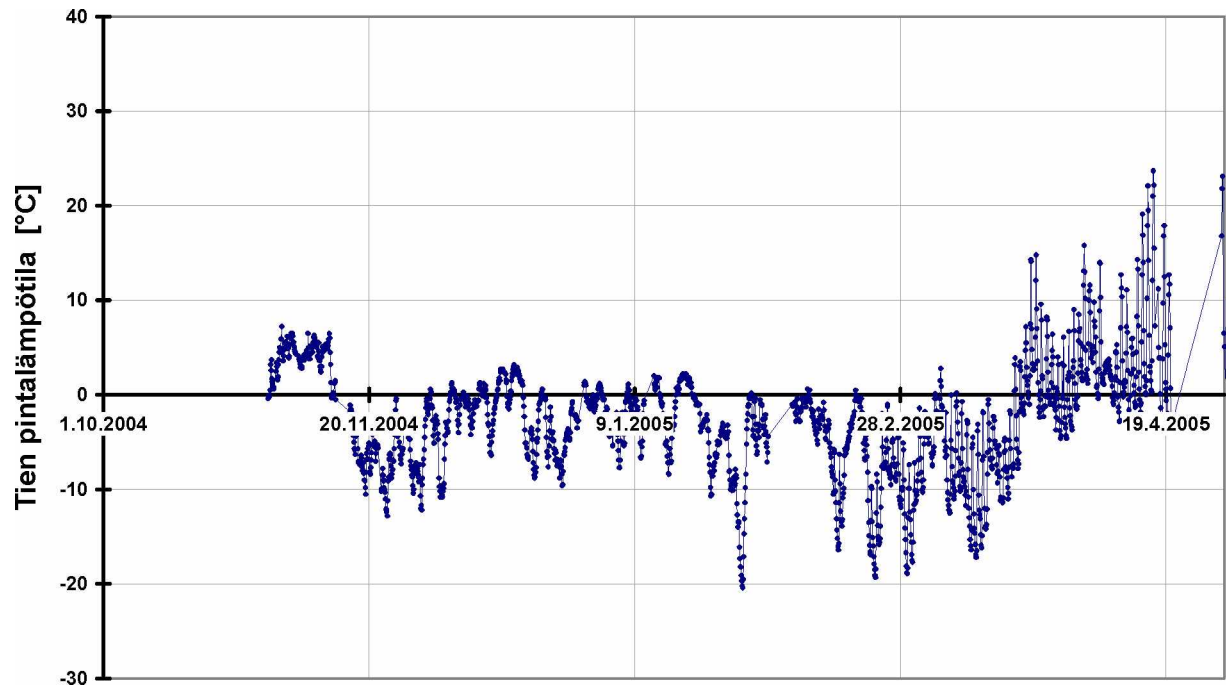
Jyväskylä 2008-09



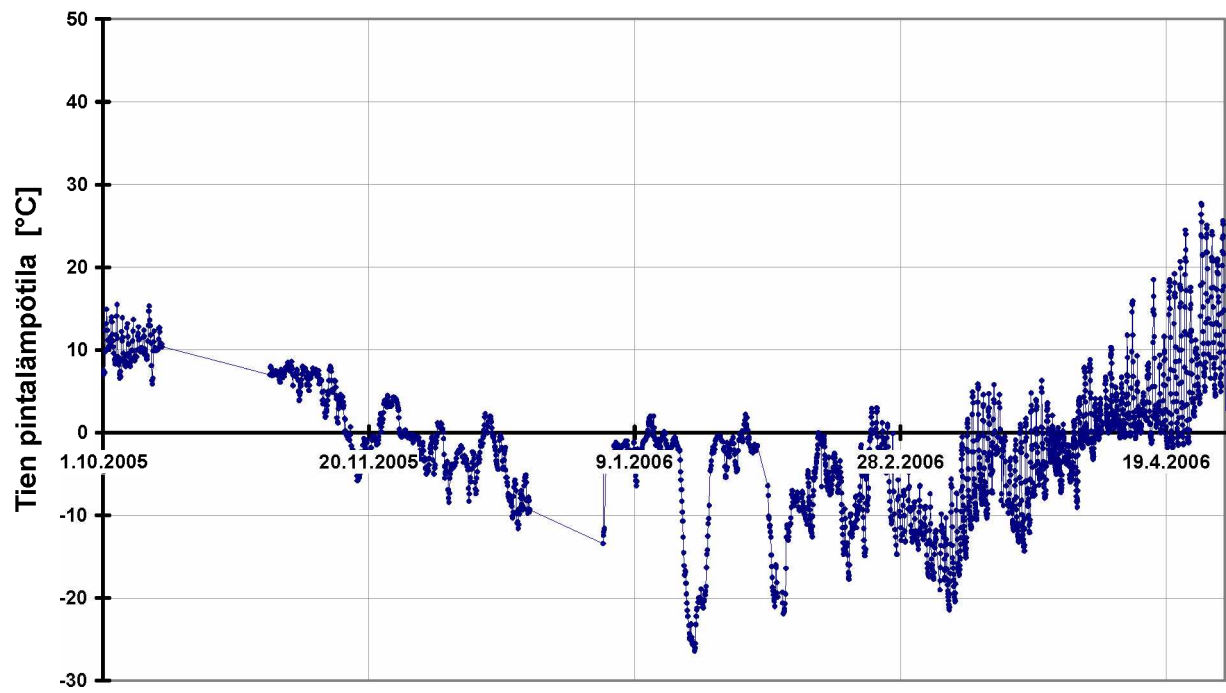
Mustasaari 2003-04



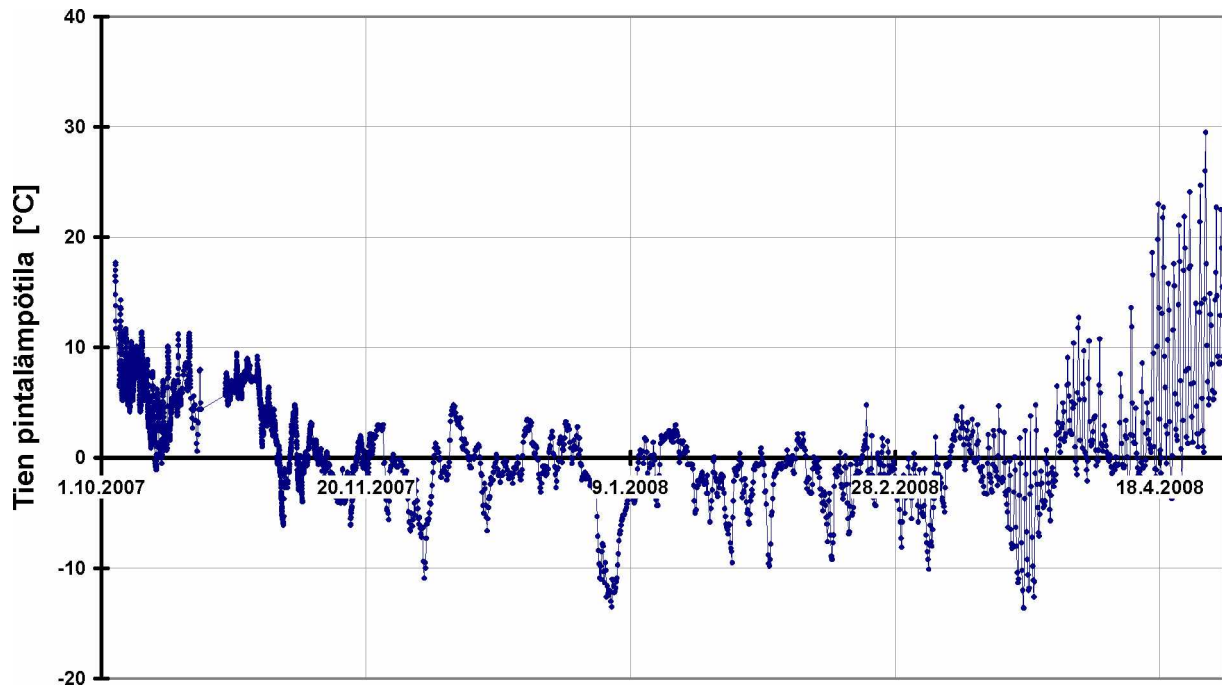
Mustasaari 2004-05



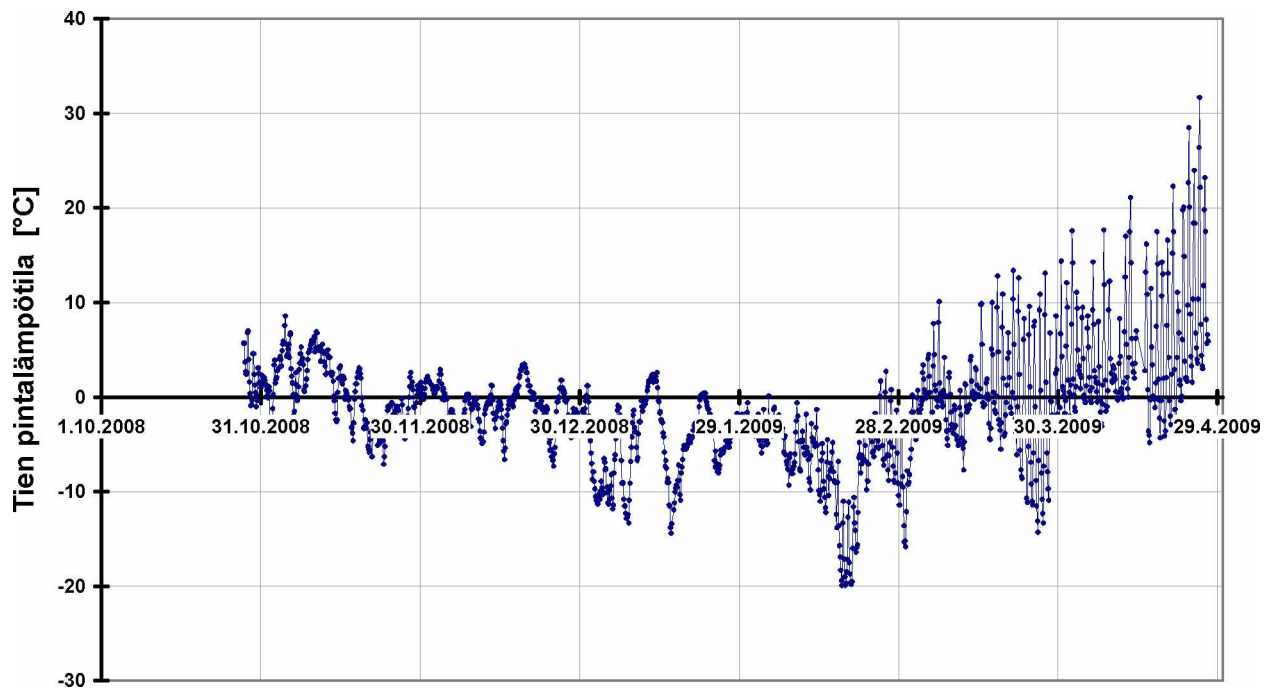
Mustasaari 2005-06



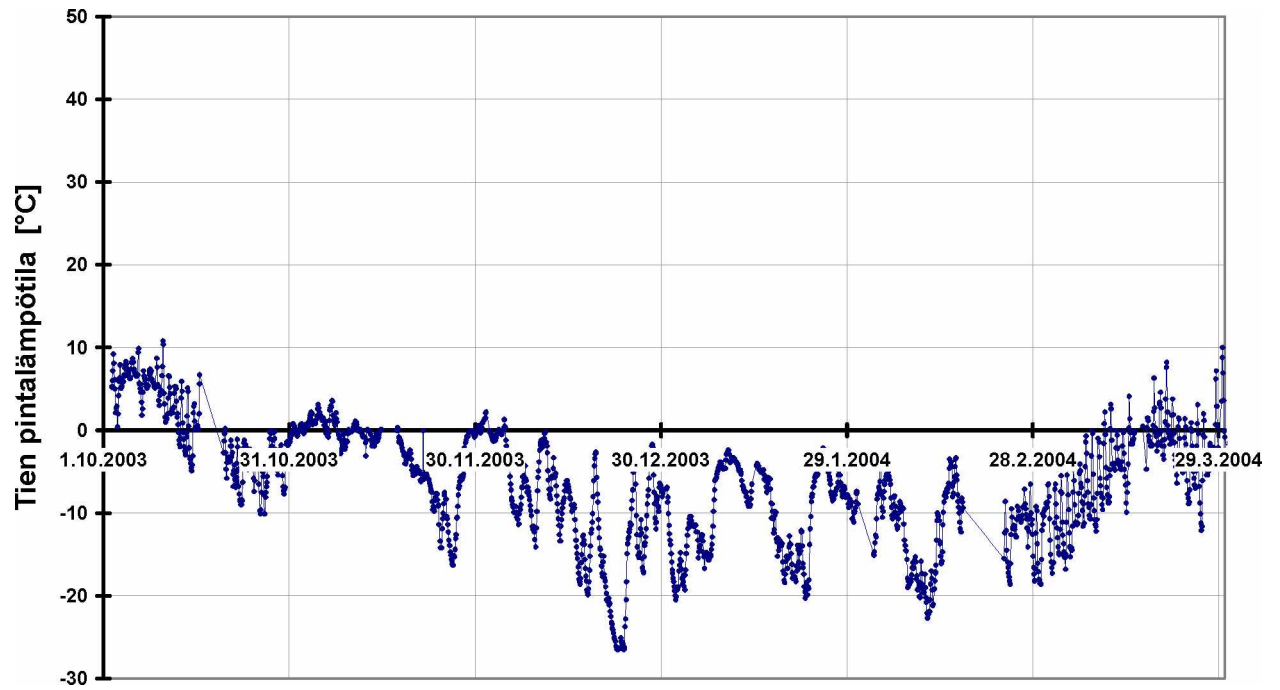
Mustasaari 2007-08



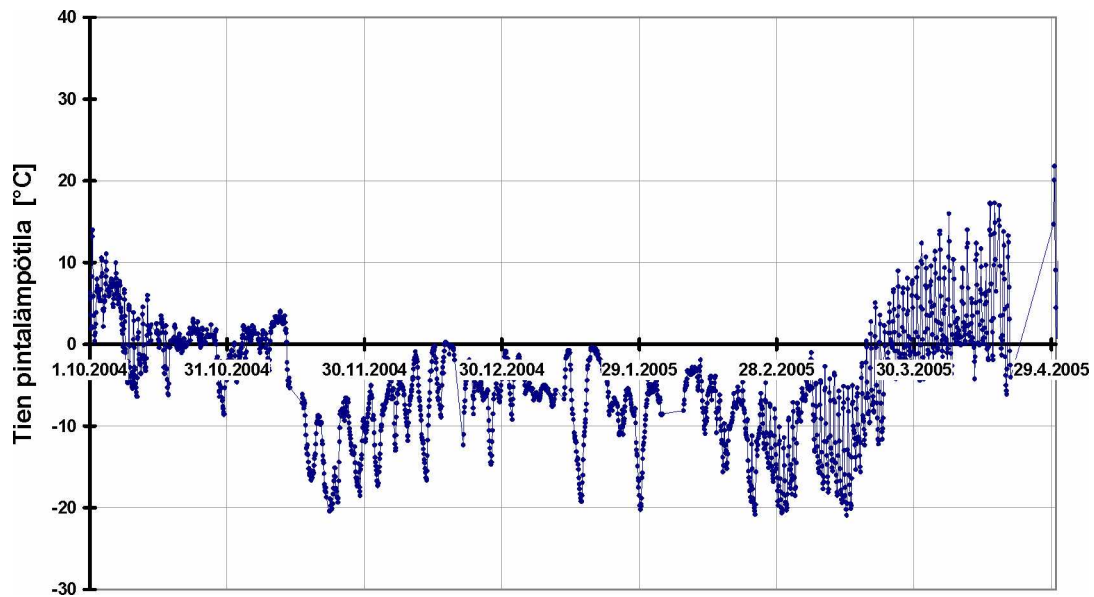
Mustasaari 2008-09



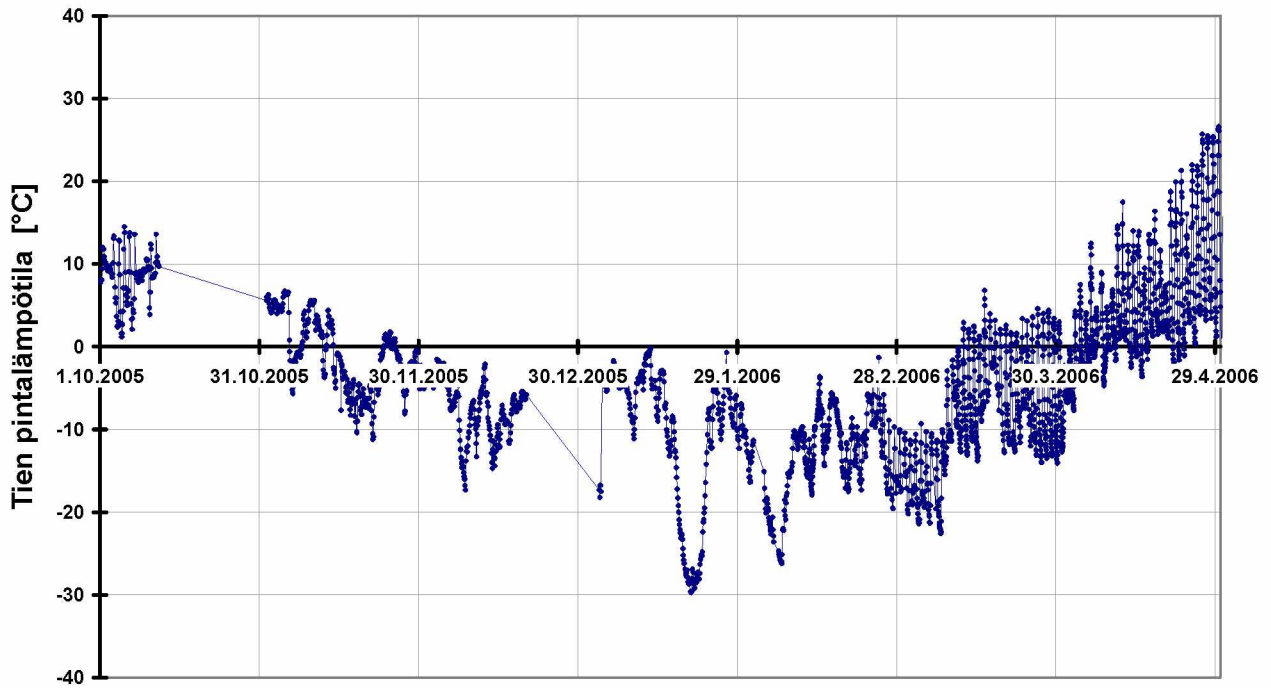
Rovaniemi 2003-04



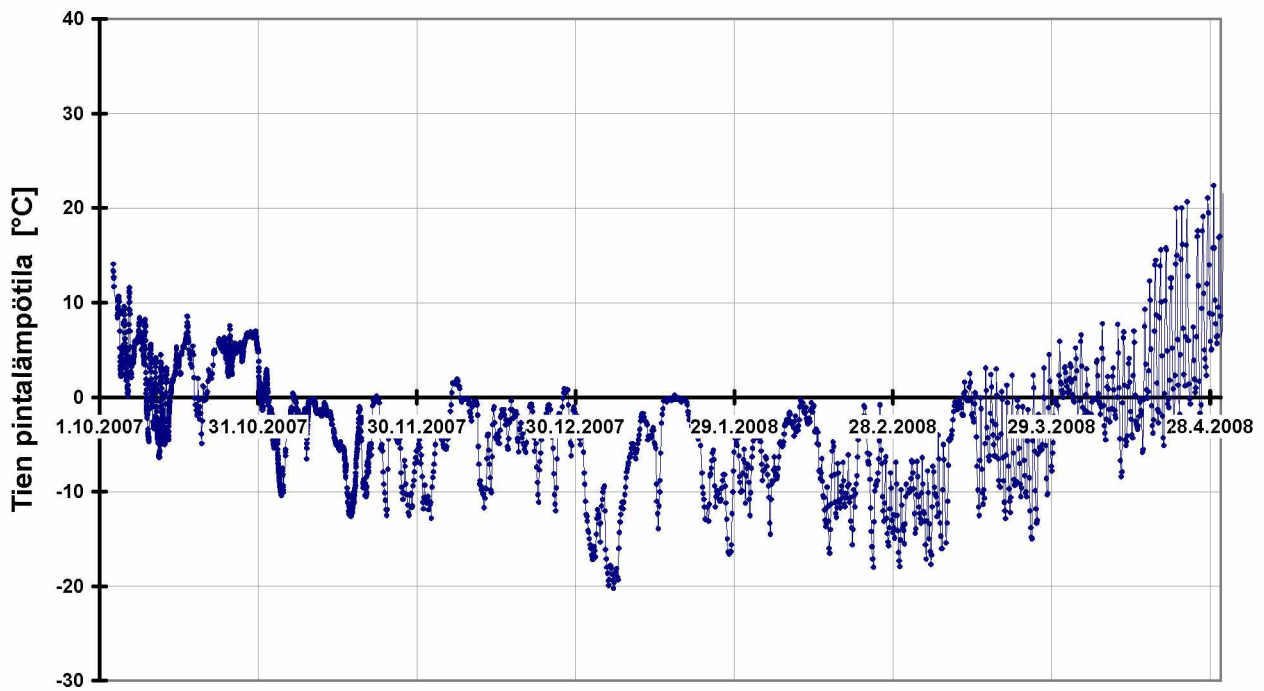
Rovaniemi 2004-05

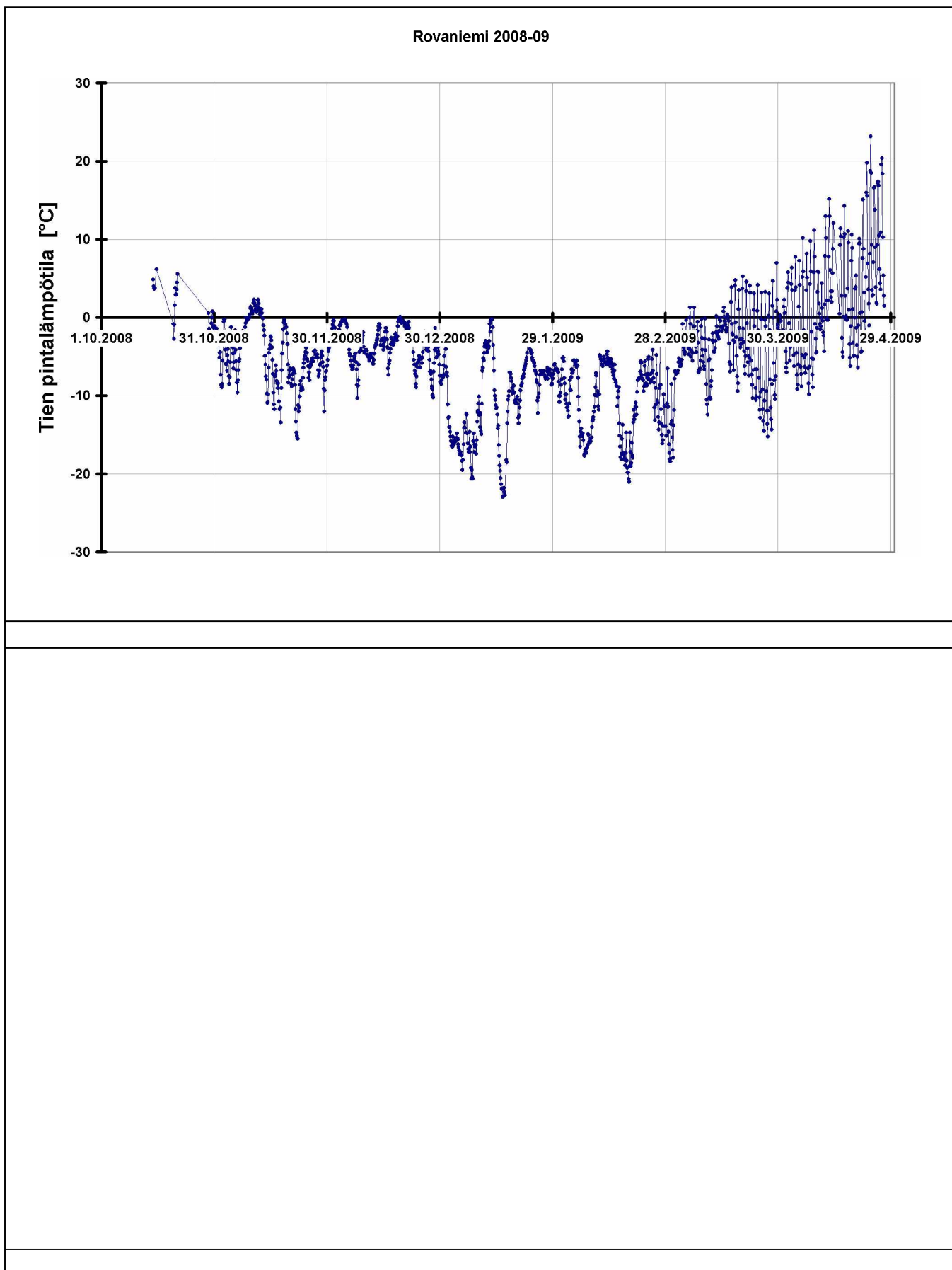


Rovaniemi 2005-06



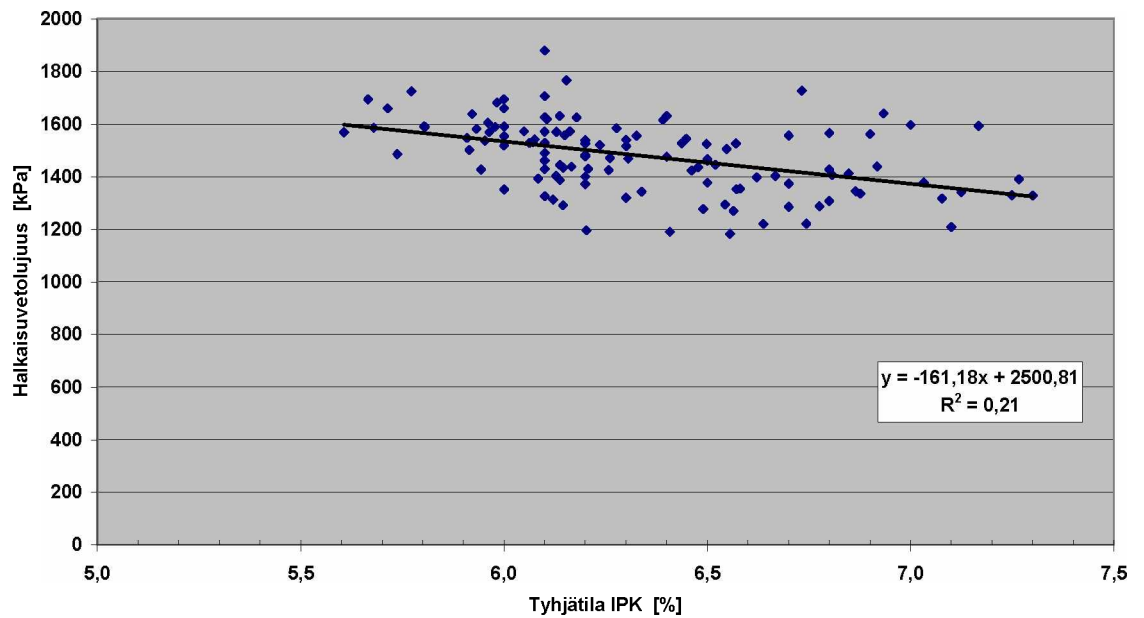
Rovaniemi 2007-08



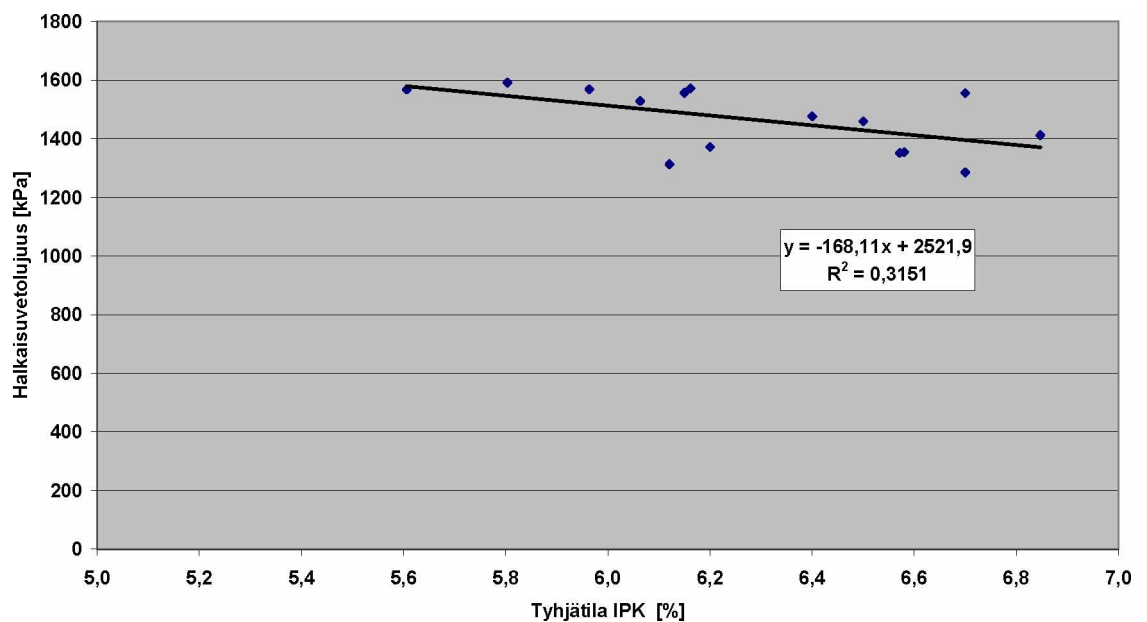


Referenssinäytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus tyhjätilasta (sykli 12 h)

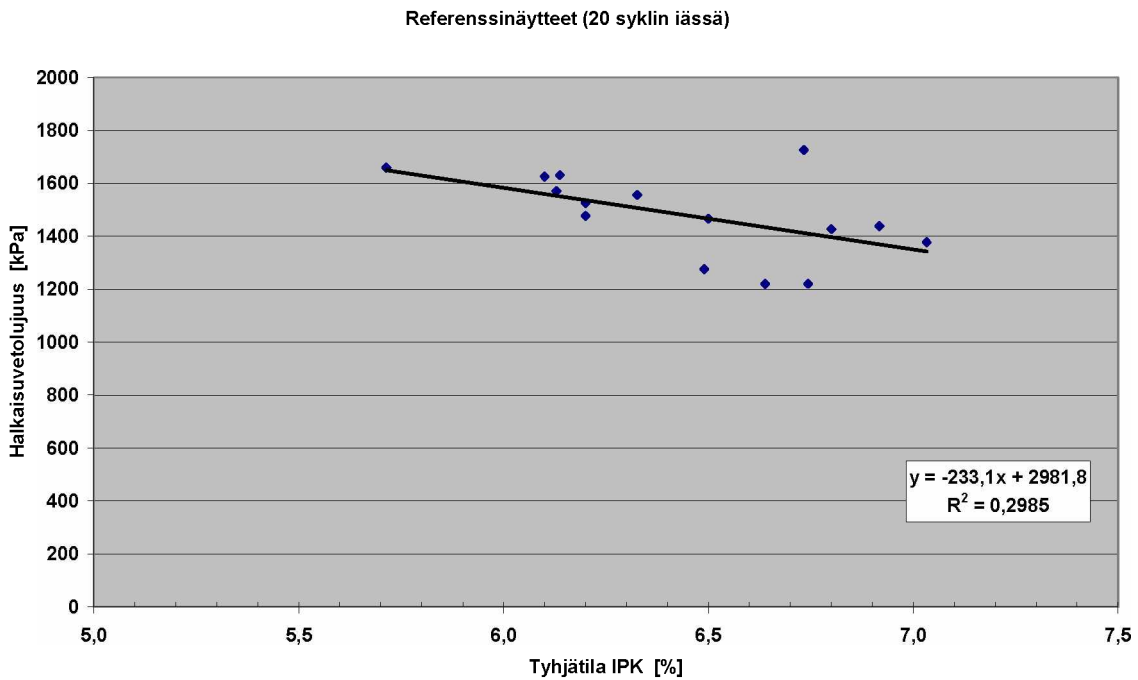
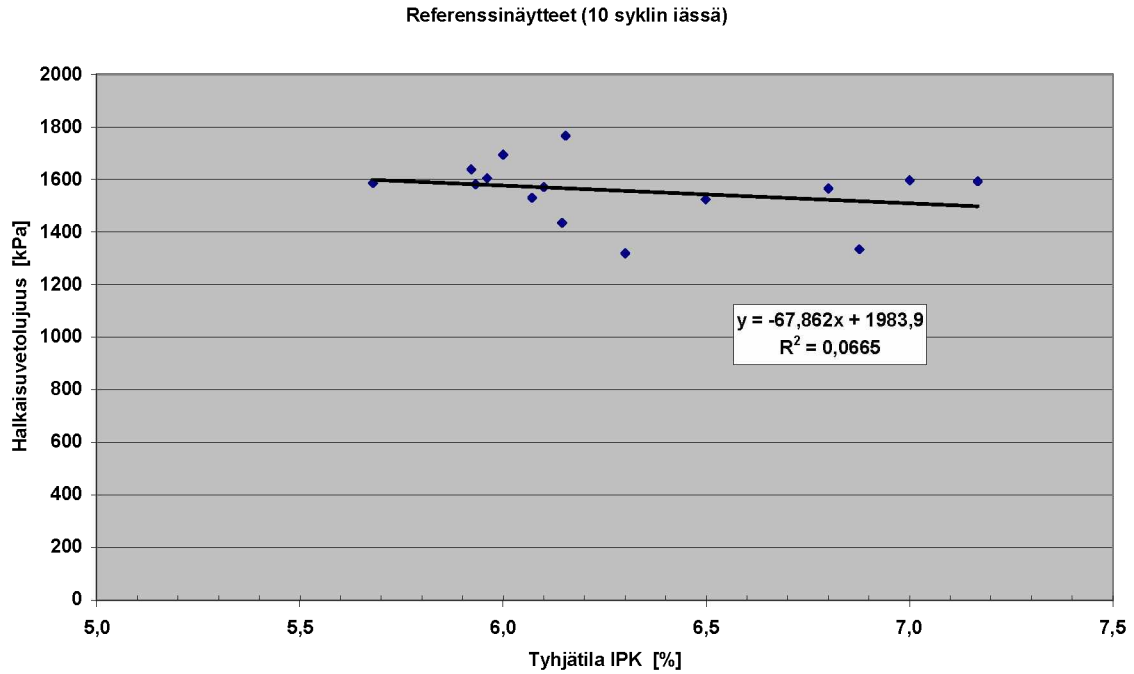
Referenssinäytteet (sykliin vaiheet 6, 10, 20 tai 50)



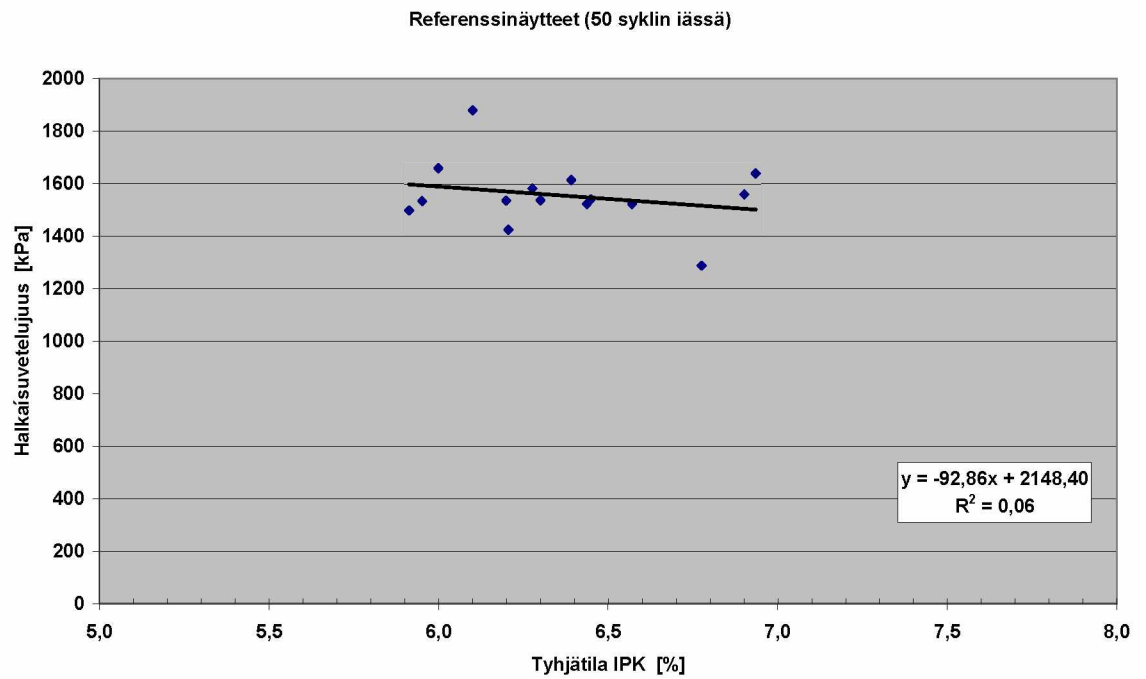
Referenssinäytteet (6 syklin iässä)



Referenssinäytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus tyhjätilasta (sykli 12 h)



Referenssinäytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus tyhjätilasta (sykli 12 h)



Jäädytys-sulatuslaitteen toimivuuden varmistaminen

Jäädytys-sulatuslaitteen toimivuuden seuranta

Jäätymis-sulamiskokeiden aikana jäädytys-sulatuslaitteessa oli kahdentyyppisiä häiriöitä:

a) Vähäisen vuodon vuoksi laitteesta oli vähitellen valunut ulos kylmäainetta (R404a). Vuodosta seurasi, ettei jäähdytyskoneisto pystynyt enää saattamaan näytteitä tavoitelämpötilaan (-20 °C). Kylmäaineen vuoto oli ollut piilevä ja sen aiheuttama lämpötilavirhe vähitellen kasvava.

b) Laitteessa oli turvalaite, joka esti jäädyttämisen, jos altaassa oli vettä. Turvalaite katkaisi jäähdyttämisen, kun näytetason tukina olleista betonikuutioista mureni materiaalia, joka tukki turvalaitteen anturin aukon. Laitteessa oli ilmaa kierrättävät puhaltimet, joiden tuottama hukkalämpö aiheutti jäähdytyksen keskeytyessä umpinaisessa jäädytys-sulatusarkussa liian korkeat lämpötilat.

Häiriö kohdistui kuuden näytesarjan jäädytys-sulatuslaitteessa olleisiin näytteisiin. Virhetoiminnan aikana näytteiden alin lämpötila vaihteli lähinnä välillä -10...-22 °C. Tämäkin aiheutti merkittävää asfaltin lujuuden heikkenemistä.

Häiriö oli vaikuttanut voimakkaammin suolaliuoksessa olleisiin näytteisiin, koska suolaliuos jäätyy hitaammin ja alemmassa lämpötilassa. Näistä näytteistä vain osa oli jäädytys-sulatuslaitteessa häiriön aikana. Vertailunäytteet säilytettiin huoneilmassa.

Uusintakokeet

Tutkimustulosten perusteella päätettiin luopua suolaliuoksen käytöstä jäätymis-sulamiskokeessa projektin aikana. Projektin ohjausryhmän päätöksellä kylmälaitteen toimintahäiriön vuoksi uusittiin neljän koostumuksen jäätymis-sulamiskokeet. Uusintakoe tulokset on raportissa merkitty U-kirjaimella ja ne korvasivat jäätymis-sulamislaitteen toimintahäiriön aikaiset vastaavien kokeiden tulokset.

Lämpötilaseurannan valvonnan tehostaminen

Jäädytys-sulatuslaitteeseen asennettiin tämän jälkeen hälytysjärjestelmä, joka lähettää hälytyksen laitteen vastuuhenkilön GSM-puhelimeen, jos jäätymis-sulamiskokeen näytteiden lämpötilat poikkeavat ohjealueelta.

Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymsulamiskestävyystuloksia

Jäätyminen ja sulaminen vedessä, SMA 16 Koskenkylä, heikennetty koost.

Märit referenssinäytteet (=kuivina säilytetyt, ennen halkaisua imeytyt ref.)

nestte	testi	syk-lejät	testi	Ref. näyte vedessä imeytyty/varasbuikva	siir-tymä	halk. veto-lujuus	halk. veto-jäykk.	moduuli 15°C s1	moduuli 15°C s2	moduuli 15°C KA	Tyhjä-tila ipk poikk-kaista	Tyhjä-tila ipk poikk-kaista	Tyhjä-tila ulkom. poikk-kaista	Tiheys, ipk poikk-kaista	Tiheys, ulko-mitta	Tiheys, ulkomittai poikk-kaista	Äänen-nopeus ennen	Äänen-nopeus jälkeen +5°C	Äänen-nopeus jälkeen +20°C
SMA16/ Koskenkylä/ lentotuhka/ bitumi 50/70, bitumipit. 5.8 %.																			
U vesi	sykli	10	sykli		2,4	1395	92	5290	4513	4901	6,3	-2,9	9,1	-5,8	2257	0,2	2191	4462	4363
U vesi	sykli	10	sykli		2,6	1351	83	3814	3814	3814	6,3	-3,4	9,0	-6,2	2258	0,2	2192	4207	4237
U vesi	sykli	10	sykli		2,2	1245	88	2051	2685	2368	6,5	-0,3	9,9	3,2	2253	0,0	2170	4268	4237
U vesi	sykli	10	sykli		2,6	1346	82	3914	1874	2894	6,5	0,3	9,7	0,7	2252	0,0	2176	-0,1	4268
U vesi	sykli	10	sykli		2,2	1296	92	2678	3225	2952	6,9	6,3	10,4	8,1	2242	-0,4	2159	-0,9	4237
U vesi		10	mä_ref	märkä	2,5	1575	98	3507	5513	4510	6,1	-3,3	8,0	-3,6	2261	0,2	2216	0,3	4412
U vesi		10	mä_ref	märkä	2,1	1442	109	2980	3182	3081	6,6	4,1	10,1	21,1	2250	-0,3	2167	-1,9	4380
U vesi		10	mä_ref	märkä	2,5	1531	95	6022	3378	4700	6,4	3,2	8,6	3,2	2254	-0,1	2203	-0,3	4444
U vesi		10	mä_ref	märkä	2,7	1765	104	7248	2588	4918	6,3	-0,5	7,4	-11,1	2257	0,0	2231	1,0	4348
U vesi		10	mä_ref	märkä	2,3	1738	120	2544	2644	2594	6,2	-1,6	7,5	-9,7	2259	0,1	2228	0,9	4196
U vesi	ka vesi	10	sykli		2,4	1327	87,6			3386	6,5	9,6			2252		2177	4289	4313
U vesi	s vesi	10	sykli		0,2	52	4,2			888	0,2	0,5			5		13	90	62
U vesi	100 s/ka	10	sykli		6,5	3,9	4,8			26,2	3,5	5,5			0,2		0,6	2,1	1,4
U vesi	ka ref	10	mä_ref	märkä	2,4	1610	105			3961	6,3	8,3			2256		2309	4356	4356
U vesi	s ref	10	mä_ref	märkä	0,2	123	9			939	0,2	1,0			4				86
U vesi	100 s/ka	10	mä_ref	märkä	8,8	7,7	8,5			23,7	2,5	11,7			0,2		1,1		2,0
U vesi	suhde (%)	10	mä_ref	sykl / mä_ref	99,0	82,4	83,1			85,5	102,7	115,8			99,8		98,6		99,0
SMA16/ Koskenkylä/ lentotuhka/ bitumi 50/70, bitumipit. 5.8 %.																			
U vesi	sykli	50	sykli		2,2	1202	85,2	3146	2871	3008	6,7	3,5	9,2	1,8	2248	-0,2	2187	-0,2	4268
U vesi	sykli	50	sykli		2,6	1318	79,0	3240	4251	3746	6,4	-1,0	7,7	-15,2	2255	0,1	2224	1,5	4396
U vesi	sykli	50	sykli		2,4	1363	90,5	3764	3375	3570	6,2	-3,6	7,8	-13,9	2259	0,3	2222	1,4	4331
U vesi	sykli	50	sykli		2,3	1101	75,8	2675	2910	2792	6,6	1,9	10,4	14,9	2250	-0,1	2159	-1,5	4177
U vesi	sykli	50	sykli		2,9	1001	55,3	2705	3618	3161	6,4	-0,8	10,2	12,4	2254	0,1	2164	-1,2	4429
U vesi	vesi	50	mä_ref	märkä	2,2	1746	123	3556	3604	3580	6,3	-2,7	7,8	-9,8	2258	0,2	2222	0,9	4348
U vesi	vesi	50	mä_ref	märkä	2,7	1541	90	3580	3330	3455	6,4	0,0	8,5	-1,9	2254	0,0	2205	0,2	4412
U vesi	vesi	50	mä_ref	märkä	2,3	1368	92	3298		3298	6,0	-6,5	8,4	-2,0	2264	0,4	2206	0,2	4511
U vesi	vesi	50	mä_ref	märkä	2,4	1751	114	3105	3074	3089	6,6	2,4	8,9	3,3	2250	-0,2	2195	-0,3	4167
U vesi	vesi	50	mä_ref	märkä	2,8	1500	84	2655		2655	6,9	6,8	9,5	10,4	2243	-0,5	2180	-1,0	4412
U vesi	ka vesi	50	sykli		2,5	1197	77			3256	6,5	9,0			2253,1		2191,3	4339,0	4344,7
U vesi	s vesi	50	sykli		0,2	134,1	12,1			353,1	0,2	1,1			3,9		27,6	87,2	65,3
U vesi	100 s/ka	50	sykli		9,5	11,2	15,6			10,8	2,5	12,7			0,2		1,3	2,0	1,5
U vesi	ka ref	50	mä_ref	märkä	2,5	1581	101			3216	6,4	8,6			2254		2201	4370	4370
U vesi	s ref	50	mä_ref	märkä	0,2	148	15			325	0,3	0,6			7		14		114
U vesi	100 s/ka	50	mä_ref	märkä	8,7	9,4	14,9			10,1	4,5	6,7			0,3		0,6		2,6
U vesi	suhde (%)	50	mä_ref	sykl / mä_ref	99,4	75,7	76,4			101,2	100,5	104,9			100,0		99,5		98,8

Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymsulamiskestävyytuloksia

Jäätyminen ja sulaminen vedessä

SMA 16 Koskenkylä, optimikoostumus (bitumipit. 6 %, täytejauhe kalkkifilleri)

Märit referenssinäytteet (=kuivina säilytetyt, ennen halkaisua imeytetyt ref.)

Kivaines	filleri	neste	syk- lejä	näyte	Ref. näyte	siir- tymä	halkaisu- vetolujuus	halkaisu- vetojäykk.	moduuli 15°C s1	moduuli 15°C s2	moduuli 15°C KA	Moduli _ikä	HVL ikä	Tyhjä- tila lPK	%
SMA16/ Koskenkylä/ KF/ bit 50/70, bitumipit.6,0 % (optimi).															
Koskenkylä	KF	vesi	10	sykli		2,5	1495	93,1	3498	4504	4001	20	21	6,0	
Koskenkylä	KF	vesi	10	sykli		2,9	1507	82,3	3827	4836	4332	20	21	6,1	
Koskenkylä	KF	vesi	10	sykli		2,2	1453	105,3	3408	3423	3423	20	21	6,6	
Koskenkylä	KF	vesi	10	sykli		2,4	1201	79,5	3108	3424	3266	20	21	7,0	
Koskenkylä	KF	vesi	10	sykli		2,5	1480	94,0	3816	3752	3784	20	21	6,4	
Koskenkylä	KF	vesi	10	refer.	märkä	3,2	1494	73,3	3679	3954	3816	20	21	6,4	
Koskenkylä	KF	vesi	10	refer.	märkä	2,5	1492	94,2	4082	4242	4162	20	21	6,0	
Koskenkylä	KF	vesi	10	refer.	märkä	3,1	1328	66,6	3522	4135	3829	20	21	6,2	
Koskenkylä	KF	vesi	10	refer.	märkä	2,2	1465	103,6	3179	3522	3351	20	21	6,8	
Koskenkylä	KF	vesi	10	refer.	märkä	2,5	1333	85,3	3207	3366	3286	20	21	6,6	
		ka vesi		sykli		2,5	1427	91	3532	3991	3761	20	21	6,4	
		s vesi		sykli		0,2	115	9	270	576	386			0,4	
		100 s/ka		sykli		9,3	8,0	10,2	7,6	14,4	10,2			5,8	
		ka ref		referenssi		2,7	1422	85	3534	3844	3689			6,4	
		s ref		referenssi		0,4	76	13	333	343	327			0,3	
		100 s/ka		referenssi		14,6	5,3	15,9	9,4	8,9	8,9			4,6	
		ka suhde (%)				92,0	100,3	107,4	99,9	103,8	102,0				
SMA16/ Koskenkylä/ KF/ bit 50/70, bitumipit.6,0 % (optimi).															
Koskenkylä	KF	vesi	50	sykli		2,3	1166	80,5	2633	2928	2781	62	63	6,4	
Koskenkylä	KF	vesi	50	sykli		3,1	1182	60,0	2913	3247	3080	62	63	6,0	
Koskenkylä	KF	vesi	50	sykli		3,2	1152	56,9	2704	2989	2846	62	63	6,4	
Koskenkylä	KF	vesi	50	sykli		2,7	1003	58,0	2739	3172	2955	62	63	6,0	
Koskenkylä	KF	vesi	50	sykli		3,0	1052	55,5	2490	2718	2604	62	63	6,8	
Koskenkylä	KF	vesi	50	refer.	märkä	2,7	1344	77,5	3514	3717	3616	62	63	6,6	
Koskenkylä	KF	vesi	50	refer.	märkä	2,1	1752	131,0	4114	4844	4479	62	63	6,2	
Koskenkylä	KF	vesi	50	refer.	märkä	3,2	1390	69,3	3571	3800	3685	62	63	6,6	
Koskenkylä	KF	vesi	50	refer.	märkä	2,4	1635	107,9	3896	3978	3937	62	63	6,0	
Koskenkylä	KF	vesi	50	refer.	märkä	2,5	1670	106,0	3936	3567	3752	62	63	6,0	
		ka vesi		sykli		2,9	1111	62	2696	3011	2853	62	63	6,3	
		s vesi		sykli		0,3	71	9	138	187	161			0,3	
		100 s/ka		sykli		11,5	6,3	14,9	5,1	6,2	5,6			5,0	
		ka ref		referenssi		2,6	1588	98	3806	3981	3894			6,3	
		s ref		referenssi		0,4	161	22	228	451	312			0,3	
		100 s/ka		referenssi		13,8	10,3	22,7	6,0	11,3	8,0			4,6	
		ka suhde (%)				111,0	71,3	63,2	70,8	75,6	73,3				

Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymsulamiskestävyystuloksia

Jäätyminen ja sulaminen vedessä, SMA 16 Patavuori, optimikoostumus.

Märit referenssinäytteet (=kuivina säilytetyt, ennen halkaisua imeytetyt ref.)

Tilausinta	nesteteesti	syklejä	testi	Ref.näyte vedessä imeytetty/varastokuvana	siirtymä	halk.veto-lujuus	halk.veto-jäykkyys	moduuli 15°C s1	moduuli 15°C s2	moduuli 15°C KA	Tyhjätila ipk poikk.ka:sta	Tyhjätila ulkom. poikk.ka:sta	Tyhjätila ipk poikk.ka:sta	Theys, ipk poikk.ka:sta	Theys, ulkom. mitta	Theys, ulkomitt. ka:sta	Äänennopeus jälkeen +5°C	Äänennopeus jälkeen +20°C	
																			mm
SMA16/ Patavuori/ kalkkifilleri/ bitumi 50/70, bitumipit. 5,6 % opt.																			
U	vesi	sykli	10	sykli	2,2	1690	120,2	2963	6108	4630	6,9	3,0	10,5	-9,0	2486	-0,2	2388	1,2	4474
U	vesi	sykli	10	sykli	2,3	1483	103,8	2166	6663	4414	6,2	-6,2	13,6	17,1	2502	0,4	2307	-2,2	4708
U	vesi	sykli	10	sykli	2,4	1640	108,5	4363	6566	5480	7,0	5,1	11,5	-0,9	2482	-0,4	2363	0,1	4656
U	vesi	sykli	10	sykli	2,5	1404	88,5	3464	1891	2678	6,8	2,0	11,4	-1,5	2488	-0,1	2365	0,2	4493
U	vesi	sykli	10	sykli	2,4	1418	92,5	2637	9394	6015	6,4	-4,0	10,9	-5,7	2498	0,3	2378	0,8	4594
U	vesi	vesi	10	mä_ref	2,6	1500	92	6824	2465	4645	6,3	-5,3	12,0	-13,0	2502	0,4	2349	2,1	4629
U	vesi	vesi	10	mä_ref	3,5	1013	46	2469	2895	2882	6,5	-1,1	16,1	16,8	2495	0,1	2240	-2,7	4371
U	vesi	vesi	10	mä_ref	3,2	1286	63	4007	2741	3374	6,0	-9,7	14,3	3,7	2510	0,7	2288	-0,6	4371
U	vesi	vesi	10	mä_ref	3,3	1237	59	2392		2392	6,8	2,9	13,0	-5,9	2488	-0,2	2323	0,9	4243
U	vesi	vesi	10	mä_ref	2,7	1158	68	2317	3166	2742	7,5	13,2	13,6	-1,6	2469	-0,9	2307	0,3	4467
U	vesi	ka vesi	10	sykli	2,4	1525	102,7	3116	6123	4619	6,7		11,6		2491		2360		4572
U	vesi	s vesi	10	sykli	0,1	114	11	753	2412	1138	0,3		1,0		8		28		108
U	vesi	100 s/ka	10	sykli	4,6	7,5	11,1	24,2	39,4	24,6	4,3		9,0		0,3		1,2		2,4
U	vesi	ka ref	10	mä_ref	3,1	1239	66	3602	2817	3167	6,6		13,8		2493		2301		4416
U	vesi	s ref	10	mä_ref	0,4	160	15	1729	254	805	0,5		1,4		14		37		128
U	vesi	100 s/ka	10	mä_ref	11,5	12,9	22,7	48,0	9,0	25,4	7,8		10,0		0,6		1,6		2,9
U	vesi	suhde (%)	10	mä_ref	77,2	123,1	156,4	86,5	217,4	149,9	100,8		84,0		99,9		102,5		0,0
SMA16/ Patavuori/ kalkkifilleri/ bitumi 50/70, bitumipit. 5,6 % opt.																			
U	vesi	sykli	50	sykli	2,8	1463	83,3	3599	3592	3596	6,9	4,2	11,5	3,7	2484	-0,3	2361	-0,5	4664
U	vesi	sykli	50	sykli	2,3	1590	106,2	3405	3771	3588	6,4	-3,5	11,2	0,5	2498	0,3	2371	-0,1	4594
U	vesi	sykli	50	sykli	2,3	1367	93,7	3429	3924	3676	7,0	4,7	11,7	5,1	2483	-0,3	2357	-0,6	4602
U	vesi	sykli	50	sykli	2,5	1484	93,8	4154	3825	3990	6,2	-7,5	9,7	-12,8	2505	0,5	2410	1,6	4560
U	vesi	sykli	50	sykli	2,3	1386	96,0	2337	3733	3035	6,8	2,0	11,5	3,4	2488	-0,1	2362	-0,4	4636
U	vesi	vesi	50	mä_ref	2,2	1853	135	4263	7627	5945			6,2	-2,6			2503	0,2	
U	vesi	vesi	50	mä_ref	2,2	1589	112	4018	5145	4581			6,3	-1,1			2500	0,1	
U	vesi	vesi	50	mä_ref	2,8	1532	87	2892	2851	2921			6,8	5,9			2488	-0,4	
U	vesi	vesi	50	mä_ref	2,1	1399	107	3882	4762	4322			6,0	-5,9			2508	0,4	
U	vesi	vesi	50	mä_ref	2,4	1727	116						6,6	3,7			2492	-0,2	
U	vesi	ka vesi	50	sykli	2,4	1442	95	3385	3769	3577	6,6		11,1		2491,5		2372,1		4611,1
U	vesi	s vesi	50	sykli	0,2	65	7	590	109	308	0,3		0,7		8,4		19,5		36,0
U	vesi	100 s/ka	50	sykli	8,2	4,5	7,7	17,4	2,9	8,6	4,8		6,6		0,3		0,8		1,8
U	vesi	ka ref	50	mä_ref	2,3	1618	111	3789	5096	4442			6,4				2498		
U	vesi	s ref	50	mä_ref	0,3	160	15	480	1700	1073			0,3				7		
U	vesi	100 s/ka	50	mä_ref	10,8	9,9	13,9	12,7	33,4	24,2			4,3				0,3		
U	vesi	suhde (%)	50	mä_ref	104,5	89,1	84,9	89,3	74,0	80,5			173,9				94,9		

Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymsulamiskestävyytuloksia

Jäätyminen ja sulaminen suolaliuoksessa (3 % NaCl)

SMA 16 Koskenkylä, optimikoostumus (bitumipit. 6 %, täytejauhe kalkkifilleri)

Märit referenssinäytteet (=kuivina säilytetyt, ennen halkaisua imeytetyt ref.)

Kiviaines	filleri	neste	syklejä	näyte	Ref. näyte	siirtymä	halkaisu-	halkaisu-	moduuli	moduuli	moduuli	moduuli	Moduuli	HVL	Tyhjä-	
			kpl			mm	vetolujuus	vetojäykky.	15°C s1	15°C s2	15°C KA	MPa	ika	ikä	tila IPK	
							kPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	d	d	%	
SMA16/ Koskenkylä/ KF/ bit 50/70, bitumipit. 6,0 % (optimi).																
JÄÄTYMIS-SULAMINEN 3 % NaCl, 10 kpl 24 h syklejä																
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	sykli		2,4	1422	92,0	3057	3758	3407	20	21	21	7,3	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	sykli		3,0	1161	60,0	2730	3271	3001	20	21	21	7,2	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	sykli		2,8	1241	69,8	2731	2895	2813	20	21	21	6,4	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	sykli		2,8	1280	73,2	2799	2731	2765	20	21	21	6,8	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	sykli		2,4	1408	93,7	3529	3555	3542	20	21	21	6,5	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	refer.	märkä	2,4	1440	92,8	3269	3571	3420	20	21	21	7,2	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	refer.	märkä	2,5	1335	84,3	4398	3371	3884	20	21	21	7,3	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	refer.	märkä	2,6	1492	91,4	3253	4322	3787	20	21	21	6,6	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	refer.	märkä	2,7	1498	88,7	3127	3256	3191	20	21	21	6,7	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	10	refer.	märkä	2,3	1470	98,5	3523	4097	3810	20	21	21	6,3	
		ka suola		sykli		2,7	1303	78	2969	3242	3106	20	21	21	6,8	
		s suola		sykli		0,2	100	13	304	386	314				0,4	
		100 s/ka		sykli		9,3	7,7	16,8	10,3	11,9	10,1				5,6	
		ka ref		referenssi		2,5	1447	91	3514	3723	3619				6,8	
		s ref		referenssi		0,1	60	5	460	416	267				0,4	
		100 s/ka		referenssi		4,2	4,1	5,2	13,1	11,2	7,4				5,7	
		ka suhde (%)				107,1	90,0	85,3	84,5	87,1	85,8					
SMA16/ Koskenkylä/ KF/ bit 50/70, bitumipit. 6,0 % (optimi).																
JÄÄTYMIS-SULAMINEN 3 % NaCl, 50 kpl 24 h syklejä																
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	sykli		2,6	1153	70,6	2639	2930	2784	57	58	58	6,0	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	sykli		3,3	1223	58,6	3498	3201	3350	57	58	58	6,2	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	sykli		2,6	1307	79,9	3024	3554	3289	57	58	58	6,2	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	sykli		2,5	1276	81,6	3043	3436	3240	57	58	58	6,0	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	sykli		2,4	847	56,0	1958	2372	2165	57	58	58	6,6	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	refer.	märkä	2,4	1522	99,6	2673	3293	2983	57	58	58	6,3	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	refer.	märkä	2,3	1534	103,4	3483	3934	3708	57	58	58	6,1	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	refer.	märkä	2,1	1439	105,6	3089	3075	3082	57	58	58	6,3	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	refer.	märkä	2,9	1292	69,7	2978	3658	3418	57	58	58	6,0	
Koskenkylä	KF	NaCl-3%	50	refer.	märkä	2,0	1644	128,2	3376	4212	3794	57	58	58	6,1	
		ka suola		sykli		2,7	1161	69	2832	3099	2965	57	58	58	6,2	
		s suola		sykli		0,3	165	11	515	422	447				0,2	
		100 s/ka		sykli		12,1	14,2	15,2	18,2	13,6	15,1				3,7	
		ka ref		referenssi		2,4	1486	101	3120	3674	3397				6,1	
		s ref		referenssi		0,3	117	19	289	423	324				0,1	
		100 s/ka		referenssi		13,1	7,9	18,5	9,3	11,5	9,5				2,1	
		ka suhde (%)				112,2	78,1	68,5	90,8	84,3	87,3					

Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymsulamiskestävyytuloksia

Jäätyminen ja sulaminen vedessä.

SMA 16 Koskenkylä, heikennetty koostumus. Kuivat referenssinäytteet

näste	testi	syklejä	testi	Ref. näyte vedessä imeytetty/varastokuiva	siirtymä	halk. ljuus	halk. vetojäykk.	halk. vetojäykk.	moduuli 15°C s1	moduuli 15°C s2	moduuli 15°C KA	Tyhjiä-tila ipk poikk.ka:sta	Tyhjiä-tila ulkom. poikk.ka:sta	Tiheys ipk poikk.ka:sta	Tiheys ipk poikk.ka:sta	Tiheys ulkomitt. mitta	Tiheys ulkomitt. ka:sta	Äänennopeus jälkeen +5°C	Äänennopeus jälkeen +20°C
SMA16/ Koskenkylä/ lentotuhka/ bitumi 50/70, bitumipit. 5,8 %.																			
U	vesi	sykli	10	sykli	2,4	1395	92	5290	4513	4901	6,3	-2,9	9,1	-5,8	2257	0,2	2191	0,6	4363
U	vesi	sykli	10	sykli	2,6	1351	83	3814	3814	3814	6,3	-3,4	9,0	-6,2	2258	0,2	2192	0,7	4207
U	vesi	sykli	10	sykli	2,2	1245	88	2051	2685	2968	6,5	-0,3	9,9	3,2	2253	0,0	2170	-0,3	4268
U	vesi	sykli	10	sykli	2,6	1346	82	3914	1874	2894	6,5	0,3	9,7	0,7	2252	0,0	2176	-0,1	4268
U	vesi	sykli	10	sykli	2,2	1296	92	2678	3225	2952	6,9	6,3	10,4	8,1	2242	-0,4	2159	-0,9	4237
	vesi		10	ku_ref	2,1	1921	147	4599	2537	3568	6,2	-2,8	7,5	-7,5	2260	0,2	2228	0,7	4138
	vesi		10	ku_ref	2,2	1562	112	2488	2499	2493	6,4	0,6	8,5	3,9	2255	0,0	2205	-0,3	4225
	vesi		10	ku_ref	2,9	1677	91	3785	3785	3785	6,8	6,3	8,9	8,7	2246	-0,4	2198	-0,8	4054
	vesi		10	ku_ref	1,9	1803	150	1992	1992	1992	6,3	-0,7	8,6	5,1	2257	0,0	2203	-0,4	4110
	vesi		10	ku_ref	2,4	1744	117	6055	2406	4231	6,1	-3,4	7,3	-10,1	2261	0,2	2233	0,9	4054
U	vesi	ka vesi	10	sykli	2,4	1327	87,6		3386	6,5			9,6		2252		2177		4313
U	vesi	s vesi	10	sykli	0,2	52	4,2		888	0,2			0,5		5		13		62
U	vesi	100 s/ka	10	sykli	6,5	3,9	4,8		26,2	3,5			5,5		0,2		0,6		2,1
	vesi	ka ref	10	ku_ref	2,3	1741	123		3214	6,4			8,1		2256		2213		
	vesi	s ref	10	ku_ref	0,3	120	22		836	0,2			0,6		5,3		14,6		
	vesi	100 s/ka	10	ku_ref	15,3	7	18		26	3,5			7,4		0,2		0,7		
	vesi	suhde (%)	10	ku_ref	9,3	76,2	71,0		105,4	102,5			118,2		99,8		98,4		
SMA16/ Koskenkylä/ lentotuhka/ bitumi 50/70, bitumipit. 5,8 %.																			
U	vesi	sykli	50	sykli	2,2	1202	85,2	3146	2871	3008	6,7	3,5	9,2	1,8	2248	-0,2	2187	-0,2	4363
U	vesi	sykli	50	sykli	2,6	1318	79,0	3240	4251	3746	6,4	-1,0	7,7	-15,2	2255	0,1	2224	1,5	4396
U	vesi	sykli	50	sykli	2,4	1363	90,5	3764	3375	3570	6,2	-3,6	7,8	-13,9	2259	0,3	2222	1,4	4331
U	vesi	sykli	50	sykli	2,3	1101	75,8	2675	2910	2792	6,6	1,9	10,4	14,9	2250	-0,1	2159	-1,5	4177
U	vesi	sykli	50	sykli	2,9	1001	55,3	2705	3618	3161	6,4	-0,8	10,2	12,4	2254	0,1	2164	-1,2	4429
	vesi		50	ku_ref	2,4	1925	128				6,1	-4,9	8,1	-5,5	2263	0,3	2213	0,5	
	vesi		50	ku_ref	2,2	1948	141				6,3	-1,5	8,2	-5,2	2258	0,1	2213	0,5	
	vesi		50	ku_ref	2,1	2042	156				6,3	-0,7	8,2	-5,2	2256	0,0	2213	0,5	
	vesi		50	ku_ref	1,9	1760	145				6,5	2,7	9,2	6,8	2251	-0,2	2188	-0,6	
	vesi		50	ku_ref	2,0	1646	129				6,7	4,4	9,4	9,0	2249	-0,3	2183	-0,8	
U	vesi	ka vesi	50	sykli	2,5	1197	77		3266	6,5			9,0		2255,1		2191,3		4339,0
U	vesi	s vesi	50	sykli	0,2	134,1	12,1		353,1	0,2			1,1		3,9		27,6		87,2
U	vesi	100 s/ka	50	sykli	9,5	11,2	15,6		10,8	2,5			12,7		0,2		1,3		2,0
	vesi	ka ref	50	ku_ref	2,1	1864	140				6,4		8,6		2255,3		2201,8		
	vesi	s ref	50	ku_ref	0,2	142	10				0,2		0,6		5,0		13,5		
	vesi	100 s/ka	50	ku_ref	7,4	8	7				6,5		3,2		0,2		0,6		
	vesi	suhde (%)	50	ku_ref	10,3	64,2	55,1				101,4		105,1		99,9		99,5		

U= uusittu koe

Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymsulamiskestävyytuloksia

Jäätyminen ja sulaminen vedessä.

SMA 16 Patavuori, optimikoostumus. Kuivat referenssinäytteet

Uusinta	nesteteesti	syklejä	testi	Ref.näyte vedessä imeytetty/varastokuiva	siirtymä mm	haik. veto-jujuus kPa	haik. veto-jäykk. MPa	moduuli 15°C s1 MPa	moduuli 15°C s2 MPa	moduuli 15°C KA MPa	Tyhjättila ipk MPa	Tyhjättila ulko-kaista %	Tyhjättila ipk poikk.kaista %	Tyhjättila ulkom.kaista %	Tiheys, ipk kg/m ³	Tiheys, ulkom.kaista %	Tiheys, ipk poikk.kaista %	Tiheys, ulkom.kaista %	Äänennopeus jälkeän +5°C m/s	Äänennopeus jälkeän +20°C m/s	
SMA16/ Patavuori/ kaikiffilleri/ bitumi 50/70, bitumipit. 5,6 % opt.																					
U	vesi	sykli	10	sykli	2,2	1680	120,2	2953	6108	4630	6,9	3,0	10,5	-9,0	2486	-0,2	2388	1,2	4410	4474	
U	vesi	sykli	10	sykli	2,3	1483	103,8	2166	6663	4414	6,2	-6,2	13,6	17,1	2502	0,4	2307	-2,2	4708	4500	
U	vesi	sykli	10	sykli	2,4	1640	108,5	4363	6566	5460	7,0	5,1	11,5	-0,9	2482	-0,4	2363	0,1	4656	4621	
U	vesi	sykli	10	sykli	2,5	1404	88,5	3464	1891	2678	6,8	2,0	11,4	-1,5	2488	-0,1	2365	0,2	4493	4364	
U	vesi	sykli	10	sykli	2,4	1418	92,5	2637	9394	6015	6,4	-4,0	10,9	-5,7	2498	0,3	2378	0,8	4594	4594	
U			10	ku_ref	2,4	1440	94	3646	3745	3695	6,3	-2,0	12,9	1,0	2500	0,1	2326	-0,1			
U			10	ku_ref	2,3	1537	105	3399	1744	2572	6,9	6,1	12,9	1,0	2486	-0,4	2326	-0,1			
U			10	ku_ref	2,5	1368	88	6236	3533	4884	6,3	-2,2	12,6	-1,2	2500	0,1	2333	0,2			
U			10	ku_ref	2,4	1317	78				6,1	-5,7	14,1	10,8	2506	0,4	2292	-1,6			
U			10	ku_ref	2,9	1415	86	3294	3294	3294	6,7	3,8	11,3	-11,5	2490	-0,3	2368	1,7			
U	vesi	ka vesi	10	sykli	2,4	1525	102,7	3116	6123	4619	6,7		11,6		2491		2360		4572		
U	vesi	s vesi	10	sykli	0,1	114	11	753	2412	1138	0,3		1,0		8		28		108		
U	vesi	100 s/ka	10	sykli	4,6	7,5	11,1	24,2	39,4	24,6	4,3		9,0		0,3		1,2		2,4		
U	vesi	ka ref	10	ku_ref	2,5	1415	90	4427	3079	3611	6,5		12,7		2496,6		2328,9				
U	vesi	s ref	10	ku_ref	0,2	74	9	1283	787	838	0,3		0,9		7,4		24,2				
U	vesi	100 s/ka	10	ku_ref	9,0	5,2	10,4	29,0	25,6	23,2	4,3		7,1		0,3		1,0				
U	vesi	suhde (%)	10	ku_ref	94,2	107,7	114,0	70,4	198,9	127,9	103,0		90,8		99,8		101,3				
SMA16/ Patavuori/ kaikiffilleri/ bitumi 50/70, bitumipit. 5,6 % opt.																					
U	vesi	sykli	50	sykli	2,8	1463	83,3	3599	3592	3596	6,9	4,2	11,5	3,7	2484	-0,3	2361	-0,5	4664	4773	
U	vesi	sykli	50	sykli	2,3	1530	106,2	3405	3771	3688	6,4	-3,5	11,2	0,5	2498	0,3	2371	-0,1	4594	4629	
U	vesi	sykli	50	sykli	2,3	1367	93,7	3429	3924	3676	7,0	4,7	11,7	5,1	2483	-0,3	2357	-0,6	4602	4567	
U	vesi	sykli	50	sykli	2,5	1484	93,8	4154	3825	3990	6,2	-7,5	9,7	-12,8	2505	0,5	2410	1,6	4560	4526	
U	vesi	sykli	50	sykli	2,3	1366	96,0	2337	3733	3035	6,8	2,0	11,5	3,4	2488	-0,1	2362	-0,4	4636	4602	
U			50	ku_ref	2,2	1907	136						6,2	-1,9			2502	0,1			
U			50	ku_ref	2,3	1877	131						6,1	-4,6			2507	0,3			
U			50	ku_ref	2,1	1514	115						6,6	4,3			2492	-0,3			
U			50	ku_ref	2,6	1439	88						6,6	3,8			2493	-0,3			
U			50	ku_ref	2,1	1530	117						6,3	-1,5			2502	0,1			
U	vesi	ka vesi	50	sykli	2,4	1442	95	3385	3769	3577	6,6		11,1		2491,5		2372,1		4611,1	4647,5	
U	vesi	s vesi	50	sykli	0,2	65	7	590	109	308	0,3		0,7		8,4		19,5		36,0	85,7	
U	vesi	100 s/ka	50	sykli	8,2	4,5	7,7	17,4	2,9	8,6	4,8		6,6		0,3		0,8		0,8	1,8	
U	vesi	ka ref	50	ku_ref	2,3	1654	117						6,4				2499				
U	vesi	s ref	50	ku_ref	0,2	197	17						0,2				6				
U	vesi	100 s/ka	50	ku_ref	8,3	11,9	14,2						3,4				0,2				
U	vesi	suhde (%)	50	ku_ref	107,7	87,2	80,8						174,7				94,9				

Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymsulamiskestävyytuloksia

Jäätyminen ja sulaminen suolaliuoksessa

SMA 16 Koskenkylä heikennetty koostumus, Kuivat referenssinäytteet.

neste	syk- lejä	Ref. näyte vedessä imeytetty/ varastokuiva	siir- tymä	halkaisu- veto- lujuus	halkaisu- veto- jäykkyyys	moduli 15°C s1	moduli 15°C s2	moduli 15°C KA	Tyrjä- tila ipk	Tyrjätila ipk poikk. ka:sta	Tyrjätila uiko- mitta	Tyrjätila ulkom. poikk. ka:sta	Tiheys ipk kg/m3	Tiheys ipk poikk. ka:sta	Tiheys uiko- mitta	Tiheys ulkomitt a poikk. ka:sta	Äänen- nopeus ennen +5°C	Äänen- nopeus jälkeen +5°C	Äänen- nopeus jälkeen +20°C	
																				mm
SMA16/ Koskenkylä/ lentotuhka/ bitumi 50/70, bitumipit. 5.8 %.																				
NaCl-3%	10	sykli		2,4	1720	112	2303	2303	6,1	-4,0	8,0	-6,8	2262	0,3	2217	0,6	4444		4412	
NaCl-3%	10	sykli		2,5	1566	97			6,4	-0,1	8,5	0,0	2256	0,0	2203	0,0	4348		4478	
NaCl-3%	10	sykli		2,6	1227	73	2815	4003	3409	6,2	-3,6	8,7	1,4	2261	0,2	2201	-0,1	4348		4412
NaCl-3%	10	sykli		2,1	1339	101	3009	2790	2899	6,5	1,2	9,4	9,7	2254	-0,1	2183	-0,9	4545		4615
NaCl-3%	10	sykli		2,5	1575	99	5816	4431	5123	6,8	6,5	8,2	-4,4	2245	-0,4	2213	0,4	4348		4348
NaCl-3%	10	ku_ref		2,1	1921	147	4599	2537	3568	6,2	-3,2	7,5	-11,8	2260	0,2	2228	1,1	4138		4138
NaCl-3%	10	ku_ref		2,2	1562	112	2488	2499	2493	6,4	0,2	8,5	-0,9	2255	0,0	2205	0,1	4225		4225
NaCl-3%	10	ku_ref		2,9	1677	91	3785		3785	6,8	5,9	8,9	3,7	2246	-0,4	2196	-0,3	4054		4110
NaCl-3%	10	ku_ref		1,9	1803	150	1992	1992	1992	6,3	-1,1	8,6	0,2	2257	0,0	2203	0,0	4110		4110
NaCl-3%	10	ku_ref		2,4	1744	117	6055	2406	4231	6,1	-3,7	7,3	-14,3	2261	0,2	2233	1,3	4054		4054
ka suola	10	sykli		2,4	1485	97	3486	3741	3434	6,4	8,5	8,5	2255	2203	2203	4407	4453	4453	4453	
s suola	10	sykli		0,2	178	13	1370	695	1051	0,2	0,5	0,5	6	12	12	79	79	91	91	
ka ref	10	ku_ref		7,8	12,0	13,2	39,3	18,6	30,6	3,8	5,7	1,8	0,3	0,5	0,5	#DIV/0!	1,8	2,0	2,0	
s ref	10	ku_ref		2,3	1741	123	4232	2358	3214	6,4	8,1	8,1	2256	2213	2213	#DIV/0!	#DIV/0!	4116	4116	
100 s/ka	10	ku_ref		15,3	6,9	18,2	30,6	9,2	26,0	3,5	7,4	0,2	0,2	0,7	0,7			1,5	1,5	
ka suhde	10	ku_ref		106,5	85,3	78,5	82,4	168,6	106,8	100,4	104,8	100,0	100,0	99,6	99,6	108,2	108,2	108,2	108,2	
SMA16/ Koskenkylä/ lentotuhka/ bitumi 50/70, bitumipit. 5.8 %.																				
NaCl-3%	50	sykli		2,8	1315	74	2604	5907	4256	6,3	-1,7	9,5	2,1	2258	0,1	2181	-0,2	4545		4317
NaCl-3%	50	sykli		2,8	1340	75	2909	4110	3510	6,5	2,1	9,8	5,6	2252	-0,1	2173	-0,6	4286		4138
NaCl-3%	50	sykli		2,7	1406	82	5746	2933	4339	6,1	-4,8	8,2	-11,6	2263	0,3	2211	1,2	4380		4225
NaCl-3%	50	sykli		2,2	1386	97	2803	2987	2895	6,7	4,7	9,3	0,6	2248	-0,3	2184	-0,1	4309		4279
NaCl-3%	50	sykli		3,2	1105	55	2867		2867	6,4	-0,3	9,6	3,3	2256	0,0	2178	-0,3	4309		4047
NaCl-3%	50	ku_ref		2,4	1925	128				6,1	-4,9	8,1	-5,5	2263	0,3	2213	0,5			
NaCl-3%	50	ku_ref		2,2	1948	141				6,3	-1,5	8,2	-5,2	2258	0,1	2213	0,5			
NaCl-3%	50	ku_ref		2,1	2042	156				6,3	-0,7	8,2	-5,2	2256	0,0	2213	0,5			
NaCl-3%	50	ku_ref		1,9	1760	145				6,5	2,7	9,2	6,8	2251	-0,2	2188	-0,6			
NaCl-3%	50	ku_ref		2,0	1646	129				6,7	4,4	9,4	9,0	2249	-0,3	2183	-0,8			
ka suola	50	sykli		2,7	1310	77	3386	3984	3573	6,4	9,3	9,3	2255	2186	2186	4366	4201	4201	4201	
s suola	50	sykli		0,3	108	14	1185	1206	635	0,2	0,6	0,6	5	13	13	95	95	98	98	
100 s/ka	50	sykli		10,7	8,2	17,7	35,0	30,3	17,8	3,2	6,0	0,2	0,2	0,6	0,6	2,2	2,2	2,3	2,3	
ka ref	50	ku_ref		2,1	1864	140			3216	6,4	8,6	8,6	2255	2202	2202	4366	4201	4201	4201	
s ref	50	ku_ref		0,2	142	10			325	0,2	0,6	0,6	5	13	13	95	95	98	98	
100 s/ka	50	ku_ref		7,4	7,6	7,4			10,1	3,2	6,5	0,2	0,2	0,6	0,6	2,2	2,2	2,3	2,3	
ka suhde	50	ku_ref		130,7	70,3	54,7			111,1	100,1	107,8	100,0	100,0	99,3	99,3	108,2	108,2	108,2	108,2	

Yksittäisten SMA-näytteiden jäätymsulamiskestävyytuloksia

Jäätyminen ja sulaminen suolaliuoksessa

SMA 16 Patavuori, optimikoostumus. Kuivat referenssinäytteet

neste	syk- lejä	testi	vedessä imeytetty / varastokuiva	siir- tymä	halkaisu- veto- lujuus	halkaisu- veto- jäykkyys	moduuli 15°C s1	moduuli 15°C s2	moduuli 15°C KA	Tyhjä- tila ipk	Tyhjätila ipk poikk. ka:sta	Tyhjätila ulkom. poikk. ka:sta	Tiheys ipk kg/m3	Tiheys ipk poikk. ka:sta	Tiheys ulkom. mitta	Tiheys ulkomittai- ka:sta	Äänen- nopeus jälkeen +5°C	Äänen- nopeus jälkeen	m/s	m/s	
																					mm
SMA16/ Patavuori/ kalkifilleri/ bitumi 50/70, bitumipit. 5,6 % opt. JÄÄTYMIS-SULAMINEN 3 % NaCl, 10 kpl 24 h syklejä																					
NaCl-3%	10	sykli		2,7	1133	67	1685	3194	2440	6,3	-4,0	14,4	18,7	2502	2385	2285	-2,6			4371	
NaCl-3%	10	sykli		2,6	1535	93	5460	2771	4116	6,2	-4,6	10,6	-12,1	2503	0,3	2355	1,7	4552		4656	
NaCl-3%	10	sykli		2,6	1456	87	2045	2364	2204	7,1	9,4	13,3	10,2	2479	-0,7	2313	-1,4	4528		4684	
NaCl-3%	10	sykli		2,8	1350	77	3654	1892	2773	6,3	-2,6	11,6	-4,4	2500	0,2	2360	0,6	4326		4420	
NaCl-3%	10	sykli		2,9	1533	84	4265	3410	3837	6,6	1,7	10,6	-12,4	2492	-0,1	2386	1,7	4364		4364	
NaCl-3%	10	ku_ref	kuiva	2,4	1440	94	3646	3745	3695	6,3	-2,0	12,9	1,0	2500	0,1	2326	-0,1				
NaCl-3%	10	ku_ref	kuiva	2,3	1537	105	3399	1744	2572	6,9	6,1	12,9	1,0	2486	-0,4	2326	-0,1				
NaCl-3%	10	ku_ref	kuiva	2,5	1368	88	6236	3533	4884	6,3	-2,2	12,6	-1,2	2500	0,1	2333	0,2				
NaCl-3%	10	ku_ref	kuiva	2,4	1317	88				6,1	-5,7	14,1	10,8	2506	0,4	2292	-1,6				
NaCl-3%	10	ku_ref	kuiva	2,9	1415	76			3294	6,7	3,8	11,3	-11,5	2490	-0,3	2368	1,7				
ka suola	10	sykli		2,7	1401	82	3422	2726	3074	6,5	6,5	12,1		2495		2346		4386		4495	
100 s/ka	10	sykli		0,1	150	9	1402	551	764	0,3		1,5		9		40		142		136	
				3,6	10,7	10,8	41,0	20,2	24,8	5,2		12,4		0,4		1,7		3,2		3,0	
ka ref	10	ku_ref	kuiva	2,5	1415	90	4427	3079	3611	6,5		12,7		2497		2329					
s ref	10	ku_ref	kuiva	0,2	74	9	1283	787	838	0,3		0,9		7		24					
100 s/ka	10	ku_ref	kuiva	9,0	5,2	10,4	29,0	25,6	23,2	4,3		7,1		0,3		1,0					
ka suhde	10	ku_ref	sykl / ku_ref	108,5	99,0	90,6	77,3	88,5	85,1	100,9		95,0		99,9		100,7					
SMA16/ Patavuori/ kalkifilleri/ bitumi 50/70, bitumipit. 5,6 % opt. JÄÄTYMIS-SULAMINEN 3 % NaCl, 50 kpl 24 h syklejä																					
NaCl-3%	50	sykli		2,5	1547	99	2799	4562	3680			6,6	2,8			2494	-0,2	4396		4333	
NaCl-3%	50	sykli		2,6	1458	89	3221	5415	4318			6,2	-2,3			2502	0,2	4371		4310	
NaCl-3%	50	sykli		2,8	1579	89	2852	3725	3288			6,1	-3,9			2505	0,3	4493		4396	
NaCl-3%	50	sykli		3,0	1639	86	6664	2977	4821			6,7	5,2			2490	-0,4	4214		4214	
NaCl-3%	50	sykli		3,6	1120	49						6,3	-1,7			2501	0,1	4364		4273	
NaCl-3%	50	ku_ref	kuiva	2,2	1907	135						6,2	-2,3			2502	0,2				
NaCl-3%	50	ku_ref	kuiva	2,3	1877	131						6,1	-5,0			2507	0,3				
NaCl-3%	50	ku_ref	kuiva	2,1	1514	115						6,6	3,8			2492	-0,3				
NaCl-3%	50	ku_ref	kuiva	2,6	1439	88						6,6	3,3			2493	-0,2				
NaCl-3%	50	ku_ref	kuiva	2,1	1530	117						6,3	-1,9			2502	0,1				
ka suola	50	sykli		2,9	1469	82	3884	4170	4027			6,4				2498		4368		4305	
s suola	50	sykli		0,4	184	17	1613	912	587			0,2				6		90		61	
100 s/ka	50	sykli		13,6	12,5	20,8	41,5	21,9	14,6			3,4			0,2			2,1		1,4	
ka ref	50	ku_ref	kuiva	2,3	1654	117			4442			6,4			2499						
s ref	50	ku_ref	kuiva	0,2	197	17			1073			0,2			6						
100 s/ka	50	ku_ref	kuiva	8,3	11,9	14,2			24,2			3,4			0,2						
ka suhde	50	ku_ref	mä_sykli / ku_ref	128,8	88,8	70,4			90,6			100,4			100,0						

SMA 16/ Koskenkylä massakoostumus paine-iskukokeissa

DESTIA

Pvm:
18.11.2010
Nimi:
Sami Similä

ASFALTIN SUHTEITUS

Työmaa: SMA16 Koskenkylä avoin
Bitumimäärä[%]: 5.2

Lajitteet

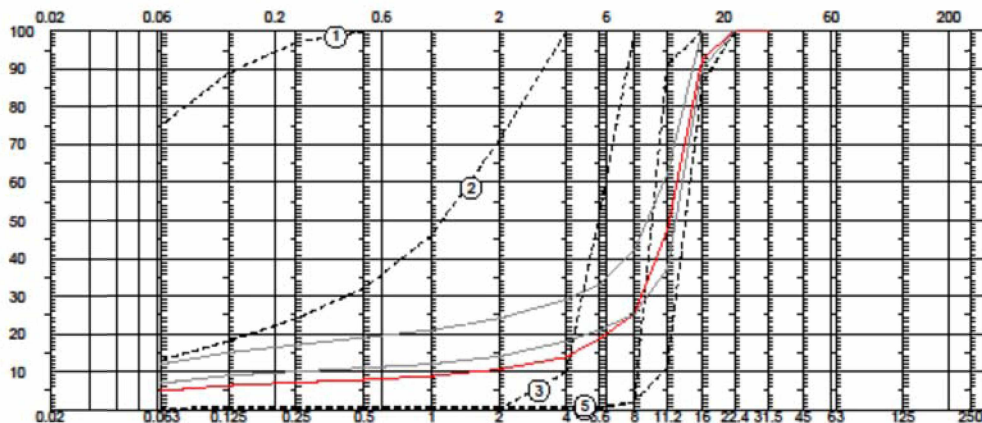
Lajite 1 KF, Sipoo
Lajite 2 CUT 0/4 Koskenkylä
Lajite 3 CUT 4/8 Koskenkylä
Lajite 4 CUT 8/11 Koskenkylä
Lajite 5 KaM 11/16 Koskenkylä

Massa: SMA 16
Bitumityyppi: B 50/70
Suhteitus -%
4.5 %
7.0 %
11.5 %
19.0 %
58.0 %

Seula	Tulos	Sall.ero	
[mm]	Läp.-%	Massa	Tie
31.5	100.0		
22.4	100.0		
16	92.4	-8	+5
11.2	47.2		
8	25.0	± 7	± 6
5.6	18.6		
4	13.8		
2	10.6	± 6	± 4
1	8.8		
0.5	7.9	± 4	± 3
0.25	7.2		
0.125	6.4		
0.063	5.0	± 2	± 2

Kuitu -%: EKI-12 0,3 %

Kommentti:



Copyright © Cuzze Ltd, licenoe: Destia

Allekirjoitus: _____

SMA 16/ Patavuori massakoostumus paineiskukokeissa

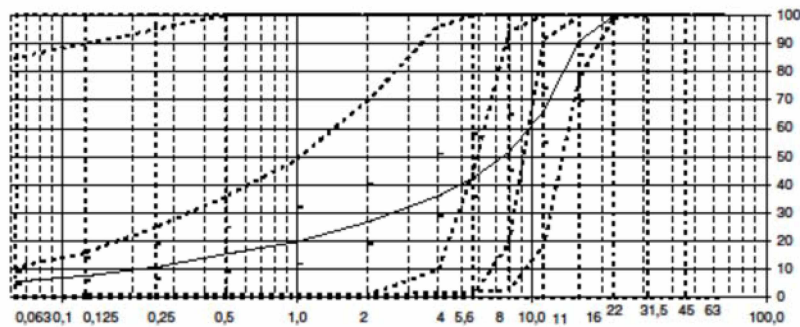


Keskuslaboratorio

SUHTEITUS

17.02.11

Päälyste:	AB22						ASFADUR 2011		Projektinnumero:	11S6		
Asf.asema:	Laboratorio											
Sideaine:	B50/70	4,9	%									
Täytejauhe:	LT	1,0	%									
Lisäaine:												
Kivialaokset:	Malmgård											
OHJEALUE												
Numero	LT	KaM0/3	KaM3/8	KaM8/11	KaM11/22			Bitumi	Alaraja	Yläraja		
Nimi								Ohje				
Tiheys	2200	2650	2650	2650	2650	2700	2700					
%-osuudet	1	33	14	10	42			Suhteit	alaraja	yläraja		
0,063	85	11	1	1	1			6				
0,125	90	16	1	1	1			8				
0,25	95	25	1	1	1			11				
0,5	100	36	1	1	1			16				
1	100	49	1	1	1			20				
2	100	70	1	1	1			27				
4	100	96	10	1	2			36				
5,6	100	100	44	1	2			42				
8	100	100	94	19	3			51				
11,2	100	100	100	91	18			66				
16	100	100	100	100	78			91				
22,4	100	100	100	100	99			100				
31,5	100	100	100	100	100			100				
45	100	100	100	100	100			100				
63	100	100	100	100	100			100				



Kuvaajassa ohjealue		2		Kuvaajassa normialue	
Lisätietoja					
Tehnyt:	Vesa Laitinen			Tarkastanut:	
LEMMINKAINEN INFRA OY			Posti		Puh.no 02071 5000
Keskuslaboratorio			PL 10		Fax no 02071 53915
Sammonmäki Tuusula			04361 TUUSULA		Internet www.lemminkainen.fi

Paineiskumenetelmän esikoe kuormitustason valintaa varten

Puolisiniaallon muotoinen kuormitus metalli vasten metallia (ilman asfalttia)

Esikoemittaus ilman asfalttinäytettä ja vettä tehtiin kuormitustason esivalintaa varten. Kuormituksen aikana metallipinta oli vasten metallia kuivana (ilman asfalttinäytettä ja vettä). Siirtymä mitattiin kuormitusleukojen välin muutoksena.

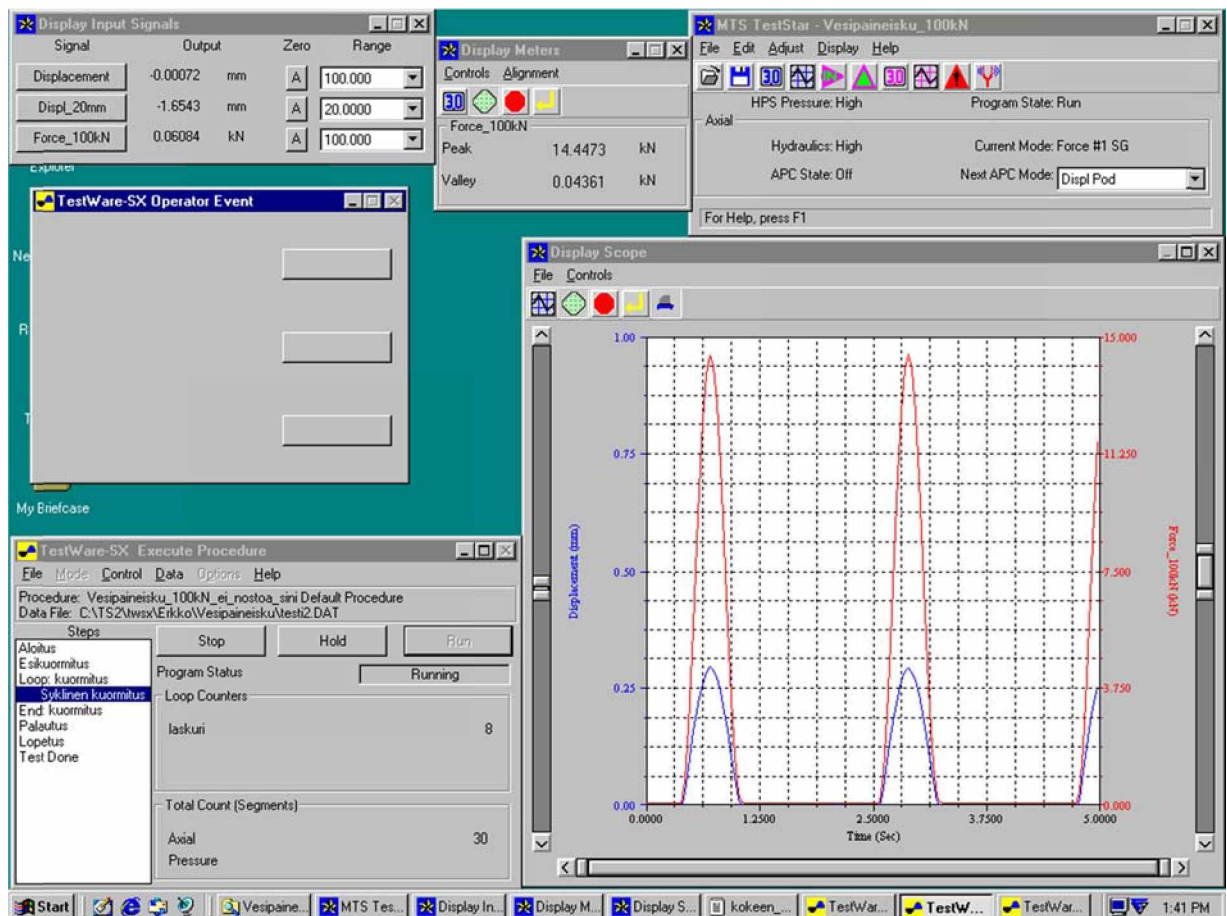
Kun kuormitusmännän metalli kuormitti suoraan näytteen metallialustaa, siirtymä kertoi, paljonko pelkkä kuormituslaitteisto puristui kokoon kuormituksen aikana.

Kuormituskäyrän muoto oli likimäärin puolisiniaalto. Kuormitusvaihe näkyy kuvassa puolisinikäyrän muotoisena ja lepovaiheen kuormitus näkyy tasanteena lähellä nolaa. Lepovaihe on pitempi kuin kuormitusvaihe, joten kuormituskäyrän muoto ei ole aivan puolisinikäyrän mukainen.

Maksimivoima: 1400 kN (punainen käyrä)

Maksimi pintapaine: 190 kPa

Maksimikuormaa vastaava siirtymä: 0,3 mm (sininen käyrä)



Puolisiniaallon muotoinen kuormitus metalli vasten asfaltin pintaa

Esikoe: Kuormitus asfaltin pintaa vasten kuivana

Kuormituskäyrän muoto oli likimäärin puolisiniaalto

Maksimivoima: 1400 kN (punainen käyrä)

Maksimi pintapaine: 190 kPa

Maksimikuormaa vastaava siirtymä: 1,6 mm (sininen käyrä)

