



Aalto-yliopisto

Insinööritieteiden korkeakoulu

Helena Lehtimäki

Asfalttirouheen elvyttäminen keveillä öljytuotteilla

Diplomityö, joka on jätetty
opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Espoossa 11.1.2012

Valvoja: Professori Terhi Pellinen

Ohjaajat: Professori Terhi Pellinen
Diplomi-insinööri Timo Blomberg

AALTO-YLIOPISTO INSINÖÖRITIEIDEIN KORKEAKOULU PL 12100, 00076 Aalto http://www.aalto.fi	DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Helena Lehtimäki		
Työn nimi: Asfalttirouheen elvyttäminen keveillä öljytuotteilla		
Tutkinto-ohjelma: Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka		
Pääaine: Liikenne- ja tietekniikka	Opetusyksikön koodi: R3004	
Työn valvoja: professori Terhi Pellinen		
Työn ohjaajat: professori Terhi Pellinen ja diplomi-insinööri Timo Blomberg		
<p>Asfalttirouhe on murskattua tai jyrskyttä vanhaa asfalttipäällystettä, jota voidaan käyttää uusioasfalttipäällysteen raaka-aineena. Asfalttirouheen sisältämä bituminen sideaine (RAP-sideaine) on kovettunut ja haurastunut päällysteen käyttöön myötä. Elvyttämisen tavoitteena on palauttaa sideaineen ominaisuudet entiselle tai lähes entiselle tasolle. Elvyttiminä on käytetty pehmeiden bitumilaatujen lisäksi bitumiliuoksia, -emulsioita ja muita lisäaineita, kuten mäntyöljypikeä. Ympäristöarvojen korostuessa ja uusiopäällysteiden yleistessä on alettu tutkia ympäristöystävällisempien tuotteiden käyttöä elvyttiminä. Tavoitteena on vähentää PAH-yhdisteitä sisältävien lisäaineiden käyttöä ja vähentää haihtuvien orgaanisten hiilivetyjen päästöjä uusiopäällysteiden laadusta tinkimättä.</p> <p>Tässä diplomityössä tutkittiin neljän erilaisen tuotteen ominaisuuksia asfalttirouheen elvyttiminä. Tutkitut tuotteet olivat uusiutuvista raaka-aineista NExBTL -prosessilla valmistettu biofluksi, korkeasti jalostetut puhtaat prosessiöljyt Nytex 810 ja Nytex 820 sekä viskositeettiluokiteltu bitumi V1500. Tuotteiden soveltuvuutta elvyttimiksi arvioitiin selvittämällä niiden vaikutuksia RAP-sideaineen reologisiin ominaisuuksiin, ja tutkimalla niiden käyttäytymistä uusiopäällysteessä. Tutkimuksessa selvitettiin, onko eduksi lisätä elvytin suoraan asfalttirouheeseen sen sijaan, että elvytin lisätään uusiomassaan lisäsideaineeseen sekoitettuna, kuten tyyppillisesti on tehty. Lisäksi tutkittiin, onko rouheen ja elvyttimen esivaikutusajan pituudella vaikutusta uusiopäällysteen ominaisuuksiin.</p> <p>Sideaineiden laboratoriotutkimuksia varten valmistettiin elvytettyjä RAP-sideainenäytteitä, joiden ominaisuuksia verrattiin tuoreeseen 70/100 -bitumiin. Uusiopäällysteiden ominaisuuksien tutkimiseksi laboratoriossa valmistettiin elvytettyjä uusioasfalttimassoja eri sekoitustavoilla ja säilytysajoilla. Tarvitavat elvytinmäärät laskettiin siten, että sideaineseoksen tunkeumatavoite 25 °C:ssa oli 85 l/10 mm. Lisäksi tutkimuksessa haettiin käytännön kokemuksia kenttäkokeilla, joiden yhteydessä päällystettiin koekatu biofluksilla elvytetyllä uusiomassalla.</p> <p>Tutkimustulosten perusteella voitiin todeta, että tutkimukseen valitut tuotteet ovat käyttökelpoisia asfalttirouheen elvyttimiä. Kaikki elvyttimet palauttivat RAP-sideaineen ominaisuudet tavoitellulle 70/100 -bitumin tasolle. Lisäksi öljymäisten elvyttimien (biofluksi ja Nytex -öljyt) havaittiin parantavan sideaineen deformaatio- ja kylmäominaisuuksia 70/100 -bitumiin verrattuna. Elvyttimen lisääminen suoraan asfalttirouheeseen paransi uusiomassojen työstettävyyttä ja alensi hieman koekappaleiden lujuutta. Lisäksi elvyttimen lisääminen suoraan asfalttirouheen joukkoon helpottaa sideaineiden käsittelyä asfalttiasemilla. Esivaikutusaikaa pidentämällä ei saavutettu merkittävää lisäetua. Tutkimuksia on suositeltavaa jatkaa seuraamalla päällysteiden käyttäytymistä pitkällä aikavälillä ja tutkimalla elvytettyjen sideaineiden vanhenemisominaisuuksia.</p>		
Päivämäärä 11.1.2012	Kieli: suomi	Sivumäärä: 105 + 43
Avainsanat: asfalttirouhe, elvytin, kevyet öljymäiset tuotteet, uusioasfaltti, kuumasekoitus, bituminen sideaine		

AALTO UNIVERSITY SCHOOL OF ENGINEERING PO Box 12100, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi	ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Helena Lehtimäki		
Title: Lightweight oil products as rejuvenators for reclaimed asphalt pavement		
Degree Programme: Transportation and environmental engineering		
Major: Transportation and highway engineering	Code: R3004	
Supervisor: Professor Terhi Pellinen		
Instructors: Professor Terhi Pellinen and M.Sc. (tech) Timo Blomberg		
<p>Reclaimed asphalt pavement (RAP) can be used as a raw material in recycled hot mix asphalts. The binder in the RAP is typically hard and brittle due to the aging of the bitumen. The purpose of rejuvenation is to restore the characteristics of the RAP-binder. Traditionally softer bitumen grades and different additives have been used as rejuvenators. Environmental aspects and increasing use of RAP in pavements have promoted the research of environmentally friendly rejuvenators. The goal is to limit the use of additives that contain polyaromatic hydrocarbons and to reduce the emissions of volatile organic compounds without compromising the quality of the recycled pavement.</p> <p>The primary goal was to evaluate the use of four different products as rejuvenators: bioflux, Nytex 810, Nytex 820 and V1500. Bioflux is a product of NExBTL -process and made of renewable raw materials, Nytex 810 and Nytex 820 are high processed hydrated oils, and V1500 is the softest bitumen available on the national market. The effectiveness of the rejuvenators was evaluated by their influence on the rheological properties of the extracted RAP-binder and the mechanical properties of the mixture fabricated using RAP. The secondary goal was to investigate the possible benefits of adding the rejuvenator straight into the RAP instead of using the conventional method of mixing the rejuvenator with the binder. The effect of fluxing time on the properties of recycled asphalt mixture was also investigated.</p> <p>Rejuvenated binder extractions were tested in the laboratory and the results were compared with the virgin 70/100 Pen bitumen. Hot recycled asphalt mixtures with the four rejuvenators were manufactured in the laboratory varying mixing methods and fluxing times to study the properties of the compacted mixture. The amount of rejuvenator was calculated targeting to 85 1/10 mm penetration of the total amount of binder. In addition to the laboratory study, field testing was performed to gain practical knowledge from production. The trial site was paved with hot recycled asphalt concrete rejuvenated with bioflux. The rejuvenator was added straight into the RAP at the mixing plant.</p> <p>The results showed that the products investigated are suitable as rejuvenators. The binders rejuvenated with the oily products (bioflux and Nytex -oils) suggested improved resistance against permanent deformation and low temperature cracking compared to the virgin 70/100 Pen binder. Adding the rejuvenator directly into the RAP improved the workability of the recycled asphalt mixtures and slightly decreased the indirect tensile strength of the asphalt samples. Extending the duration of fluxing time did not have a significant effect on the properties of the pavement. It is recommended to continue the work with a follow-up research to study the effects of longer curing time on pavement properties. Also, the aging properties of the rejuvenated bitumen should be studied further.</p>		
Date: 11.1.2012	Language: Finnish	Number of pages: 105 + 43
Keywords: reclaimed asphalt pavement, RAP, lightweight oil products, rejuvenator, recycled hot mix asphalt, bituminous binder		

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmässä. Diplomityön tilaajat olivat Nynas Oy ja NCC Roads Oy, joita kiitän mahdollisuudesta työskennellä erittäin mielenkiintoisen aiheen parissa.

Diplomityön ohjaajina toimivat professori Terhi Pellinen ja diplomi-insinööri Timo Blomberg, joiden asiantuntevan ja kunnianhimoisen ohjauksen ansiosta tämän laajan diplomityön toteuttaminen oli mahdollista. Heidän lisäksi työn ohjaukseen osallistuivat Jarkko Valtonen Aalto-yliopistosta, Jussi Tuominen NCC Roads Oy:stä sekä Tapio Kärkkäinen Nynas Oy:stä. Kiitän koko ohjausryhmää korvaamattomista neuvoista ja opettavaisesta kokemuksesta. Erityiset kiitokset osoitan Jarkolle avusta diplomityön käytännön järjestelyissä.

Kiitän Neste Oil Oy:n Porvoon tutkimuslaboratorion henkilökuntaa sideainekokeiden tekemisestä; tulokset nousivat diplomityön kannalta erittäin merkittäviksi. Lisäksi kiitän Turun yliopiston geologian laitosta hienoaineksen ominaispinta-alan tutkimuksista. Kiitän myös NCC Roads Oy:n asfalttiaseman henkilökuntaapanostuksesta diplomityön toteuttamiseen sekä Destia Oy:n Maantiekylän asfalttiaseman henkilökuntaa avusta koekappaleiden sahaamisessa.

Liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmä on tarjonnut hyvän työympäristön ja mielenkiintoisia työtehtäviä vuosien varrella - osoitan lämpimät kiitokseni koko henkilökunnalle.

Kiitos Matiakselle tuesta ja ymmärryksestä läpi koko pitkän projektin.

Espoossa 11.1.2012

Helena Lehtimäki

Sisällysluettelo

Alkusanat	4
Sisällysluettelo	5
Lyhenteet ja käsitteet	7
1 Johdanto.....	9
1.1 Työn tausta	9
1.2 Tutkimusongelma.....	10
1.3 Tutkimuksen tavoite.....	10
1.4 Tutkimuksen rakenne	11
1.5 Tutkimuksen rajaus	12
2 Uusioasfaltin raaka-aineista ja ominaisuuksista	13
2.1 Yleistä uusioasfalttimassojen raaka-aineista	13
2.2 Bitumisen sideaineen ominaisuudet ja vanheneminen	13
2.3 Asfalttirouheen ominaisuudet.....	23
2.4 Vanhentuneen sideaineen elvyttäminen	25
2.5 Elvytettyjen uusioasfalttipäällysteiden ominaisuuksia.....	29
3 Laboratorio-osuudessa käytetyt raaka-aineet ja tutkimusmenetelmät.....	37
3.1 Tutkimusasetelma.....	37
3.2 Raaka-ainetutkimukset.....	38
3.3 Elvyttimien käyttäytyminen asfalttirouheen kanssa.....	42
3.4 Elvyttimien käyttäytyminen uusiomassassa	43
4 Kenttäkokeet	50
4.1 Koekohteen suunnittelu ja päällystys	50
4.2 Koekappaleiden tiivistäminen ja tutkimukset	51
4.3 Elvytetyn asfalttirouheen ulkosäilytys	52
5 Tutkimustulokset	54
5.1 Laboratorio-osuus.....	54
5.2 Kenttäkokeet.....	65
6 Tutkimustulosten tarkastelu.....	69

6.1	Elvytettyjen sideaineiden ominaisuudet.....	69
6.2	Elvyttimien käyttäytyminen asfalttirouheen kanssa.....	80
6.3	Elvyttimien käyttäytyminen uusiomassoissa.....	83
6.4	Kenttäkokeet.....	90
7	Yhteenveto, päätelmät ja suositukset.....	96
	Lähteet.....	101
	Liitteet.....	106

Lyhenteet ja käsitteet

AB	Asfalttibetoni; Asfalttityyppi, jonka rakeisuuskäyrä on jatkuva ja sideaineen tunkeuma alle 250 1/10 mm
Biofluksi	NExBTL prosessin lopputuote
BBR	Bending Beam Rheometer; Laite sideaineiden kylmien lämpötilojen taivutusvirumajäykkyyden mittaamiseen
DSR	Dynamic Shear Rheometer; Mittauslaite aineiden reologisten ominaisuuksien tutkimiseen erilaisilla kuormitusajoilla ja lämpötiloilla
Fluksattu bitumi	Bitumista ja liuottimesta koostuva bitumiliuos
HVL	Halkaisuvetolujuus
Hydraus	Kemiallinen reaktio, jossa molekyylin tyydyttymättömiin sidoksiin liitetään vetyä
ICT	Intensive Compaction Tester. Kiertotiivistin asfalttikappaleiden tiivistämiseen
MSCR	Multiple Stress Creep and Recovery. Sideaineiden deformaatio-ominaisuuksia mittaava menetelmä
NExBTL	Neste Oil Oy:n patentoima prosessi, jolla uusiutuvista raaka-aineista tuotetaan biodieselä
Nytex	Nynas Oy:n tuotenimi prosessoiduille öljyille
PANK-mentelmä	Päällystealan neuvottelukunnan julkaisema tutkimusmenetelmä
PG-luokitus	Performance Grade –luokitus; Standardin AASHTO M320-10 mukainen bitumien käyttölämpötiloihin perustuva luokittelu
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement; Asfalttirouhe
RC- %	Asfalttirouheen osuus uusiomassassa, esimerkiksi AB16 RC40 massan valmistuksessa on käytetty 40 massa- % asfalttirouhetta
Remix	Päällystysmenetelmä, jossa uusiomassaa valmistetaan suoraan tien päällä jyrsimällä kuumennettu vanha päällyste ja lisäämällä sen joukkoon uutta asfalttimassaa
Reologia	Tutkii nesteiden muodonmuutoksia ja virtausta

SFS-EN -standardi	Suomen Standardoimisliiton (SFS) vahvistama ja Eurooppalaisen standardoimisjärjestön (CEN) julkaisema yleisesti saatavilla oleva standardi
SHRP	Strategic Highway Research Program; Yhdysvaltojen kansallinen tietekninen tutkimusohjelma
SMA	Kivimastiksiasfaltti, asfalttityyppi
Tunkeuma	Sideaineen kovuutta kuvaava kokeellinen suure, joka määritetään yleensä 25 °C:n lämpötilassa, yksikkö 1/10 mm
Tyypikäyrä	Master curve / masterkäyrä; Aika-lämpötila -superpositioperiaatteen mukaisesti yhdistetyn mittaustiedon esitystapa
UTM 25 -laite	Universal Testing Machine; 25 kN hydraulipuristin asfalttikoe-kappaleiden koestukseen.
Uusioasfaltti	Asfaltti, jonka valmistuksessa on käytetty asfalttirouhetta
Uusioasfalttimassa	Uusioasfaltti ennen tiivistämistä
Uusiopäällyste	Tiivistetty uusioasfalttimassa
Variaatiokerroin	Määrittää havaintoarvojen suhteellisen hajonnan ilmoittamalla montako prosenttia havaintoarvojen keskihajonta on havaintoarvojen keskiarvosta
VFA	Tyhjätilan täyttöaste
VMA	Kiviaineksen tyhjätilan täyttöaste

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Asfalttirouhetta syntyy tiestön ylläpito- ja rakentamistoimenpiteiden yhteydessä päällysteiden purkamisen ja jyrshintöjen seurauksena. Tyypillisesti puretun tai jyrshintöjen päällysteen tilalle on laitettu täysin uusi päällystekerros, mutta asfaltin kierrättäminen osana uutta päällystettä on voimakkaasti yleistynyt. Suomessa asfaltin uusiokäyttö alkoi 1920-luvulla mutta yleistyi vasta 1970-luvulla sideaineen hinnan noustua öljykriisin seurauksena. Asfalttirouhetta voidaan hyödyntää teiden rakentamisessa ja ylläpidossa, ja se kierrätetään tavallisimmin suoraan tien päällä Remix-menetelmällä, asemasekoitteen uusiomassan raaka-aineena tai rakennekerroksissa. Suomi on noussut edelläkävijäksi uusiomassojen valmistuksessa. Vuoden 2010 tilastojen mukaan pelkästään asfalttiasemilla valmistettavat uusiomassat sisälsivät keskimäärin 12,6 % asfalttirouhetta. Uusiomassojen valmistuksen odotetaan edelleen lisääntyvän. (Blomberg ym. 2011, Lämsä 2005, Wastimo 1993)

Asfalttirouheen uusiokäytöllä saavutettavien kustannus- ja energiahyötyjen lisäksi kierrättäminen säästää uusiutumattomia luonnonvaroja. Öljyn ja sitä myötä myös bitumin hinnan nousu on lisännyt kiinnostusta uusiopäällysteitä kohtaan, samoin kuin uhkaava pula hyvälaatuisesta kiviaineksesta. Uusiopäällysteitä valmistettaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota kierrätettävän materiaalin laatuun. Asfalttirouheen bituminen sideaine on koventunut ja haurastunut hapen, UV-säteilyn ja lämpötilavaihtelujen vaikutuksesta. Asfalttipäällysteen kyky kestää toistuvaa liikennekuormitusta riippuu juuri bitumisen sideaineen reologisista ominaisuuksista. Näiden ominaisuuksien palauttamiseksi uusiopäällystettä valmistettaessa käytetään elvyttimiä, joiden tehtävänä on palauttaa asfalttirouheen sisältämän vanhan sideaineen ominaisuudet entiselle tai lähes entiselle tasolle. Elvyttiminä on käytetty erilaisia pehmeitä bitumilaatuja, bitumiemulsiota, fluksattuja bitumeja ja muita lisäaineita, kuten öljyjä ja mäntyöljypikeä. Raaka-öljyn korkean hinnan, uhkaavan raaka-ainepulan ja ympäristöarvojen korostumisen myötä katseet ovat suuntautuneet vaihtoehtoisiin materiaaleihin myös elvyttimien osalta. Pehmeämpien lisäsideaineiden tai erilaisten liuosten käytölle elvyttiminä etsitään uusia vaihtoehtoja. Näin voidaan vähentää fossiilisten raaka-aineiden kulutusta sekä karsia asfalttityömaiden terveydelle haitallisia ja ympäristöä kuormittavia VOC-päästöjä (haihtuvat orgaaniset yhdisteet). Myös polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä eli PAH-yhdisteitä sisältävien aineiden käyttöä halutaan vähentää niiden aiheuttaman syöpäriskin vuoksi. (Karlsson ym. 2006, Patosalmi 1996)

Asfalttirouheen elvyttäminen erilaisilla lisäaineilla on ollut mahdollista jo pitkään, mutta vasta viime vuosina on tutkittu rouheen elvyttämistä ympäristön kannalta hyväksyttävillä korkeasti jalostetuilla öljyillä ja biopohjaisilla tuotteilla. Tutkimuksen tarkoituksena on löytää uusia raaka-ainekoostumuksia, joita käyttämällä uusiopäällysteen laatu on riittävän

hyvä. Elvyttimiä on käytetty yli 20 vuotta, mutta niiden käytöstä uusiomassan valmistuksessa on edelleenkin erittäin vähän dokumentoitua tietoa. Erityisesti kenttäkokeiden puute on hidastanut uusien elvyttimien laajempaa käyttöönottoa. (Tyllgren 2010)

Nynas Oy aloitti vuonna 2009 tutkimuksen asfalttirouheen elvyttämisestä biofluksilla, joka on valmistettu Neste Oil Oy:n patentoimalla NExBTL prosessilla vetykäsittelystä kasviöljyistä ja eläinrasvoista. Tutkimustulokset on esitetty Pasasen (2009) kandidaatintyössä. Ruotsissa Nynas AB on ollut mukana ympäristöystävällisiä elvyttimiä koskevassa tutkimuksessa, jossa elvyttiminä käytettiin korkeajalosteista Nytex 820 -öljyä sekä rapsiöljyjohdannaisia (Tyllgren 2010).

1.2 Tutkimusongelma

Kevyiden öljytuotteiden kehitystä elvyttiminä ovat hidastaneet uusiomassan kuumasekoituksen tekniset ongelmat ja luotettavan tutkimustiedon vähäisyys. Asfalttiasemalla kuumasekoitteisessa uusiomassan valmistuksessa lämmitetty asfalttirouhe sekoitetaan uuden lisäkiiviaineksen, neutraalin sideaineen ja/tai elvyttimen kanssa. Elvyttin on tyypillisesti lisätty uusiomassaan lisäsideaineeseen sekoitettuna. Näiden sideainesekoitteiden valmistuksessa on esiintynyt ongelmia, jos elvyttimen viskositeetti on ollut hyvin erilainen kuin lisäsideaineella. Ympäristön kannalta hyväksyttävät korkeajalosteiset öljyt ovat usein viskositeetiltaan alhaisia, jolloin niiden nopea sekoittaminen lisäsideaineen kanssa on vaikeaa. Epätasainen sekoittuminen ja sen seurauksena syntyvä uusiomassan epähomogeenisuus on ollut yksi syy pehmeämpien bitumien suosimiselle elvyttiminä. (Dunn ym. 2001, Sanders 2005)

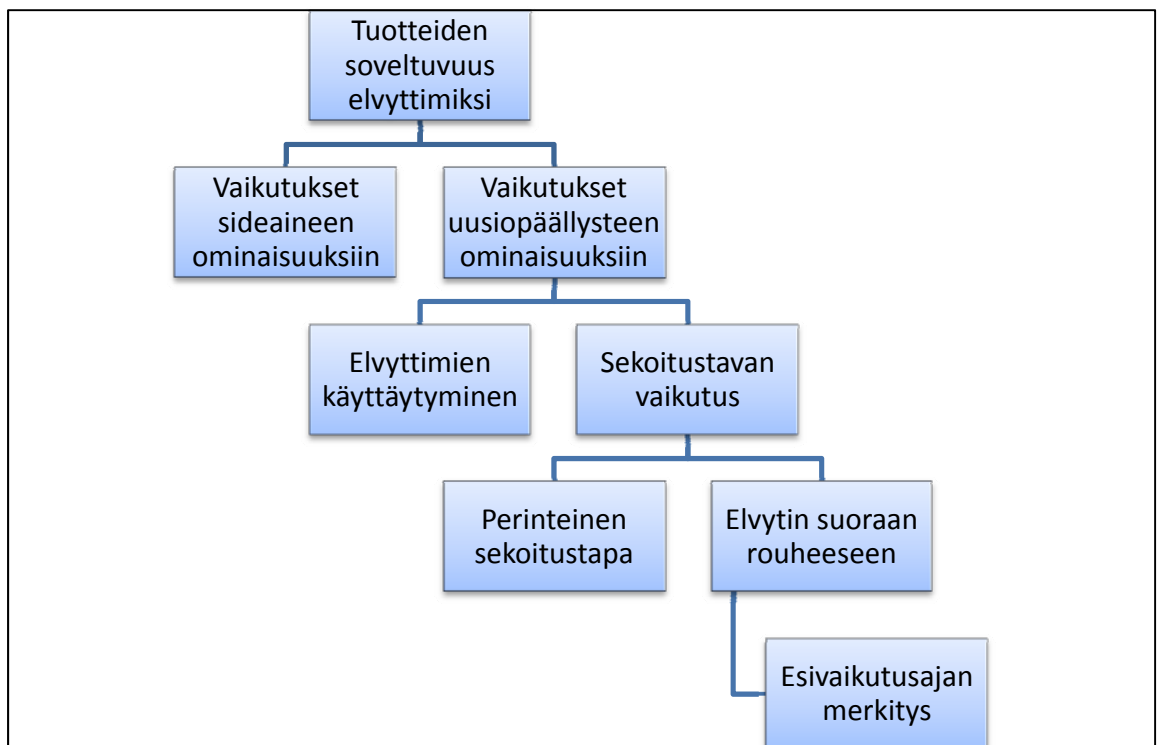
Sekoitusteknisten ongelmien ratkaisemiseksi viime aikoina on tehty kokeiluja öljymäisten elvyttimen lisäämisestä suoraan asfalttirouheeseen asemasekoitteisen uusiomassan valmistuksen yhteydessä. Esimerkiksi NCC Roadsin asfalttiasemalle on asennettu lisälaitteisto, jolla öljymäinen elvyttin voidaan ruiskuttaa asfalttirouheeseen ennen sen siirtymistä annossekoittimeen. Ruiskuttamalla elvyttin levittyy tasaisesti koko rouheannokseen, ja elvyttin pääsee vaikuttamaan suoraan rouheen sideaineeseen. Aikaväli elvyttimen lisäämisen ja sekoittimeen siirtymisen välillä on asemalla noin 17 sekuntia. Samanlaisen laitteiston käyttöä on kokeiltu myös Ruotsissa (Tyllgren 2010). Kun elvyttin lisätään suoraan rouheeseen, asfalttiasemalla ei tarvitse tehdä erillisiä sideainesekoitteita uusiomassan valmistusta varten. Uusiomassan sideaineen viskositeetti saadaan halutunlaiseksi säätämällä rouheen joukkoon lisättävän elvyttimen määrää.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää neljän valitun tuotteen käyttömahdollisuuksia asfalttirouheen vanhan sideaineen (jatkossa *RAP-sideaine*) elvyttiminä. Tutkimukseen valitut tuotteet ovat uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biofluksi, maaöljypohjaiset korkeajalostetut prosessiöljyt Nytex 810 ja Nytex 820 sekä viskositeettiluokiteltu pehmeä

bitumi V1500, jonka ominaisuuksia elvyttimenä ei ole juurikaan tutkittu. Elvyttimien ominaisuuksia on esitelty tarkemmin luvussa 3.2.2. Tuotteiden soveltumista elvyttimiksi arvioitiin tutkimalla niiden vaikutusta RAP-sideaineen reologisiin ominaisuuksiin ja kemialliseen koostumukseen. Tutkimuksessa vertailtiin valituilla tuotteilla elvytettyjen uusiopäällysteiden ominaisuuksia pehmeämmällä lisäsideaineella valmistetun uusiopäällysteen ominaisuuksiin. Näin voitiin arvioida tuotteiden käyttäytymistä uusiomassassa ja niiden vaikutuksia uusiopäällysteen ominaisuuksiin.

Tutkimuksen toinen painopiste oli uusiomassan sekoitustavan valinnassa. Tutkimuksessa haluttiin selvittää, onko eduksi lisätä elvytin suoraan asfalttiruohon joukkoon. Vertailukohtana käytettiin tyypillistä uusiomassan valmistustapaa, jossa elvytin sekoitetaan lisäsideaineeseen. Lisäksi tutkittiin elvyttimen esivaikutusajan vaikutusta uusiopäällysteen ominaisuuksiin. Pidemmän esivaikutusajan järjestämistä asfalttiasemalla kokeiltiin tutkimalla elvytetyn asfalttiruohon ulkosäilytysmahdollisuuksia kenttäkokeiden yhteydessä. Tutkimusasetelmaa on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Diplomityön tutkimusasetelma.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Tutkimus koostuu kolmesta osasta: kirjallisuusselvitys, laboratoriotutkimukset sekä kenttätutkimukset. Kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on rakentaa tutkimuksen teoreettinen pohja, jonka avulla tutkimustuloksia voidaan vertailla ja analysoida. Kirjallisuudesta selvitettiin asfalttiruohon ja elvyttimien ominaisuuksien vaikutuksia

uusiopäälysteiden laatuun. Uusiopäälysteiden raaka-aineita ja ominaisuuksia käsitellään luvussa 2.

Laboratorio-osuudessa valmistettiin uusiomassoja käyttäen valittuja lisäaineita, joiden ominaisuuksia asfalttirouheen elvyttiminä vertailtiin pelkällä lisäsideaineella valmistettuun referenssimassaan. Tutkimuksia tehtiin sekä tiivistämättömille että tiivistetyille massoille. Massoissa käytetty lisäkiviaines, -sideaine ja asfalttirouhe sekä sen osuus (40 massa- %) olivat tutkimuksessa vakioita elvyttimen ja sen käyttötavan toimiessa muuttujina. Laboratoriossa tutkittiin myös uusiomassojen raaka-aineiden perusominaisuuksia. Lisäksi sideainekokeilla tutkittiin elvyttimien vaikutusta vanhan sideaineen koostumukseen ja ominaisuuksiin. Laboratorio-osuus on esitelty luvussa 3.

Kenttäkokeiden perusteella haettiin käytännön kokemuksia laboratoriossa jo tutkittujen materiaalien toimivuudesta ja käyttömahdollisuuksista. Kenttätutkimuksissa seurattiin koekohteen päällystystä asfalttiasemalla valmistetulla uusiomassalla AB16 RC40, jossa elvyttiminä käytettiin biofluksia. Elvytettyä uusiomassaa valmistettiin kahdella eri elvytinpitoisuudella ja referenssinä pelkällä pehmeämmällä lisäsideaineella. Uusiomassoista otettiin massanäytteet, joiden ominaisuuksia tutkittiin laboratoriossa sekä tiivistämättöminä että tiivistettyinä. Koekohteen silmämääräinen kuntokatselmus tehtiin noin viisi viikkoa päällystämisen jälkeen. Kuntoarviointia on tarkoitus jatkaa pidempiaikaisesti tämän diplomityön ulkopuolella. Kenttäkokeet on esitelty luvussa 4. Laboratorio- ja kenttäkokeiden tuloksia analysoidaan luvussa 6, ja luvussa 7 on esitetty yhteenveto, päätelmät sekä jatkotutkimussuositukset.

1.5 Tutkimuksen rajaus

Tutkimus rajattiin koskemaan kulutuskerroksen asfalttibetonipäällystettä, jonka valmistuksessa on käytetty 40 massa- % asfalttirouhetta. Tutkimus käsittelee vain asfalttiasemilla tapahtuvaa uusiomassojen kuumasekoitusta.

Tutkimus koskee valittuja neljää tuotetta, joiden soveltuvuutta asfalttirouheen elvyttimiksi arvioidaan laboratorio- ja kenttäkokeiden perusteella. Elvyttimien ympäristö- ja terveysvaikutuksia arvioidaan vain lyhyesti kirjallisuusselvityksen ja tuotteiden esittelyn yhteydessä.

2 Uusioasfaltin raaka-aineista ja ominaisuuksista

2.1 Yleistä uusioasfalttimassojen raaka-aineista

Uusioasfalttimassa koostuu asfalttirouheesta, lisäkiviaineksesta, lisäsideaineesta ja mahdollisista lisäaineista, kuten elvyttimestä. Uusiomassan sisältämä asfalttirouheen osuus ilmoitetaan asfalttinormien 2011 mukaisesti massaprosentteina päällystetyypin yhteydessä RC -merkinnällä. Esimerkiksi AB16 RC40 tarkoittaa asfalttibetonipäällystettä, jonka kiviaineksen maksimiraekoko on 16 mm ja asfalttirouheen osuus 40 massaprosenttia. Lisäkiviaineksella täydennetään murskatun asfalttirouheen sisältämän kiviaineksen koostumusta siten, että saavutetaan haluttu uusioasfalttimassan kiviaineksen rakeisuus. Lisäsideaineen laadulla ja määrällä säädetään uusiomassan sideaineen kovuus ja lopullinen sideainepitoisuus. Lisäsideaineen valintaan vaikuttavat asfalttirouheen sisältämän vanhan sideaineen ominaisuudet sekä mahdollisesti käytettävät elvyttimet.

Asfalttirouheen osuus uusiomassasta vaihtelee normikohtaisten suositusten mukaisesti, ja rouheen käytölle tietyissä päällystekerroksissa on asetettu rajoituksia. Uusiopäällysteen käyttö vilkasliikenteisten väylien kulutuskerroksena vaatii rouheen ominaisuuksien kattavaa tutkimista ja huolellista massan suunnittelua, sillä uusiomassan on täytettävä samat vaatimukset kuin uusista raaka-aineista valmistetun vastaavaan käyttötarkoitukseen suunnitellun asfalttimassan. SMA-päällysteissä asfalttirouhetta ei saa käyttää. Rekola (2008) tutki diplomityössään AB16 uusiopäällysteen optimaalista RC-pitoisuutta, joka määriteltiin suurimmaksi mahdolliseksi asfalttirouheen osuudeksi, jolla päällysteen laatuvaatimukset täyttyivät, ja jonka valmistaminen asfalttiaseman tekniikalla on mahdollista. Tutkimuksen tulosten perusteella RC50 massaa voidaan pitää optimaalisena saavutetun taloudellisen hyödyn ja massan laadun kannalta, eikä massan valmistuksen yhteydessä esiintynyt teknisiä ongelmia. Asfalttinormit (2011) asettaakin kulutuskerroksen uusiopäällysteen asfalttirouheen enimmäismääräksi 50 massa- %. Tämä voidaan ylittää vain tapauskohtaisesti tilaajaan määrittelemissä kohteissa.

2.2 Bitumisen sideaineen ominaisuudet ja vanheneminen

2.2.1 Kemiallinen koostumus ja SARA -fraktiot

Bitumia saadaan käsittelemällä maaöljyn jakotislauksen pohjatuotetta, joka sisältää raakaöljyn raskaimmat komponentit. Bitumiset sideaineet ovat kemiallisesti monimutkaisia orgaanisia yhdisteitä ja niiden koostumus vaihtelee raakaöljyesiintymän alkuperän, syntymisolosuhteiden sekä iän mukaan. Bitumit koostuvat hiilivedyistä sekä muista raakaöljystä peräisin olevista kemiallisesti sitoutuneista alkuaineista, joita kutsutaan heteroatomeiksi. Tavallisesti bitumi sisältää hiiltä 80–88 %, vetyä 8–12 %, rikkiä 0–9 %, typpeä 0–2 % sekä happea 0–2 %. Lisäksi bitumissa voi esiintyä pieniä pitoisuuksia metalleja, kuten vanadiumia, nikkeliä ja rautaa. (Blomberg 1990, Lesueur 2009, Shell Bitumen U.K. 1990)

Bitumi sisältää sekä suoraketjuisia, haarautuneita, aromaattisia että rengasmaisia hiilivety-yhdisteitä. Bitumin koostumusta pyritään kuvaamaan jako- eli fraktiointimenetelmillä, jotka perustuvat bitumin komponenttien erilaiseen liukoisuuteen. Yleinen jakomenetelmä on 1970-luvulla kehitetty ohutlevykromatografia, jossa bitumista vaiheittain liuottamalla erotetaan asfalteenit, hartsit, aromaattiset öljyt ja tyydyttyneet öljyt. Nimitys SARA -fraktiot syntyy jakeiden englanninkielisistä nimistä: Saturates, Aromatics, Resins ja Asphaltenes. Fraktiojako ei ole täydellinen ja ryhmien välillä esiintyy päällekkäisyyksiä. Fraktiot koostuvat edelleen useista eri yhdisteistä eivätkä edusta puhdasta kemiallista aineryhmää. Myös eri jakomenetelmillä saadut fraktiot voivat olla huomattavan erilaisia. (Blomberg 1990, Lesueur 2009, Shell Bitumen U.K. 1990)

Fraktioiden aromaattisuus, molekyylipaino, poolisuus ja heteroatomien määrä kasvaa siirryttäessä tyydyttyneistä öljyistä asfalteeneihin. Tarkkoja molekyylipainoja ei voida ilmoittaa koostumuksen monimutkaisuuden, molekyylien yhteenliittymien ja ryhmien päällekkäisyyksien vuoksi. Asfalteenit ovat molekyylipainoltaan bitumin raskain ainesosa, joiden rakenne on kompleksisen aromaattinen. Bitumista eristettyinä asfalteenit ovat olomuodoltaan amorfisia kiinteitä aineita. Asfalteenit ovat hyvin poolisia, joten ne assosioituvat helposti toistensa kanssa. Bitumin asfalteenipitoisuudella on suuri vaikutus reologisten ominaisuuksien kannalta. Yleensä tiebitumi sisältää asfalteenia 5–25 %. Hartsit ovat poolisia aromaattisia yhdisteitä, joiden olomuoto huoneenlämmössä vaihtelee kiinteästä puolikiinteään. Hartsien osuus bitumissa on noin 30–45 %. Aromaattisten öljyjen fraktio koostuu pääosin poolittomista nafteenisista aromaateista, jotka ovat molekyylipainoltaan bitumin kevyimpiä aromaattisia hiilivetyjä. Aromaattiset öljyt muodostavat suurimman osan bitumin öljymäisestä väliaineesta: fraktion osuus bitumista vaihtelee 40 ja 65 % välillä. Tyydyttyneiden öljyjen fraktio koostuu pääosin suorista tai haarautuneista hiilivedyistä kuten parafiineista, ja fraktio on olomuodoltaan vaaleasävyinen tai väritön neste. Tyydyttyneet öljyt sisältävät myös vahamaisia ainesosia. Tyydyttyneiden öljyjen osuus bitumista on noin 5–20 %. Bitumin ominaisuudet riippuvat olennaisesti asfalteenien, hartsien, ja öljyjen kemiallisesta luonteesta, niiden suhteellisista määristä ja niiden muodostamasta rakenteesta. (Blomberg 1990, Lesueur 2009, Shell Bitumen U.K. 1990)

2.2.2 Bitumin rakenne

Kuten edellisessä luvussa todettiin, bitumi sisältää hiilivety-yhdisteitä kevyistä suoraketjuisista hiilivedyistä kompleksisiin aromaatteihin. Bitumin rakenteesta on esitetty useita malleja, joista ensimmäiset ovat peräisin jo 1900-luvun alusta (Lesueur 2009). Rakennetta on aiemmin kuvattu kolloidisella misellimallilla, jossa raskaimpien molekyylien eli asfalteenien muodostamat misellit dispergoituvat kevyemmistä molekyyleistä koostuvaan öljyiseen väliaineeseen (Shell Bitumen U.K. 1990). Pfreiffer ym. esittivät vuonna 1940 rakenteen jakamista sooli- ja geelityyppeihin (Lesueur 2009). Tiebitumien oletettiin pääosin kuuluvan näiden kahden rakennetyypin välimuotoon, jossa esiintyi kummallekin tyypille ominaisia piirteitä. Soolityypeissä asfalteenimisellien

oletettiin olevan täysin hajaantuneita, kun taas geelityypissä misellit olivat voimakkaassa vuorovaikutuksessa toistensa kanssa muodostaen jatkuvia rakenteita.

Kolloidisen mallin ei kuitenkaan katsota täysin selittävän bitumin reologista käyttäytymistä, ja useat tutkijat ovatkin esittäneet, että bitumi on rakenteeltaan homogeeninen jatkuva seos. Esimerkiksi Petersen ym. (1994a) kyseenalaistivat misellien olemassaolon ja esittivät bitumin mikrorakennemallin (dispersed polar fluid), jossa molekyylien muodostamat assosiaatiot ovat tasaisesti toisiinsa liuenneita. Assosiaatioiden oletetaan purkautuvan lämmön tai leikkauskuormituksen vaikutuksesta. Malli selitti tärkeitä fysikaalisia ilmiöitä, kuten ei-Newtoniset reologiset ominaisuudet, viskositeetin lämpötilariippuvuuden ja fyysisen palautuvan kovettumisen. Redelius (2000 ja 2004) esitti Nynasin bitumin liukoisuusmallin, jonka mukaan bitumin stabiliteetti ja lämpötilariippuva käyttäytyminen voidaan selittää Hansenin liukoisuusparametrien mukaisesti hiilivetyjen keskinäisellä liukoisuudella. Toisaalta myös kolloidisesta mallista on kehitetty moderneja versioita (Leseuer 2009).

Vaikka bitumin rakenteesta ei tällä hetkellä voidakaan esittää yksiselitteistä mallia, voidaan todeta, että bitumien ominaisuudet ovat erittäin riippuvaisia sen kompleksisesta koostumuksesta sekä siinä lämpötilan ja ajan suhteen tapahtuvista muutoksista, joita käsitellään seuraavissa luvuissa 2.2.3 ja 2.2.4.

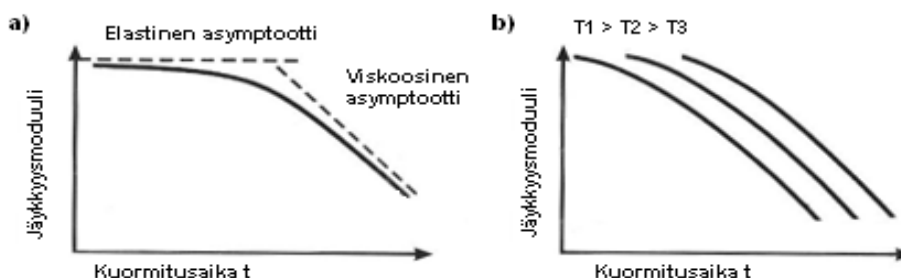
2.2.3 Bitumisen sideaineen ominaisuuksia

Sideaineen ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus asfalttipäällysteen käyttäytymiseen. Bitumiselle sideaineelle asetetaan sään- ja kulumiskestävyuden varmistamiseksi useita vaatimuksia. Ensiksi, bitumin tulee olla riittävän juoksevaa korkeissa lämpötiloissa (noin 160 °C) massan sekoittumisen ja kiviainesrakeiden peittymisen varmistamiseksi. Toiseksi, bitumin tulee olla riittävän jäykkää deformatiivisuuden estämiseksi, paikallisen ilmaston mukaisesti noin 60 °C lämpötilassa. Kolmanneksi, bitumin on oltava riittävän joustavaa alimmissa käyttölämpötiloissa päällysteen halkeilun estämiseksi. Nämä ominaisuudet ovat osittain vastakkaisia, joten päällysteeseen sopivan bitumisen sideaineen valinta on aina eräänlainen kompromissi. Valinta täytyy tehdä paikallisen ilmaston, liikennekuormituksen ja haluttujen toiminnallisten ominaisuuksien perusteella. (Leseuer 2009)

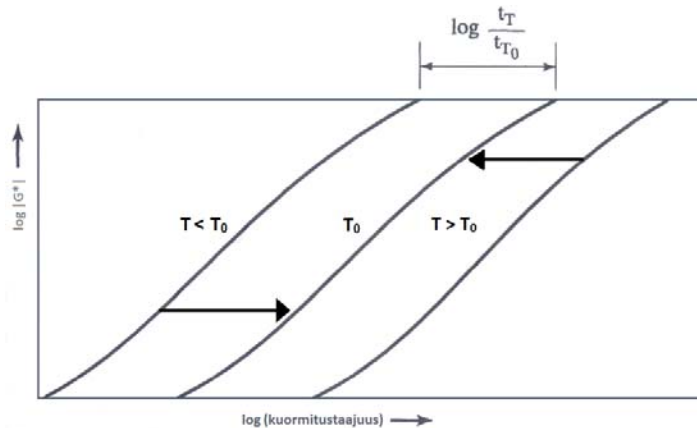
Yleensä bitumilaatujen ominaisuuksia on kuvattu yksinkertaisten empiiristen suureiden, kuten tunkeuman, pehmenemispisteen ja murtumispisteen kautta: Tunkeuma-arvo kertoo bitumin kovuuden 25 °C lämpötilassa, pehmenemispiste kuvaa bitumin pehmenemistä lämpötilan noustessa, ja murtumispisteen avulla voidaan arvioida bitumin haurastumista kylmissä lämpötiloissa. Tunkeuma on myös yleisesti käytetty bitumien luokitteluperuste. Näiden suureiden avulla voidaan arvioida bitumin käyttäytymistä asfalttipäällysteen käytön kannalta kriittisissä pisteissä, mutta ne eivät anna tarkkaa tietoa sideaineen reologisista ominaisuuksista.

Bitumi on viskoelastinen materiaali, jonka käyttäytyminen riippuu lämpötilasta ja kuormitusajasta. Korkeissa lämpötiloissa tai pitkillä kuormitusajoilla bitumi käyttäytyy viskoosin nesteen tavoin, kun taas matalissa lämpötiloissa tai lyhyillä kuormitusajoilla bitumi käyttäytyy kuin elastinen kiinteä aine. Näiden ääritilanteiden välillä bitumin käyttäytyminen on viskoelastista, jolloin käyttäytymisessä on sekä viskooseja että elastisia piirteitä. Bitumin mekaanisia ominaisuuksia voidaan kuvata jäykkyyshäviömoduulilla, joka kertoo materiaaliin kuormittamisen vaikutuksesta syntyvän jännityksen ja muodonmuutoksen välisen suhteen ajan ja lämpötilan funktiona. Materiaalin jännitys pyrkii laukeamaan, ja bitumin kyky relaksoida jännityksiä riippuu sen viskooseista ominaisuuksista. Relaksaationopeus riippuu bitumin jäykkyydestä: mitä jäykempi materiaali, sitä hitaammin jännityksen relaksoituvat. Kuormituksen myötä bitumissa tapahtuva muodonmuutos koostuu kolmesta osasta. Heti kuormituksen alettua syntyy välitön elastinen muodonmuutos. Lisäksi syntyy kuormitusajasta riippuvaa jatkuvaa viskoosista muodonmuutosta sekä viivästynyttä elastista muodonmuutosta. Näiden osamuodonmuutosten määrä ja niiden keskinäiset suhteet riippuvat lämpötilasta ja kuormitusajasta. Matalissa lämpötiloissa suurin osa syntyvästä muodonmuutoksesta on elastista ja vastaavasti korkeissa lämpötiloissa viskoosista. Kun bitumin kuormittaminen lopetetaan, elastinen osuus muodonmuutoksesta palautuu ajan myötä. Viskoosinen muodonmuutos puolestaan on pysyvää. (Blomberg 1990)

Jäykkyyshäviömoduulin riippuvuutta kuormitusajasta ja lämpötilasta on havainnollistettu kuvassa 2. Kuvaan piirretyt asymptoottiviivat hahmottavat bitumin käyttäytymistä: Bitumi saavuttaa lyhyillä kuormitusajoilla maksimijäykkyytensä (noin $3 \cdot 10^9$ Pa), ja käyttäytyy täysin kimmoisasti. Jäykkyyttä eri lämpötiloissa esittävien käyrien ollessa muodoltaan yhteneväisiä voidaan sanoa, että aine on reologisesti yksinkertainen aine. Käyrä siirtyy vasemmalle lämpötilan kasvaessa ja vastaavasti oikealle lämpötilan laskiessa. Tämän ominaisuuden vuoksi bitumin eri lämpötiloissa saavutettuja mittaustuloksia on mahdollista yhdistää aika-lämpötila -superpositioperiaatteen mukaisesti (kuva 3). Yhdistämisen tuloksena saadaan niin sanottu tyypikäyrä (master curve), joka esittää mitatut sideaineen ominaisuudet yhtenä käyränä koko lämpötila- ja kuormitustaajuusalueella. (Blomberg 1990, Shell Bitumen U.K. 1990, Mezger 2002)

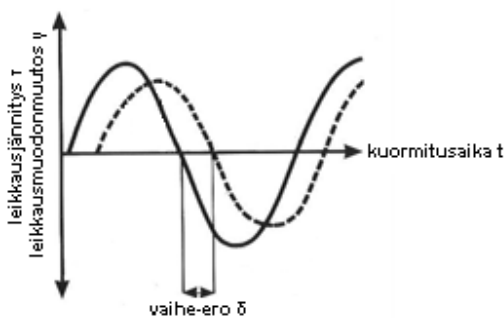


Kuva 2. Bitumin jäykkyyshäviömoduulin riippuvuus kuormitusajasta ja lämpötilasta: a) bitumin käyttäytymisen elastinen ja viskoosinen asymptootti b) reologisesti yksinkertaisen aine. (Muokattu lähteestä Shell Bitumen U.K. 1990.)



Kuva 3. Reologisesti yksinkertaiselle materiaalille voidaan tehdä aika-lämpötila -siirto. (Muokattu lähteestä Huang 2011.)

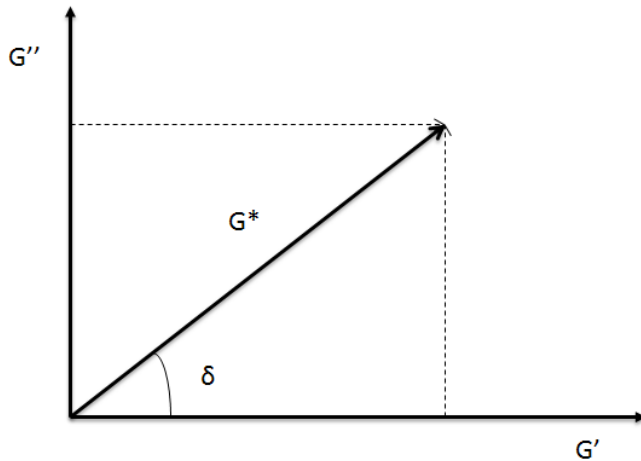
Bitumin jäykkyyshmoduulia voidaan tutkia dynaamisella leikkausreometrillä (Dynamic Shear Rheometer, DSR). Laitteen avulla bituminäytteeseen synnytetään leikkausjännitys kiertämällä mittapäätä oskilloivalla liikkeellä, jolloin syntyvä kuormitus on sinimuotoinen. Laite mittaa voiman ja syntyvän muodonmuutoksen sekä näiden vaihe-eron. Mittaukset voidaan suorittaa laajoilla lämpötila- ja kuormitustaajuusalueilla käyttäen voima- tai muodonmuutosohjattua kuormitusta. Bitumin viskoelastisuus näkyy DSR-mittausten kuormitus-muodonmuutoskuvaajassa (kuva 4) vaihe-erona. Viskoelastisella alueella vaihe-ero on välillä $0-90^\circ$. Materiaalin käyttäytyessä elastisesti muodonmuutos tapahtuu samassa vaiheessa kuormituksen kanssa, jolloin vaihe-ero on 0° . Täysin viskoosissa tilassa vaihe-ero on 90° , eli muodonmuutos tapahtuu täysin eri vaiheessa kuin kuormitus. (Mezger 2002)



Kuva 4. Materiaalin jännityksen ja muodonmuutoksen välinen vaihe-ero: muodonmuutos syntyy viiveellä. (Muokattu lähteestä Shell Bitumen U.K. 1990.)

DSR-laitteen mittaustuloksista voidaan laskea bitumin kompleksinen leikkausmoduuli G^* , joka voidaan jakaa kahteen osaan: varastomoduli G' ja häviömoduuli G'' . Varastomoduli kuvaa bitumin käyttäytymisen elastista osaa eli palautettavissa olevaa energiaa. Häviömoduuli kuvaa bitumin viskoosista käyttäytymistä eli kuormituksessa menetettävää energiaa. Varasto- ja häviömoduulit esitetään usein vektoreina kompleksitasossa kuvan 5 mukaisesti. Esimerkiksi vaihe-eron ollessa 90 astetta,

varastomoduuli G' häviää, ja kompleksinen leikkausmoduuli koostuu ainoastaan viskoosia käyttäytymistä kuvaavasta G'' :n arvosta. (Mezger 2002)



Kuva 5. Kompleksisen jäykkyyshmoduulin esitys kompleksitasossa: reaalin osa (varastomoduuli G') ja imaginäärinen osa (häviömoduuli G'') sekä vaihe-ero δ .

Korkeissa lämpötiloissa pehmenemispisteen yläpuolella bitumin viskoosiset ominaisuudet ovat hallitsevia ja käyttäytyminen on newtonisen nesteen kaltaista. Neste, jonka viskositeetti on alhainen, ei pysty vastustamaan siihen kohdistuvaa leikkausjännitystä vaan alkaa virrata. Viskositeetti kuvaa aineen virtausvastusta eli kykyä vastustaa siihen kohdistuvaa leikkausjännitystä. Newtonisilla nesteillä viskositeetti riippuu vain lämpötilasta, jolloin viskositeetin määrittämiseen voidaan käyttää kapillaariviskometrejä, jotka perustuvat yksinkertaiseen vakio-tilavuuden virtausnopeuden mittaamiseen U-muotoisessa lasiputkessa. Tuloksena saadaan kinemaattinen viskositeetti, jonka yksikkö on mm^2/s . Matalammissa lämpötiloissa newtonisen alueen ulkopuolella viskositeetti voidaan määrittää edelleen kapillaariviskometriä avulla, mutta tällöin bitumin virtausta nopeutetaan alipaineimulla. Tämä menetelmä mittaa absoluuttista eli dynaamista viskositeettiä, jonka yksikkö on Pas. Alipaineimua käytettäessä bitumin oma paino jää merkityksettömäksi, joten kinemaattisen ja dynaamisen viskositeetin välille voidaan kaavan (1) mukainen yhteys:

$$\eta = \rho \nu \quad (1)$$

jossa η on dynaaminen viskositeetti [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
 ρ bitumin tiheys [kg/m^3]
 ν kinemaattinen viskositeetti [mm^2/s]

Matalissa lämpötiloissa bitumin viskositeetti on lämpötilan lisäksi riippuvainen leikkausnopeudesta. Tästä syystä bitumin viskositeetti tietyssä lämpötilassa voi vaihdella eri mittausmenetelmiä käytettäessä. Leikkausnopeuden vaikutusta bitumin viskositeettiin voidaan tutkia esimerkiksi rotaatioviskometreillä (Blomberg 1990). DSR-mittausten

tuloksista voidaan laskea lämpötilasta ja kuormitusnopeudesta riippuva sideaineen kompleksinen viskositeetti Cox-Merz säännön mukaisella kaavalla (2), jonka arvo on vertailukelpoinen perinteisillä viskositeetin määrittystavoilla saavutettuihin arvoihin (Lesueur 2009, Mezger 2002):

$$\eta^* = \frac{G^*(\omega)}{\omega} \quad (2)$$

jossa η^* on kompleksinen viskositeetti [Pas]
 G^* kompleksinen leikkausmoduuli [Pa]
 ω kuormituksen taajuus [rad/s]

Yleisimmin käytetyt bitumin viskositeetin tutkimuslämpötilat ovat 60 °C ja 135 °C. Ensimmäinen lämpötila kuvaa hyvin bitumin käyttäytymistä asfalttipäällysteen korkeimmissa käyttölämpötiloissa ja jälkimmäinen asfalttimassan sekoituksen yhteydessä vallitsevia ominaisuuksia. Kun bitumin viskositeetti kahdessa lämpötilassa tunnetaan, voidaan viskositeetin arvoja muissa lämpötiloissa arvioida logaritmi-kaavojen avulla. Bitumin viskositeetin lämpötilariippuvuutta voidaan kuvata Waltherin yhtälöllä (3) (Blomberg 1990):

$$\log[\log(0,9 + v)] = -m * \log(T) + c \quad (3)$$

jossa v on kinemaattinen viskositeetti [mm²/s]
 T lämpötila [°K]
 m ja C vakioita

Bitumisen sideaineen elastiset ominaisuudet eli kyky vastustaa pysyvää muodonmuutosta on merkittävä tekijä päällysteen deformaatiourautumisen kannalta. Tämän vuoksi sideaineen deformaatiokestävyyden arviointiin on kehitetty useita menetelmiä. Empiirisiä menetelmiä tarkempia ja kattavampia tuloksia tarjoavat reologiset tutkimukset, kuten DSR-mittaukset. Yhdysvalloissa bitumisten sideaineiden ominaisuuksien luokitteluun käytetään Performance Grade (PG) -luokitusta, jossa sideaineen deformaatiokestävyys määritellään kahdella tavalla: DSR-mittausten tulosten perusteella laskettavalla $|G^*|/\sin\delta$ -arvolla ja Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) -testin tuloksilla. Yleisesti käytetty $|G^*|/\sin\delta$ -arvo ottaa paremmin huomioon sideaineen elastiset ominaisuudet pelkkään kompleksisen leikkausmoduulin arvoon verrattuna. Myös MSCR -testi suoritetaan DSR-laitteella. Koe perustuu sideainenäytteen toistuvaan kuormitukseen, jolloin näytteessä tapahtuu peräkkäin useita muodonmuutos- ja palautumajaksoja. Laite mittaa näytteessä tapahtuvan muodonmuutoksen ajan funktiona, ja tuloksena lasketaan sideaineen palautumattoman myötäämisen osuus ja keskimääräinen palautumaprosentti. Koska bitumin elastiset ominaisuudet heikentyvät lämpötilan kasvaessa, sideaineen deformaation kannalta kriittinen on se korkein lämpötila, jossa PG-luokituksessa asetetut vaatimukset vielä

täyttyvät. Palautumattoman myötäämisen määrän on todettu korreloivan päällysteen urautumisherkkyuden kanssa $|G^*|/\sin\delta$ arvoa paremmin erityisesti modifioituilla bitumeilla. Eron arvellaan johtuvan siitä, että MSCR-testissä sideainenäyte altistetaan suuremmille kuormituksille ja muodonmuutoksille kuin kompleksisen leikkausmoduulin ja vaihe-eron määrittämisessä. (Harrigan ym. 1994, Hrdlicka ym. 2007, Petersen ym. 1994b, Shenoy 2008)

Bitumin ominaisuudet kylmissä lämpötiloissa vaikuttavat päällysteen kestävyys- ja pakkashalkeilua vastaan. Jotta päällyste kestäisi lämpötilan laskun synnyttämiä jännityksiä, sideaineen on kyettävä säilyttämään viskoosit ominaisuutensa jännitysten relaksoimiseksi. Kylmissä lämpötiloissa bitumin elastiset ominaisuudet kuitenkin nousevat hallitseviksi ja viskoosit ominaisuudet väistyvät. Lämpötilan laskiessa riittävän alhaiseksi saavutetaan niin sanottu lasittumispiste, jossa bitumi saavuttaa maksimijäykkyytensä. Lasittumispiste saavutetaan bitumeilla tyypillisesti noin -20 °C :ssa, mutta lasittumispisteeseen vaikuttavia tekijöitä ei tunneta hyvin. Bitumin sisältämien tyydyttyneiden hiilivetyjen lasittumispistelämpötila on noin -70 °C ja aromaattisten hiilivetyjen noin -20 °C , mutta hartsien ja asfalteenien osuutta bitumin lasittumiseen ei ole määritelty. Sideaineen kylmäominaisuuksia voidaan tutkia Fraass -murtumispisteen avulla. Testissä metallilevyille levitettyä bitumikalvoa kuormitetaan taivuttamalla samalla kun lämpötilaa lasketaan 1 °C minuutissa. Taivutus toistetaan aina, kun lämpötila on laskenut 1 °C :n. Murtumispiste on se lämpötila, jossa sideaine ei enää kykene venymään vaan katkeaa. PG -luokitus käyttää sideaineiden kylmäominaisuuksien arvioimiseen Bending Beam Rheometer (BBR) -laitetta, jolla mitataan kuinka paljon valettu sideainepalkki taipuu vakiokuorman vaikutuksesta valitussa koelämpötilassa. Tuloksena saadaan sideaineen taivutusvirumajäykkyys. Mittaus suoritetaan sideainesta valetulle palkille, joka on upotettu nestehauteeseen ja tuettu molemmista päädyistä. Laite mittaa käytetyn kuormituksen ja palkin taipuman ajan funktiona. Kokeen tuloksena lasketaan bitumin jäykkyys 60 s kuormituksen jälkeen. Toinen kokeesta saatava tulos on jäykkyyden muutosta ajan suhteen kuvaava m -arvo. (Blomberg 1990, Harrigan ym. 1994, Lesueur 2009, Masson ym. 2001, Petersen ym. 1994b)

Sideaineilta siis vaaditaan hyviä ominaisuuksia sekä korkeissa että matalissa käyttölämpötiloissa. Sideaineen ominaisuuksien herkkyyttä lämpötilan muutoksille voidaan kuvata penetraatioindeksillä (PI). PI voidaan laskea bitumin 25 °C tunkeuman ja pehmenemispistelämpötilan perusteella kaavalla (4) olettamalla, että sideaineen tunkeuma pehmenemispisteessä on $800/10\text{ mm}$. Kyseinen tunkeuma-arvon oletus pätee yleisimmille bitumeille. Penetraatioindeksin tyypillinen vaihteluväli tiebitumeilla on $-3 - +7$. Mitä pienempi arvo, sitä herkempiä bitumin ominaisuudet ovat lämpötilan muutoksille. PI-arvo on kuitenkin hyvin altis virheille, esimerkiksi pehmenemispisteen määrittämisessä tarkkuudelle. Toinen bitumin lämpötilaherkkyttä kuvaava laskennallinen suure on bitumin plastisuusalue, jolla tarkoitetaan sideaineen murtumis- ja pehmenemispisteen välistä lämpötila-aluetta. Bitumi, jonka plastisuusalue on kapea, on

herkkä lämpötilan muutoksille. Hyvin lämpötilaherkkä bitumi pehmenee nopeasti lämpötilan kasvaessa ja vastaavasti jäykistyy nopeasti lämpötilan laskiessa. Tällaiset bitumit ovat herkkiä deformaatiolle ja pakkashalkeilulle. Sideaineen rakenteella on merkittävä vaikutus lämpötilaherkkyyteen. Esimerkiksi puhalletuilla tai vanhennetuilla sideaineilla herkkyys lämpötilan muutoksille on alentunut, koska niiden molekyyli­rakenteiden väliset vuorovaikutukset ovat vahvempia. Sideaineen epäherkkyys lämpötilan suhteen on toivottava ominaisuus päällysteen kestävy­yden kannalta, ja sideaineiden lämpötilaherkkyyteen pyritäänkin usein vaikuttamaan modifioinnilla. (Blomberg 1990, Shell Bitumen U.K. 1990)

$$PI = \frac{\log 800 - \log P_1}{T_{pp} - T_1} \quad (4)$$

jossa PI on penetraatioindeksi

P_1 bitumin tunkeuma lämpötilassa T_1

T_{pp} bitumin pehmenemispisteen lämpötila

T_1 lämpötila, jossa tunkeuma P_1 on määritetty

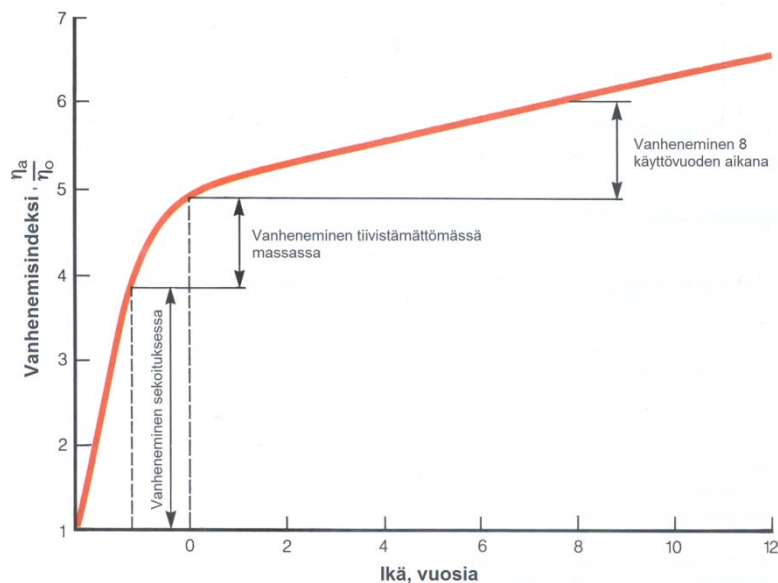
Bitumin käyttäytyminen tietyssä lämpötilassa riippuu sekä kemiallisesta koostumuksesta että hiilivetyjen vallitsevasta rakenteesta (Shell Bitumen U.K. 1990). Koostumuksessa tai rakenteessa tapahtuvilla muutoksilla on välitön vaikutus sideaineen reologisiin ominaisuuksiin. SARA -fraktioiden jakaumille on useissa tutkimuksissa etsitty yhteyksiä bitumien reologiseen käyttäytymiseen. Bitumin koostumuksen ja reologisten ominaisuuksien yhteyttä on tutkittu kokeellisesti sekoittamalla eri komponentteja systemaattisesti eri suhteilla. Simpson ym. (1961) pitivät tutkimuksessaan asfalteenien osuuden vakiona (25 %) ja tutkivat muiden fraktioiden suhteiden vaikutusta reologisiin ominaisuuksiin. Hartien osuuden kasvattamisen havaittiin koventavan bitumia ja kasvattavan viskositeettiä. Kun hartsien ja aromaattisten öljyjen suhde pidettiin vakiona, mutta tyydyttyneiden öljyjen osuutta kasvatettiin, bitumi pehmeni. Vastaavasti aromaattisten öljyjen osuuden kasvattamisen ei juurikaan havaittu vaikuttavan reologisiin ominaisuuksiin. Reerink (1973) puolestaan tutki asfalteenipitoisuuden vaikutusta bitumin reologisiin ominaisuuksiin ja totesi, että asfalteenien osuuden kasvaminen nostaa bitumin viskositeettiä. Tutkimuksissa havaittiin myös, että asfalteenit ovat keskinäisessä vuorovaikutuksessa, ja että asfalteenien muodostamat assosiaatiot kasvattavat bitumin viskositeettiä.

2.2.4 Bitumisen sideaineen vanheneminen

Bitumiselle sideaineelle on tyypillistä sen ominaisuuksien muuttuminen ajan myötä. Tätä ilmiötä kutsutaan sideaineen vanhenemiseksi. Bitumisen sideaineen vanheneminen on merkittävä tekijä asfalttirouheen kierrättämisen kannalta, sillä rouheen sisältämän sideaineen ominaisuudet ovat olennaisesti muuttuneet päällysteen valmistuksen ja käyttö­iän myötä. Vanhentuneen sideaineen viskositeetti ja jäykkyys kasvavat, eli bitumi

kovenee ja muuttuu hauraaksi. Suurin vaikutus vanhenemisella on bitumin jäykkyyteen ja muokattavuuteen, mutta muutoksia tapahtuu myös fysikaaliskemiallisissa ominaisuuksissa ja tartuntakyvyssä. (Karlsson ym. 2006)

Sideaineen vanheneminen voidaan jakaa kahteen tyyppiin: lyhyt- ja pitkäaikaiseen vanhenemiseen. Lyhytaikainen vanheneminen tapahtuu yleensä asfalttimassan valmistuksen yhteydessä, kun bitumin lämpötila on korkea. Bitumin kevyimmät komponentit haihtuvat yli 160 °C lämpötilassa, joten sideaineen ylikuumentamista tulisi varoa. Vanhenemisen päämekanismi on kuitenkin hapettuminen, joka muuttaa bitumin kemiallista koostumusta edesauttamalla polaaristen ryhmien muodostumista. Nämä ryhmät lisäävät molekyyliyhdistelmien välisiä assosiaatioita, jolloin bitumin viskositeetti kasvaa. Hapettuminen kiihtyy kuumuuden ja ilmakehän hapen välittömän läsnäolon vaikutuksesta. Suurin osa bitumin vanhenemisesta tapahtuu lyhytaikaisesti asfalttimassan sekoituksen yhteydessä, kun lämpötila on korkea ja sideaine levittäytyy ohueksi kalvoksi kiviainesrakeiden pinnalle (kuva 6). Tällöin suuri pinta-ala bitumia on suoraan kosketuksissa ilman kanssa. Bitumi kovettuu lyhytaikaisen vanhenemisen seurauksena keskimäärin yhden bitumiluokan verran, esimerkiksi 70/100 -luokasta kovempaan 50/70 -luokkaan. (Bell 1989, Karlsson ym. 2006, Shell Bitumen U.K. 1990)



Kuva 6. Sideaineen vanheneminen asfalttimassan valmistuksen ja päällysteen käyttöään myötä. (Muokattu lähteestä Shell Bitumen U.K. 1990.)

Pitkäaikaista vanhenemista tapahtuu valmiin asfalttipäällysteen pinnassa, joka altistuu jatkuvasti lukuisille kemiallisille ja fysikaalisille prosesseille. Päällysteen pinnassa tapahtuva vanheneminen onkin riippuvaista paikallisesta ilmastosta. Sideaineen hapettuminen jatkuu päällysteen pinnassa 1–2 cm syvyydellä, sillä pinta on suoraan kosketuksissa hapen kanssa. Päällysteen suuri tyhjätila edesauttaa vanhenemista kasvattamalla ilman kanssa kosketuksissa olevan sideaineen osuutta. Sideainetta kovettaa

myös UV-säteilyn aiheuttama polymerisaatio. Ajan myötä bitumissa tapahtuu myös fyysistä kovettumista, joka yleensä johtuu bitumin molekyyliarakenteen uudelleensuuntautumisesta ja tyydyttyneiden öljyjen sisältämien vahamaisten yhdisteiden kiteytymisestä. Tämä muutos kuitenkin palautuu, kun bitumi lämmitetään uudelleen. (Sanders 2005, Shell Bitumen U.K. 1990)

Useat tutkimukset ovat vahvistaneet, että vanheneminen aiheuttaa muutoksia bitumin SARA-fraktioiden osuuksissa. Tutkimustulokset eivät kuitenkaan ole täysin yhteneviä asfalteenien fraktion osalta. Osassa tutkimustuloksista raportoidaan asfalteenien osuuden selvästä kasvusta, kun toisaalta osa tutkimustuloksista osoittaa, että asfalteenien osuudessa ei tapahdu suuria muutoksia, vaan merkittävin muutos on hartsien osuuden kasvu. Tutkimustulokset ovat kuitenkin yksimielisiä siitä, että aromaattisten öljyjen osuus pienenee selvästi. Tyydyttyneiden öljyjen osuudessa ei yleensä tapahdu merkittävää muutosta. Syitä tutkimustulosten ristiriitaisuuteen voi olla useita: Bitumien koostumus vaihtelee raakaöljylähteittäin. Lisäksi fraktiot ovat osittain päällekkäisiä ja eri menetelmillä määritetyt koostumukset poikkeavat toisistaan. Myös tutkimuksissa käytetyillä erilaisilla vanhentamiskäsittelyillä voi olla vaikutusta lopulliseen tulokseen. Yhteenvetona tutkimustuloksista voidaan todeta, että bitumin molekyyli rakenne muuttuu raskaammaksi ja poolisemmaksi, jolloin molekyylit muodostavat helpommin assosiaatioita toistensa kanssa. Vanhenemisen myötä bitumin lämpötilaherkkyys vähenee ja elastiset ominaisuudet kasvavat. (Branthaver ym. 1993, Kuang ym. 2011, Le Guern ym. 2010, Lesueur 2009, Liang ym. 2010, Lu ym. 2002, Shell Bitumen U.K. 1990)

2.3 Asfalttirouheen ominaisuudet

Asfalttirouhe on murskattua tai jyrsettä vanhaa asfalttipäällystettä (kuva 7). Asfalttirouheen ominaisuudet riippuvat vanhan päällysteen asfalttityypistä, käytetystä sideaineesta ja sen määrästä sekä päällysteen iästä. Asfalttirouheen ominaisuudet on tutkittava ennen sen käyttöä uusiomasfaltin raaka-aineena, sillä asfalttirouheen ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus uusiopäällysteen laatuun. Uusiomassassa käytettävälle asfalttirouheelle on asetettu laatuvaatimuksia, jotka perustuvat standardiin SFS-EN 12697-42. Asfalttinormien (PANK ry 2011) mukaan asfalttirouheesta on aina tutkittava raekokojakauma ja sideainepitoisuus. Jos asfalttirouheen osuus uusiomassasta on yli 10 %, asfalttirouheesta tulee lisäksi ilmoittaa kiviaineksen maksimiraekoko sekä sideaineen tyyppi ja kovuus. Sideaineen kovuus voidaan ilmoittaa tunkeuman, pehmenemispisteen tai viskositeetin avulla.

Vanhan päällysteen sisältämä sideaine on käyttöikänsä aikana kovettunut ja haurastunut (luku 2.2.4). Eteläisessä Suomessa RAP-sideaineen keskimääräinen tunkeuma on noin 30–35 1/10 mm. Pohjois- ja Keski-Suomessa RAP-sideaine on keskimäärin hieman pehmeämpää, sillä asfaltin valmistukseen näillä alueilla käytetään pehmeämpää bitumia. (Blomberg ym. 2011)



Kuva 7. Asfalttirouheen murskausta asfalttiasemalla.

Asfalttipäällysteen murskauksen ja jyrinnän yhteydessä kiviainekseen voi syntyä mikrohalkeamia. Jos kohteessa käytettävän asfalttimassan kiviainekselle on asetettu korkea vaatimus (luokka AN₇ tai AN₁₀) nastarengaskulutuskestävyydelle, myös massassa käytettävän asfalttirouheen sisältämän kiviaineksen on täytettävä sama vaatimus. Tällä vaatimuksella varmistetaan uusiomassan kiviaineksen tasalaatuisuus ja kestävyys.

Asfalttirouheen ominaisuuksien tunteminen ja ominaisuuksien tasalaatuisuus ovat uusioasfaltin hyvän laadun kannalta välttämättömiä. Jos murskattava materiaali sisältää runsaasti paikkausmassoja tai aseman tuoreita ylijäämämassoja, rouheen sisältämän sideaineen määrä ja kovuus vaihtelevat. Tasalaatuisuutta voidaan parantaa lajittelemalla murskattavaa vanhaa päällystettä esimerkiksi sen iän ja tyyppin mukaisesti (Kandhal ym. 1997). Rouheen sisältämän sideaineen vuoksi rakeet voivat tarttua toisiinsa, ja myös pitkä varastointiaika voi lisätä asfalttirouheen epätasalaatuisuutta edesauttamalla rouheen paakkuuntumista (Lämsä 2005). Sideaineen ominaisuuksien vaihtelun lisäksi asfalttirouheen laatuun vaikuttavat sen sisältämät epäpuhtaudet. Asfalttinormit asettavat asfalttirouheelle myös puhtausvaatimuksen: epäpuhtausluokan tulee olla F1 standardin SFS-EN 12697-42 mukaan määritettynä. Asfalttirouhe saa sisältää korkeintaan 1 % epäpuhtauksia kuten betonia, tiiltä ja metallia tai korkeintaan 0,1 % muita epäpuhtauksia, kuten puuta tai muovia.

Asfalttirouhe tulee lämmittää aina, jos sen osuus asfalttimassassa on suurempi kuin 10 %. Useimmilla asfalttiasemilla rouhe lämmitetään erillisellä rinnakkaisrummulla. Lämmityksen tarkoitus on poistaa asfalttirouheen sisältämä kosteus ja pehmentää RAP-

sideaine. Rouheella on taipumus kerätä itseensä runsaasti kosteutta ja tämä tulisi ottaa huomioon jo asfalttirouheen valmistuksen yhteydessä: Murskettava tai jyrstittävä materiaali ei saisi olla märkää, ja asfalttirouhe tulisi suojata kosteudelta varastoinnin aikana. Rouheeseen jäävä kosteus heikentää uusiomassan sideaineen ja kiviaineksen välistä tartuntaa. RAP-sideaineen pehmentäminen rouhetta lämmittämällä on välttämätöntä sideaineiden sekoittumisen ja hyvän tartunnan varmistamiseksi. Rouhe tulisi lämmittää 70–80 °C RAP-sideaineen pehmenemispistettä korkeampaan lämpötilaan ennen uusiomassan sekoittamista. (Blomberg ym. 2011, PANK ry 2011, Nölting ym. 2011)

2.4 Vanhentuneen sideaineen elvyttäminen

2.4.1 Elvyttimet ja niiden vaikutukset sideaineen ominaisuuksiin

Elvyttämisen tarkoitus on palauttaa vanhentuneen sideaineen ominaisuudet entiselle tai lähes entiselle tasolle. Elvyttimet ovat tyypillisesti bitumisia tai öljymäisiä tuotteita, joilla on alhainen viskositeetti. Karlsson ym. (2006) esittelevät kirjallisuusselvityksessään jaon pehennysaineisiin ja varsinaisiin elvyttimiin. Pehennysaineilla tähdätään ainoastaan RAP-sideaineen tunkeuman kasvattamiseen, eikä reologisten ominaisuuksien muutoksia oteta huomioon. Varsinaisilla elvyttimillä puolestaan tähdätään pehmentämisen lisäksi RAP-sideaineen reologisten ominaisuuksien ja kemiallisten koostumuksen palauttamiseen.

Elvytin on asfalttimassan lisäaine, jonka vaikutukset päällysteen laatuun, työterveyteen, turvallisuuteen ja ympäristöön tulee selvittää ja ottaa huomioon massan valmistuksen sekä päällystystyön yhteydessä. Elvytetyn sideaineen tulee täyttää uusiomassaan valitun sideaineen vaatimukset. Elvyttimen viskositeetin tulee olla riittävän alhainen, jotta se pystyy pehmentämään RAP-sideaineen reologisten ominaisuuksien palauttamiseksi ja hyvän kiviainesrakeiden peittokyvyn saavuttamiseksi. Elvyttimen tulee olla koostumukseltaan homogeenisia ja helposti bitumin kanssa sekoitettavaa. Elvyttimien tulee olla myös käytännöllisiä ja turvallisia eivätkä ne saa aiheuttaa terveyshaittoja, savuamista tai leimahtamista. (Karlsson ym. 2006)

Elvyttimien sekoittumisesta bitumin kanssa on tehty useita tutkimuksia. Lahtinen (1984) tutki diplomityössään yhtätoista erilaista elvytinvaihtoehtoa. Tutkimusten perusteella hän luokitteli käytetyt elvyttimet kolmeen ryhmään: öljymäiset elvyttimet, pehmeät bitumiset ja kovat (tunkeuma pienempi kuin 250 1/10 mm) bitumiset elvyttimet. Tutkimuksen sideainekokeiden perusteella todettiin, että bitumiset elvyttimet sekoittuvat vanhentuneen bitumin kanssa paremmin kuin öljymäiset. Toisaalta kovilla bitumeilla saavutettu pehennysvaikutus ei ollut riittävä, joten Lahtinen totesi öljymäisten ja pehmeiden bitumisten elvyttimien sopivan parhaiten uusiomassan elvyttimiksi. Sandersin (2005) haastattelutietojen mukaan myös asfalttiasemilla kahden bitumisen aineen sekoittaminen toisiinsa on havaittu helpommaksi aseman toiminnan nopeatahtisuuden vuoksi: Mitä suurempi viskositeettiero sekoitettavien aineiden välillä on, sitä pidempi sekoitusaika

vaaditaan reologisesti tasalaatuisen seoksen aikaansaamiseksi. Tästä syystä öljymäisten elvyttimien käyttö asemasekoitteisten uusiomassojen valmistuksessa on jäänyt vähäiseksi.

Elvyttimen tulisi olla kemiallisilta ominaisuuksiltaan ja alkuperältään sellainen yhdiste, joka pystyy muodostamaan bitumin kanssa stabiilin seoksen. Samasta raakaöljypohjasta valmistettu elvytin todennäköisesti muodostaa stabiilin seoksen bitumin kanssa, sillä aineiden kemialliset ominaisuudet ovat yhteneväiset. Jos aineet ovat kemiallisesti täysin erilaiset, vaarana on elvyttimen erottuminen sideaineesta ajan mittaan, jolloin päällysteen käyttäytyminen muuttuu. Elvyttimen erottuessa päällysteeseen voi muodostua viskositeetiltaan alempia kerroksia, jolloin päällyste menettää lujutensa. Lisäksi elvytintä voi nousta päällysteen pintaan, jossa se alentaa pinnan kitkaa. (Karlsson ym. 2006)

Sideaineseoksen stabiliteetti riippuu sen ainesosien liukoisuudesta toisiinsa ja molekyylien koosta. Pooliset yhdisteet ja aromaattiset öljyt edesauttavat asfalteenien hajaantumista. Elvyttimen kyky ohentaa sideainetta ja auttaa asfalteenien dispergoitumista onkin ensiarvoisen tärkeää onnistuneen elvytyksen kannalta. Teknisestä näkökulmasta erittäin aromaattiset öljyt olisivat tehokkaimpia elvyttimiä, mutta polyaromaattisten hiilivetyjen karsinogeenisuuden vuoksi niitä ei haluta käyttää. Elvyttimien tulisi siis sisältää vain vaarattomia aromaattisia hiilivetyjä ja mahdollisimman vähän asfalteenia ja hartseja, joiden osuus vanhentuneessa sideaineessa on entuudestaan suuri. Toisaalta tyydyttyneiden öljyjen (parafiinien) osuudeksi elvyttimissä suositellaan korkeintaan 30 prosenttia sideaineen rakenteen stabiliteetin säilyttämiseksi. Tyydyttyneiden öljyjen fraktion on todettu heikentävän hartsien ja aromaattisten öljyjen liotuskykyä ja suuri tyydyttyneiden öljyjen osuus voikin johtaa asfalteenien kasaantumiseen. Elvyttimien koostumukselle asetetaan siis useita osin ristiriitaisia reunaehtoja. (Karlsson ym. 2006, Shell Bitumen U.K. 1990, Chaffin ym. 1997)

PAH-yhdisteiden lisäksi elvyttimien käytön yhteydessä on oltu huolissaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (Volatile Organic Compound; VOC) päästöistä. Haihtuvia hiilivetyjä sisältävien aineiden käyttöä elvyttiminä tuleekin välttää. Vaikka elvyttimiä onkin ollut käytettävissä jo pitkän aikaa, vasta viime vuosina saataville on tullut ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja. Viime vuosina on tutkittu mm. puhdistettujen kierrätysöljyjen sekä täysin kasviperäisten öljyjen käyttämistä elvyttiminä. Esimerkiksi Colas Group on kehittänyt Vegeflux -tuotenimellä esiintyvän täysin biopohjaisen elvyttimen bitumin viskositeetin alentamiseen. Kehitystyön tavoitteena on ollut helposti haihtuvien fossiilisten lisäaineiden korvaaminen uusiutuvista luonnonvaroista valmistetulla fluksilla, jonka ansiosta VOC -päästöt vähentyvät, saavutetaan säästöjä materiaaleissa eikä työmaalla esiinny pahaa hajua. Vegefluxilla kerrotaan myös olevan yhtä nopea sidosaika kuin bitumeilla. (Deneuvillers 2008, Nölting ym. 2011, Tyllgren 2010)

Myös Ruotsissa on kiinnostuttu ympäristöystävällisistä elvytinvaihtoehtoista. Tyllgren (2010) tutki Nytex 820 -prosessiöljyn käyttöä elvyttiminä. Nytex 820 on korkeasti

jaloitettu nafteeninen öljy, joka on hydraulisella puhdistettu polyaromaattisista hiilivedyistä. Samassa tutkimuksessa kokeiltiin myös rapsiöljyjohdannaisen KALLrod[®] -tuotteen käyttöä RAP-sideaineen pehmentämiseen. Ympäristöystävällisistä elvyttimistä saatujen lupaavien kokemusten myötä tutkimustyötä tullaan jatkamaan.

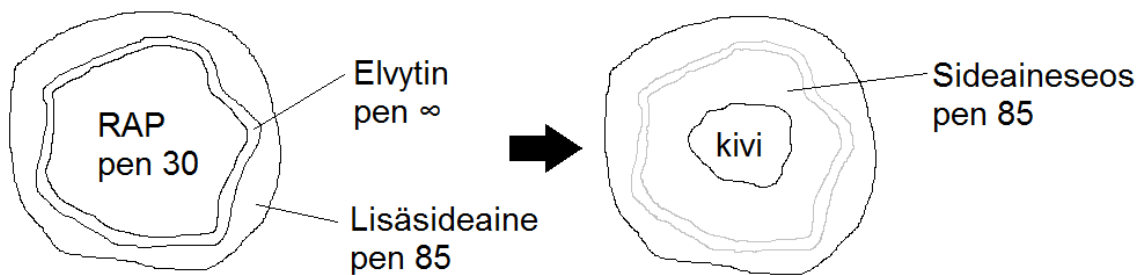
Elvyttimistä on kaiken kaikkiaan tarjolla vain vähän kattavasti dokumentoitua ja puolueetonta tutkimustietoa. Raportoiduissa tutkimuksissa käytettyjen elvyttimien koostumusta ja alkuperää ei usein haluta kertoa tarkasti, jolloin tiedon soveltaminen on vaikeaa. Yleisesti voidaan todeta, että kaikki tutkitut elvyttimet kasvattavat sideaineen tunkeumaa sekä alentavat pehmenemispistettä ja viskositeettia. Tunkeumaltaan samansuuruisten elvytettyjen sideaineiden reologiset ominaisuudet voivat poiketa toisistaan merkittävästi käytetyn elvyttimen tyyppin mukaan (Chen ym. 2007, Sanders 2005). Niinpä elvyttimien vaikutusten arvioimiseksi onkin tarpeellista suorittaa myös reologiaa tutkimuksia.

Chen ym. (2007), Romera ym. (2005) ja Tyllgren (2010) suorittivat elvyttintutkimuksissaan myös DSR-mittauksia. Tulosten arviointiin käytettiin sideaineiden PG-luokituksen asettamia raja-arvoja. Öljymäisillä ja bitumisilla elvytettyjen sideaineiden todettiin olevan reologisesti yksinkertaisia ja mittaustuloksista voitiin piirtää tyyppikäyrät. Bitumiset elvyttimet eivät alentaneet leikkausmoduulia yhtä hyvin kuin öljymäiset elvyttimet. Tuloksille suoritetun tarkastelun perusteella arvioitiin, että elvytetty sideaineet olivat deformaatiokestävämpiä (suuremmat $G^*/\sin\delta$ -arvot) kuin tuore referenssibitumi. Tämän voi johtua vanhentuneen sideaineen hyvän deformaatiokestävyyden periytymisestä elvytettyille sideaineille (Chen ym. 2007). Romera ym. havaitsivat, että öljymäisiä elvyttimiä käytettäessä sideaineen deformaatiokestävyys oli hieman bitumisia elvyttimiä parempi, kun taas Chenin ym. havaintojen mukaan asetelma oli päinvastainen. Tämä ero selittyy Chenin ym. tutkimuksessaan käyttämän bitumisen sideaineen suuremmalla jäykkyydellä. Tyllgren (2010) tutki myös öljymäisen elvyttimen vaikutusta bitumin kylmäkestävyyteen BBR-laitteella. Elvytetty sideaine osoitti hyvää kylmäkestävyyttä: elvytetty sideaine pysyy PG-luokituksen raja-arvojen mukaisesti riittävän joustavana noin 4–6 °C kylmemmissä lämpötiloissa kuin tuore bitumi. Lahtinen (1984) ja Chaffin ym. (1997) osoittivat sideaineseosten vanhentamiskokeilla, että öljymäisiä elvyttimiä käytettäessä sideaineseoksen lyhytaikaiset vanhenemisominaisuudet olivat paremmat kuin tuoreen bitumin tai käytettäessä bitumisia elvyttimiä.

Vaikka elvyttimistä tähän mennessä saadut käyttökokemukset ovatkin vähäisiä ja tulokset vaihtelevia, on osoitettu, että elvyttimiä käyttämällä voidaan valmistaa sideaineseokkeita, joiden käyttöominaisuudet ovat jopa alkuperäistä bitumia paremmat. Erilaisia liuotinpohjaisia lisäaineita ei tulisi käyttää elvyttiminä niiden haihtuvien hiilivetyjen ja epätasaisen käytöksen vuoksi (Chen ym. 2007). Vanhan sideaineen ominaisuuksien palauttamiseen soveltuvat parhaiten pehmeät bitumiset ja öljymäiset elvyttimet.

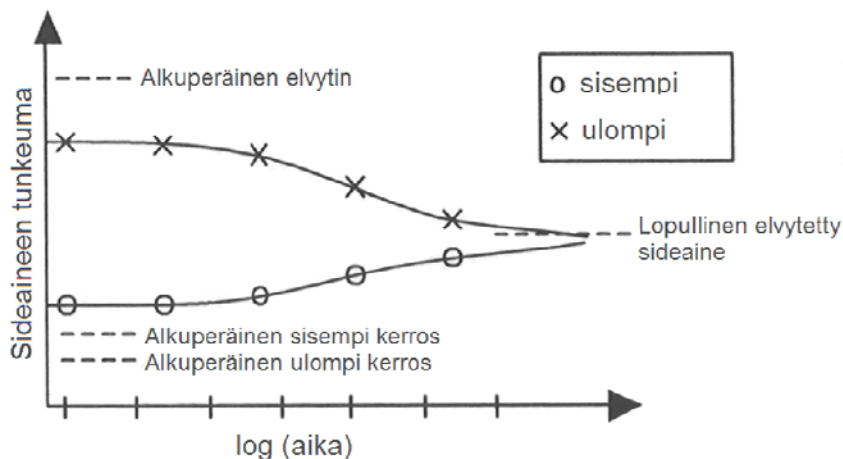
2.4.2 Elvyttimen diffuusio

Elvyttimen diffuusiota on tutkittu laboratoriokokeilla 1970-luvulta lähtien. Tässä esitettävät tiedot on koottu Karlsson ym. (2006) tekemästä kirjallisuusselvityksestä. Zearley (1979) ja Carpenter ym. (1980) olettivat, että diffuusio eli elvyttimen imeytyminen RAP-sideaineeseen tapahtuu vaiheittain. Diffuusio tasoittaa pitoisuuseroja molekyylien siirtyessä väkevämmästä pitoisuudesta laimeampaan. Aluksi elvytin muodostaa vanhan sideaineen peittämän kiviainesrakeen ympärille ohuen kalvon, jolla on erittäin alhainen viskositeetti. Elvytin alkaa hitaasti tunkeutua vanhaan sideaineeseen, jolloin sideaine alkaa pehmetä, ja samalla imeytymättömän elvyttimen määrä rakeen ympärillä vähenee. Jonkin ajan kuluttua elvytin on kokonaisuudessaan imeytynyt vanhaan sideaineeseen, mutta elvyttimen diffuusio jatkuu edelleen. Samanaikaisesti sisemmän kerroksen viskositeetti laskee ja uloimman kerroksen viskositeetti kasvaa elvyttimen tunkeutuessa tasaisesti sideainekerrokseen. Diffuusion päätteeksi kerrokset saavuttavat saman viskositeetin ja tunkeuman. Diffuusion etenemistä asfalttirouheen vanhassa sideaineessa on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8. Periaatekuva elvyttimen diffundoitumisesta uusiomassassa.

Diffuusio prosessi on kokeellisesti vahvistettu Carpenterin ym. (1980) tutkimuksessa, jossa asfalttirouherakeen ulompi ja sisempi bitumikerros uutettiin erilleen. Tutkimus aloitettiin lämmittämällä asfalttirouhe 116 °C:n ja sekoittamalla siihen elvytin. Näytteiden annettiin jäähmettyä ennen vaiheittaisen uutun aloittamista. Näytteet upotettiin trikloorietyleeniin kolmeksi minuutiksi, jonka jälkeen liuos otettiin talteen. Trikloorietyleenikäsittely toistettiin lopun sideaineen irrottamiseksi. Ensimmäinen talteen otetuista liuoksista sisälsi siis ulomman ja toinen sisemmän sideainekerroksen. Liuottimen haihdutuksen jälkeen sideaineista määritettiin tunkeuma. Koe toistettiin näytteille eri säilytysaikojen jälkeen, ja tuloksista piirrettiin kuvaaja, joka osoitti diffuusio prosessin tapahtuvan oletuksen mukaisesti vaiheittain ajan kuluessa (kuva 9). Vastaavia tuloksia diffuusio prosessin etenemisestä ovat saaneet muutkin tutkijat, kuten Noureldin ja Wood vuonna 1987. Diffuusiota on tutkittu myös Fourierin infrapunaspektroskopian avulla. Tutkimuksessa kolmen eri elvyttimen diffuusiota sideaineessa seurattiin merkkusäiteiden välityksellä (Karlsson ym. 2003a). Tulosten varmentamiseksi tutkittiin dynaamisella leikkausreometrillä kompleksista viskositeettia ja leikkausmoduulia, joiden tulokset tukivat päätelmää diffuusion vaiheittaisesta etenemisestä (Karlsson ym. 2003b).



Kuva 9. Elyyttimen diffuusio RAP-sideaineeseen ajan myötä. (Muokattu lähteestä Karlsson ym. 2003 b.)

Diffuusioprosessin lisäksi myös diffuusion nopeus on ollut tutkijoiden kiinnostuksen kohteena. Oliver (1974) päätteli, että diffuusion nopeutta voidaan kasvattaa joko lisäämällä ohuiden liuotinfraktioiden osuutta tai nostamalla lämpötilaa. Tutkimuksessa vertailtiin myös ominaisuuksiltaan erilaisten aineiden diffuusiota. Tuloksista havaittiin, että suoraketjuisista molekyyleistä koostuvat fraktiot diffundoituvat nopeammin kuin nafteeniset tai aromaattiset fraktiot. Lisäksi tehtiin poikkeuksellinen havainto: molekyylipainoltaan suuremmat öljyfraktiot diffundoituvat kevyitä fraktioita nopeammin. Tutkimuksen loppupäätelmä oli kuitenkin se, että molekyylin muoto on diffuusionopeuden kannalta merkittävämpi kuin molekyylipaino. Kuang ym. (2011) kehittivät Carpenterin ym. (1980) tutkimuksen pohjalta oman menetelmänsä elyttimen diffuusion tutkimiseksi. Kuumen vanhennetun sideainenäytteen pinnalle kaadettiin ohut kerros elvyttintä ja näytteiden annettiin jäähtyä hitaasti huoneenlämpöön, minkä jälkeen näytteestä määritettiin tunkeuma. Koe toistettiin useilla eri lämpötiloilla ja vaikutusajoilla. Diffuusion etenemistä arvioitiin tunkeuman kasvamisen perusteella joko ajan tai lämpötilan suhteen. Tutkimuksessa käytettiin kolmea öljymäistä elvyttintä, joiden dynaamiset viskositeetit (60 °C) olivat välillä 0,83–5,6 Pas. Tulokset osoittivat, että viskositeetiltaan alhaiset elyttimet diffundoituvat paremmin vanhaan sideaineeseen kuin viskositeetiltaan korkeammat elyttimet. Tosin on huomattavaa, että kokeissa mukana olleiden elyttimien viskositeettiskaala oli hyvin kapea. Vaikutusajan pidentämisen sekä lämpötilan kasvattamisen havaittiin edesauttavan diffuusiota. Tutkimustulosten perusteella edullisin yhdistelmä oli 160 °C lämpötila ja 4 h vaikutusaika. Yli 170 asteen lämpötilassa tunkeuma ei enää merkittävästi kasvanut ja neljän tunnin säilytysajan jälkeen diffuusio hidastui.

2.5 Elytyttyjen uusioasfalttipäällysteiden ominaisuuksia

Uusiopäällysteitä on valmistettu jo pitkään, ja niiden koostumuksesta ja ominaisuuksista onkin saatavilla runsaasti tutkimustietoa. Tämän diplomityön kannalta kiinnostavinta olisi kuitenkin tutkimustieto elyttimien vaikutuksista uusiopäällysteen ominaisuuksiin.

Tällaista tietoa on kuitenkin raportoitu vain niukasti öljymäisistä elvyttimistä, koska tutkimus on keskittynyt yleisemmin käytettäviin pehmeämmällä lisäsideaineella valmistettaviin uusiopäällysteisiin. Yhdysvalloista saatavilla oleva tutkimus on puolestaan keskittynyt pinta-elvyttimiin, jotka ruiskutetaan päällysteen pintaan ylläpitotoimenpiteenä. Kaupallisista elvyttimistä tarjolla olevat tutkimustiedot ovat usein markkinointiyrityksen teettämiä. Tutkimuksen ja ennen kaikkea käytännön kokemusten puute hidastaa öljymäisten elvyttimien yleistymistä. Käytön yleistymistä ovat osaltaan hidastaneet myös heikompi saatavuus ja korkeampi hinta. Toisaalta hintaeroa tasoittaa öljymäisten elvyttimien pienempi tarve: Pehmeää bitumia tarvitaan huomattavasti enemmän saman pehmentämisvaikutuksen aikaansaamiseksi. Sandersin (2005) mukaan ehkä suurin ongelma on kuitenkin ollut normien ja spesifikaatioiden puute, joten urakoitsijat ovat joutuneet itse soveltamaan käytäntöjä uusiomassojen valmistamisessa ja elvyttimien käyttämisessä. Suomessa keväällä 2011 julkaistuissa uusissa asfalttinormeissa asfalttirouhe määritellään yhdeksi asfaltin mahdolliseksi raaka-aineeksi. Aikaisemmin vastaavaa ohjeistusta ei ollut. Uusiomassan tulee täyttää samat laatuvaatimukset kuin uusista materiaaleista sekoitetun vastaavan asfalttimassan.

Sandersin (2005) keräämien haastattelutietojen perusteella urakoitsijat käyttävät Tanskassa elvyttimiä vain kun kierrätettävän asfalttirouheen osuus massassa on erittäin suuri, eikä pelkän pehmeämmän lisäsideaineen vaikutus riitä. Asfalttirouheen osuuden ollessa pieni, myös vanhan kovettuneen sideaineen määrä on vähäinen, ja silloin on tyypillisesti käytetty vain hieman pehmeämpää lisäsideainetta parantamaan asfalttimassan työstettävyyttä ja korjaamaan vanhan sideaineen kovuutta. Pienten ($\leq 10\%$) rouhemäärien elvytystarve on niin vähäinen, että ohuen öljymäisen elvyttimen annostuksen tarkkuus ja sekoittuvuus kärsivät.

Kuten jo aiemmin on todettu, bitumisen sideaineen reologiset ominaisuudet sekä kemiallinen koostumus vaikuttavat merkittävästi asfalttipäällysteen koostumukseen ja toiminnallisiin ominaisuuksiin. Niinpä elvyttimen ja sideaineen valinnalla sekä uusiomassan koostumuksen suunnittelulla on tärkeä rooli uusiopäällysteen laadun kannalta. Uusiomassojen suunnittelun yhteydessä tehdään laskelmat lisäsideaineen pehmeysluokan valitsemiseksi tai tarvittavan elvytinmäärän laskemiseksi kaavan (5) periaatteen mukaisesti (PANK ry 2011). Uusiomassan sideaine koostuu useista komponenteista: RAP-sideaine, elvytin ja tuore lisäsideaine. Käytännössä uusiomassan suunnittelun yhteydessä lisäsideaineen ja elvyttimen laatu ja määrä on valittava siten, että niiden pehmeys kompensoi RAP-sideaineen tunnetun kovuuden. Samalla on huolehdittava siitä, ettei massan tavoiteltu sideainepitoisuus ylitä. Edellä mainittu laskentatapa olettaa, että uusiomassassa tapahtuu täydellinen sekoittuminen kaikkien komponenttien välillä. Sideaineiden sekoittumisella tarkoitetaan mekaanisen sekoittamisen lisäksi sideaineen komponenttien välistä diffuusiota (luku 2.3.2). Huono sekoittuminen voi johtaa esimerkiksi heikentyneeseen deformaatiokestävyyteen. (Karlsson ym. 2006)

$$(a + b) * \lg(\lg(\text{visc}_{\text{mix}})) = a * \lg(\lg(\text{visc}_1)) + b * \lg(\lg(\text{visc}_2)) \quad (5)$$

jossa visc_{mix} on sideaineen laskennallinen viskositeetti
 visc_1 asfalttirouheesta talteen otetun sideaineen viskositeetti
 visc_2 lisätyn elvyttimen tai lisäsideaineen viskositeetti
a ja b ovat asfalttirouheen sideaineen (a) ja lisätyn elvyttimen tai lisäsideaineen (b) osuudet valmistettavassa seoksessa: $a + b = 1$

Chen ym. (2007) tutkivat asfalttirouheen käyttäytymistä uusiomassassa. Tutkimuksessa haluttiin selvittää tapahtuuko uusiomassassa hyvä sekoittuminen sideaineen komponenttien välillä, vai toimiiko asfalttirouhe kiviaineksen tavoin ilman vuorovaikutusta vanhan ja uuden sideaineen välillä. Jos RAP-sideaine ei sekoitu uuden sideaineen kanssa, sideaineseos on epähomogeeninen ja liian pehmeä, joten päällysteen suunnittelu on epäonnistunut. Tutkimuksessa vertailtiin kolmesta eri uusiomassasta valmistettujen koekappaleiden halkaisuvetolujuutta ja jäännösmoduulia. Yksi massoista edusti perinteistä sekoitustapaa, jossa uusi pehmeämpi lisäsideaine sekoitettiin uuden kiviaineksen ja asfalttirouheen kanssa. Toinen massa edusti täydellisen sekoittumisen hypoteesia, jossa asfalttirouheesta eristetty vanha sideaine ja pehmeämpi lisäsideaine sekoitettiin toisiinsa mekaanisesti ennen sekoittamista uuden kiviaineksen ja asfalttirouheen puhtaaksi uutetun kiviaineksen kanssa. Kolmas massa puolestaan edusti asfalttirouheen käyttäytymistä ”mustana kivenä” ilman RAP-sideaineen vuorovaikutusta uuden sideaineen kanssa: massassa käytettiin samaa pehmeämpää lisäsideainetta kuin muissakin massoissa, mutta asfalttirouheesta oli poistettu sideaine. Massa koostui siis lisäsideaineesta, uudesta kiviaineksestä ja asfalttirouheen puhtaasta kiviaineksestä. Koekappaleille suoritettavat kokeet osoittivat, että perinteisellä tavalla valmistettujen koekappaleiden tulokset olivat lähempänä täydellisen sekoittumisen hypoteesia kuin asfalttirouheen käyttäytymistä mustana kivenä. Samanlaisia tuloksia on saatu useissa tutkimuksissa (Karlsson ym. 2006, Mc Daniel ym. 2002), joskin myös eriäviä mielipiteitä on esitetty: Oliver (2001) totesi, että uusiopäällysteen jäykkyysmoduuli oli alhaisempi ja kyky vastustaa deformaatiota huonompi kuin vastaavalla uusista materiaaleista valmistetulla päällysteellä. Syyksi arveltiin asfalttirouheen sideaineen ja hienoaineksen muodostaman mastiksi kovaa pintaa, johon uusi lisäsideaine ei päässyt tunkeutumaan. Sekoittumista koskevien tutkimustulosten vertailu on vaikeaa johtuen erilaisista menettelytavoista massojen valmistuksessa. Näiden tulosten perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että uusiomassan sideaineen komponenttien välillä tapahtuu sekoittuminen, kun asfalttirouhetta lämmitetään riittävästi ja elvyttimenä käytetään riittävän pehmeää bitumia tai sopivaa öljymäistä elvytintä.

Päällysteen laatuun ja kestävyYTEEN vaikuttavat myös massan valmistukseen ja päällysteen tiivistämiseen liittyvät tekijät. Asfalttirouheen puutteellinen lämmitys aiheuttaa tartuntaongelmia, ja toisaalta liian korkea sekoituslämpötila kovettaa sideainetta. Tyllgren (2010) arvioi, että käyttämällä uusiomassan valmistuksessa valmiiksi öljymäisellä

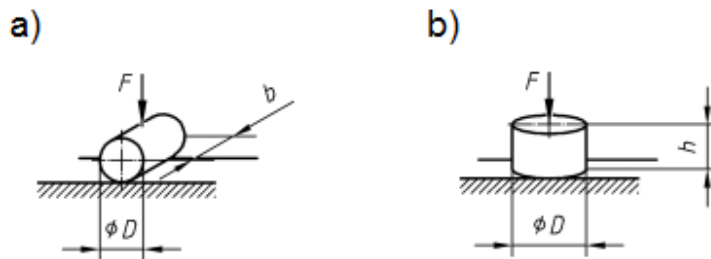
lisäaineella elvytettyä asfalttirouhetta voidaan massan sekoituslämpötilaa laskea tavalliseen uusiomassaan verrattuna. Valmiiksi elvytetyllä asfalttirouheella tarkoitetaan elvyttimen lisäämistä asfalttirouheen joukkoon ennen annossekoittimeen siirtämistä. Elvytetty RAP-sideaine saavuttaa sekoittumisen kannalta sopivan viskositeetin huomattavasti alhaisemmissa lämpötiloissa kuin elvyttämätön. Alentamalla sekoituslämpötilaa saavutetaan energiasäästöä ja vähennetään asfalttiaseman päästöjä. (Romera ym. 2006, Shell Bitumen U.K. 1990, Tyllgren 2010)

Uusioasfalttimassan valmistuksen jälkeinen käsittely, levittäminen ja tiivistys eivät periaatteessa eroa tavallisen asfalttimassan käsittelystä. Uusiopäällysteiden osalta raportoidut liian pienet tyhjätilat johtuvat yleensä liian suureksi noussesta sideainepitoisuudesta (Dunn ym. 2001). Toisaalta uusiomassojen on havaittu olevan käsittelyssä hieman jäykempiä, varsinkin jos RC-pitoisuudeltaan pieniä uusiomassoja on valmistettu ilman elvytintä. Silloin tyhjätilojen on havaittu jäävän liian suuriksi. Elvyttimien käyttö notkistaa massan koostumusta ja erityisesti öljymäisten elvyttimien on havaittu parantavan massan työstettävyyttä ja tiivistyvyyttä. Öljymäisiä elvyttimiä käytettäessä massan työstettävyys on lähempänä uusista materiaaleista valmistettua asfalttimassaa (Tyllgren 2010). Lahtinen (1984) arveli öljymäisen elvyttimen levittäytyvän ohuena kalvona kiviainesrakeiden ympärille, mikä helpottaa päällysteen tiivistymistä, jolloin massan tiivistystä voidaan vähentää tai tiivistyslämpötilaa laskea.

Elvyttimien vaikutusta valmiin uusiopäällysteiden toimintaan voidaan tutkia useiden laboratoriotutkimusten kautta. Suurimpana mielenkiinnon kohteena tutkimuksissa ovat olleet päällysteen jäykkyys ja deformaatio. Päällysteen jäykkyys yhdistetään sen kantokykyyn ja halkeiluun, kun taas deformaatiolla tarkoitetaan asfaltin rakenteen pysyvää muodonmuutosta esimerkiksi raskaan liikennekuormituksen alla. Laboratoriotutkimuksia suoritetaan kuitenkin usein vain lyhyellä aikavälillä, eikä niiden tuloksista saada kokonaiskuvaa päällysteen todellisesta käyttäytymisestä. Elvyttimen ja bitumin seoksen huono stabiilius voi johtaa päällysteen pehmenemisen myöhemmin myös paikoissa, joissa päällyste on alun perin ollut stabiilia. Uusien lisäaineiden tai sideaineyhdistelmien kokeilun yhteydessä onkin syytä kiinnittää huomiota päällysteen käyttäytymisen kehittymiseen pitkällä aikavälillä, eikä kenttäkokeiden merkitystä voi korostaa liikaa. (Tyllgren 2010, Karlsson ym. 2006)

Päällysteen kantokykyä voidaan arvioida sen jäykkyyden perusteella. Päällysteen on oltava riittävän jäykkä, jotta liikenteen aiheuttama kuormitus jakautuisi tasaisesti koko tierakenteelle. Toisaalta päällysteen on oltava joustava kestääkseen liikenteen ja lämpötilan vaihteluiden aiheuttamat jännitykset ilman vaurioita. Asfalttimassojen jäykkyyttä voidaan tutkia suoran puristuskuormituksen (dynaaminen moduuli E^*) tai epäsuoran vetokokeen (epäsuora moduuli S) perusteella (SFS-EN 12697-26 2004). Kokeessa näytekappaleeseen kohdistetaan pulssimuotoinen kuormitus, jonka aiheuttama muodonmuutos mitataan. Jännityksen ja muodonmuutoksen perusteella voidaan laskea päällysteen jäykkyyshmoduuli,

joka siis määrittelee päällysteen kyvyn vastustaa muodonmuutosta. Menetelmien periaatteet on esitetty kuvassa 10. Vaikka jäykkyysmoduulin määrittämistä pidetään ainetta rikkomattomana menetelmänä, koesarjat voivat aiheuttaa näytteisiin mikrohalkeilua ja pientä lujuuden alenemista. Oscarsson (2007) havaitsi tutkimuksissaan, että epäsuora jäykkyysmoduulin määrittäminen aiheuttaa noin 4 % jäykkyyden menetyksen vaurioitumisen myötä, kun testauksessa käytettiin useita taajuuksia.



Kuva 10. Jäykkyysmoduulin määrittystapojen pääperiaatteet: a) epäsuora vetolujuustesti b) suora yksiakselitesti. (Muokattu lähteestä SFS-EN 12697-26 2004.)

Widyatmoko (2008) havaitsi elvytettyjen kulutuskerroksen uusiopäällysteiden epäsuoran jäykkyysmoduulin olevan alhaisempi kuin vastaavan uusista materiaaleista valmistetun päällysteen. Jäykkyys oli sitä alhaisempi, mitä korkeampi RC-pitoisuus ja sitä myötä suurempi elvyttimen määrä massassa oli. Asfalttirouhepitoisuuden ollessa 30–50 % massaan lisättiin myös öljymäistä elvyttintä, jotta tavoiteltu sideaineen viskositeetti saavutettiin. Myös Dragon ym. (2011) tekivät havaintoja elvytettyjen uusiomassojen alemmasta jäykkyysmoduulista. Bitumisilla elvyttimillä valmistettujen uusiomassojen pienemmän jäykkyysmoduulin syyksi arvioitiin bitumien muodostama kaksoissideainekerros, joka syntyy, kun elvyttimeksi tarkoitettu sideaine ei sekoitu RAP-sideaineeseen. Toisaalta Mc Daniel ym. (2002) totesivat päällysteen jäykkyyden kasvavan, kun rouheen osuutta massassa lisättiin ja elvyttimenä käytettiin bitumista lisäsideainetta. RC15 -massan jäykkyysmoduuli oli vielä samalla tasolla kuin ilman rouhetta valmistetun referenssimassan jäykkyys, mutta tästä eteenpäin rouheen osuuden kasvaessa myös massan jäykkyys kasvoi. Ero korostui korkeimmilla käytetyillä taajuuksilla eli lyhyillä kuormitusajoilla. Jäykkyysmoduulin kasvun arvioitiin johtuvan rouheen sisältämän sideaineen jäykkyydestä. Rekola (2008) totesi myös diplomityössään, että uusiomassojen jäykkyysmoduulit ovat tavallisia asfalttimassoja korkeammat.

Tyllgren (2010) tutki öljymäisen elvyttimen (Nytex 820) vaikutuksia uusioasfaltin väsymiskestävyyteen käyttäen epäsuoraan vetojännitykseen perustuvaa koetta (SFS-EN 12697-24), ja laski tulosten kautta viitteellisen jäykkyyden. Tutkimuksissa käytettiin asemasekoitteisia massoja, joista oli tiivistetty koekappaleita Marshall-vasaralla. Lisäksi käytettiin päällystyskoekohteesta porattuja näytekappaleita. Tulokset osoittivat öljymäisellä lisäaineella elvytetyn päällysteen väsymiskestävyyden olevan parempi, ja laskennallisen

jäykkyyden pienempi kuin bitumisella lisäsideaineella valmistetun uusiopäällysteen tai uusista materiaaleista valmistetun referenssipäällysteen.

Päällysteen deformaatioherkkyyttä voidaan tutkia yksiakselisella jaksollisella virumiskokeella, jossa mitataan sylinterin muotoisen näytekappaleen korkeuden muutos tietyllä kuormituskertamäärällä. Näytteen sivutuennan saavuttamiseksi kokeessa käytetään halkaisijaltaan kuormituslevyä suurempaa näytekappaletta (kuva 11). Tuloksena saadaan virumiskäyränä esitettävä näytteen kumulatiivinen akselinsuuntainen muodonmuutos kuormituskertaluvun funktiona. Muodonmuutoksen perusteella voidaan laskea virumisaste ja virumismoduuli. Korkea käyttölämpötila edesauttaa pysyvän muodonmuutoksen syntymistä päällysteen sideaineen jäykkyyden laskiessa, joten 40 °C on yleinen testilämpötila. Deformaatiokestävyyden kannalta tärkeimpiä ovat sideaineen oikeanlaiset ominaisuudet, mutta myös asfalttimassan koostumuksella on merkittävä vaikutus. Oletettavasti deformaatioherkkyyttä lisäävät myös elvyttimen ja sideaineen huono sekoittuminen tai jopa elvyttimen erottuminen sideaineesta. Kiviaineksen muoto ja rakeisuus voivat heikentää deformaatiokestävyyttä, jos rouheen ominaisuuksia ei kontrolloida riittävästi. (Karlsson 2006 ym., Shell Bitumen U.K. 1990, SFS-EN 12697-25 2005)

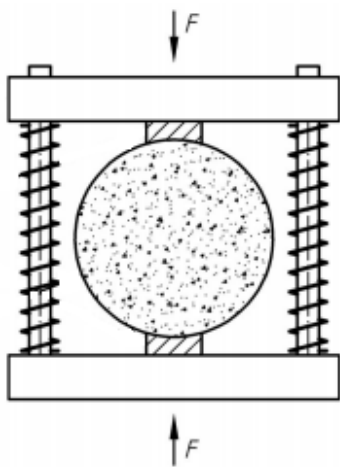


Kuva 11. Tiivistetyn asfalttimassan pysyvän muodonmuutoksen määrittäminen jaksollisella virumiskokeella.

Karlsson ym. (2006) tekemän kirjallisuusselvityksen mukaan elvytetyillä uusiomassoilla havaitaan tyypillisesti hieman suurempaa deformaatiota sekä laboratoriossa että kenttäkokeissa. Suuremmat muodonmuutokset voivat johtua siitä, että kokeet on suoritettu melko pian uusiomassojen valmistuksen jälkeen, jolloin elvyttimen diffuusio on vielä kesken. Toisaalta Rekola (2008) arvioi bitumisilla lisäaineilla elvytetyjen uusiomassojen deformaatiokestävyyden yhtä hyväksi kuin uusista materiaaleista valmistettujen massojen. Mc Daniel ym. (2002) puolestaan arvioivat, että asfalttirouheen sisältämä vanha sideaine

parantaa päällysteen deformaatiokestävyyttä lisäämällä sideaineseoksen jäykkyyttä. Usein näin saavutettu hyöty deformaatiokestävyydessä menetetään, kun elvytintä lisätään tarpeettoman paljon tai se on liian pehmeää.

Asfalttipäällysteen lujuutta ja stabiliteettia on yleisesti tutkittu halkaisuvetoljuuskokeella (HVL-koe), jossa sylinterinmuotoista näytekappaletta kuormitetaan murtotilaan saakka halkaisijan suuntaisesti kuvan 12 osoittamalla tavalla. Koekappaleen murtamiseen tarvittun maksimikuormituksen ja näytteen geometrian perusteella voidaan laskea koekappaleen halkaisuvetoljuus (SFS-EN 12697-23 2003). Halkaisuvetoljuuden avulla voidaan arvioida myös päällysteen kykyä vastustaa deformaatiota (Heikkilä, 1989).



Kuva 12. Koekappaleen halkaisuvetoljuuden määrittäminen.

Lahtinen (1984) havaitsi diplomityössään, että öljymäisiä elvyttimiä käytettäessä koekappaleiden lujuudet olivat suurempia kuin bitumisia elvyttimiä käytettäessä. Ero selittyi osittain koekappaleiden tyhjätilalla: öljymäisillä elvyttimillä valmistettujen massojen suurempi lujuus selittyi pienemmällä tyhjätilalla. Tulosten perusteella pääteltiin, etteivät ohuetkaan elvyttimet heikennä päällysteen lujuutta, jos elvytin sekoittuu hyvin vanhan sideaineen kanssa. Pasanen (2009) tutki kandidaatintyössään biofluksin käyttöä asfalttirouheen elvyttimenä ja havaitsi, että biofluksin käyttö elvyttimenä pienentää koekappaleiden halkaisuvetoljuuksia verrattuna bitumisten sideaineiden 160/220 ja 650/900 käyttöön elvyttimenä. Biofluksin käyttöä elvyttimenä kokeiltiin kahtena pitoisuutena: 5 ja 10 % lisäsideaineen määrästä. HVL-kokeet suoritettiin 1, 7, 28 ja 120 vuorokautta koekappaleiden tiivistämisen jälkeen. Suuremman pitoisuuden havaittiin aiheuttavan epätasaista lujuuskehitystä.

Päällysteet ovat jatkuvasti alltiina sään rasituksille, joten on syytä tarkastella myös päällysteiden pakkasen- ja vedenkestävyyttä. Päällysteen ja ennen kaikkea sideaineen jäykkyyden kasvaminen lisää pakkashalkeilua. Siksi uusiopäällysteiden kylmäkestävyys on yleisesti arvioitu huonommaksi uusista materiaaleista valmistettuihin päällysteisiin verrattuina. Kylmäominaisuuksien heikkoutta voidaan kuitenkin kompensoida valitsemalla

ominaisuuksiltaan sopiva lisäsideaine. Uusiomassojen vedenkestävyyden on todettu olevan hyvä. Tämä johtunee siitä, että asfalttirouhe sisältää jo valmiiksi sideaineen peittämiä kiviainesrakeita, jolloin peittoaste on hyvä ja sideainekalvot usein paksuja. Eri elvytintyyppien vaikutuksista päällysteen säänkestävyyteen ei löytynyt tietoa. (Karlsson ym. 2006)

Yleisesti voidaan arvioida, että uusioasfalttipäällysteiden ominaisuudet ovat yhtä hyvät kuin tavallisten uusista materiaaleista valmistettujen päällysteiden, jos massa on suunniteltu huolellisesti. Uusiomassan ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä suurimmaksi arvioidaan RAP-sideaineen ominaisuudet sekä asfalttirouheen osuus uusiomassassa. Laatuongelmat ovat usein liittyneet massan huolimattomaan suunnitteluun ja epähomogeenisuuteen. Valvomalla asfalttirouheen laatua ja käyttämällä reologisilta ominaisuuksiltaan sopivaa lisäsideainetta tai elvytintä (luku 2.4.1) on mahdollista valmistaa hyvin toimivia päällysteitä myös vilkkaasti liikennöidyille teille. Elvyttimien käytön ja uusiomassojen valmistustekniikan kehittymisen myötä myös suurempien RC-pitoisuuksien käyttö tulee mahdolliseksi. Uusia lisäaineita tutkittaessa niiden kelpoisuus asfalttirouheen elvyttimiksi on todennettava sekä laboratorio- että kenttäkokeilla päällysteen laadun varmistamiseksi. (Celauro ym. 2010, Kandhal ym. 1995, Mc Daniel ym. 2002, Nölting ym. 2011, Widyatmoko 2008)

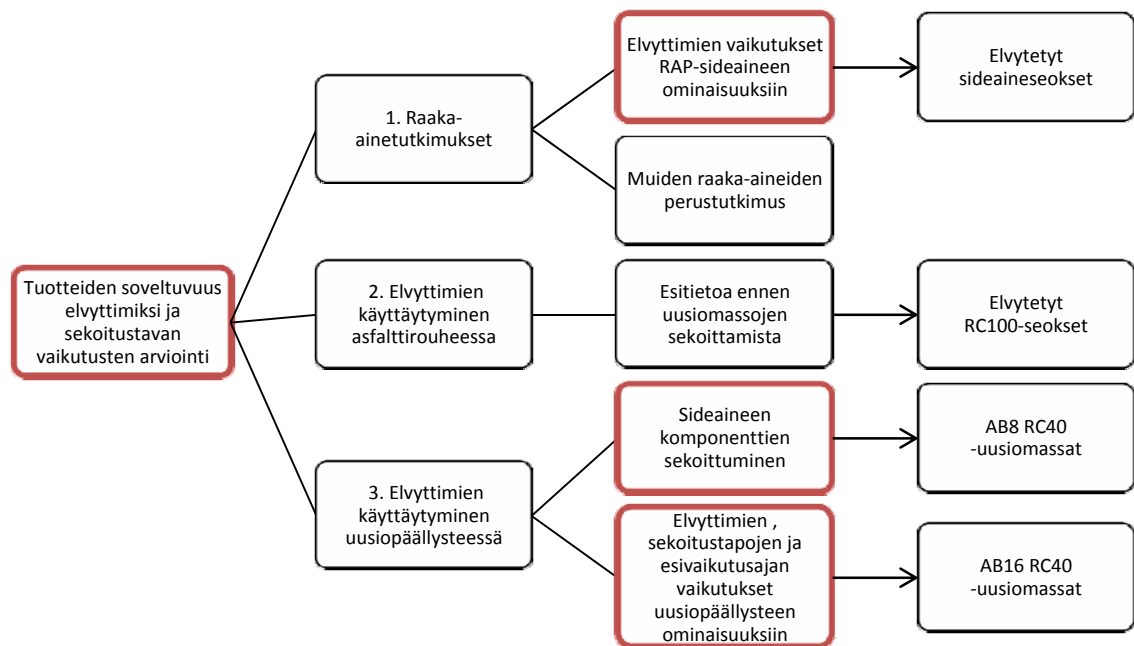
3 Laboratorio-osuudessa käytetyt raaka-aineet ja tutkimusmenetelmät

3.1 Tutkimusasetelma

Tämän tutkimuksen laboratorio-osuuden päätavoitteena oli selvittää tutkimukseen mukaan otettujen neljän tuotteen käyttömahdollisuudet asfalttirouheen elvyttiminä. Toisena tavoitteena oli selvittää, saavutetaanko etua lisäämällä elvytin suoraan asfalttirouheeseen, ja onko elvyttimen esivaikutusajalla vaikutusta uusiopäällysteen ominaisuuksiin. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi laboratorio-osuus jaettiin kolmeen osa-alueeseen:

1. Raaka-ainetutkimukset asfalttirouheen, kiviaineksen ja sideaineen ominaisuuksien selvittämiseksi (luku 3.2)
2. Elvyttimien käyttäytyminen asfalttirouheessa (luku 3.3)
3. Elvyttimien käyttäytyminen uusiomassassa (luku 3.4)

Laboratorio-osuuden ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin tutkimuksessa käytettävien raaka-aineiden perusominaisuuksia sekä tutkittiin elvyttimien vaikutuksia RAP-sideaineen ominaisuuksiin. Toisessa vaiheessa tutkittiin elvyttimien käyttäytymistä asfalttirouheessa: Lämmitetyn asfalttirouheen ja elvyttimen seoksesta tiivistettyjen RC100 - koekappaleiden avulla voitiin tutkia elvyttimen toimintaa tilanteessa, jossa elvytin pääsee diffundoitumaan suoraan vanhaan sideaineeseen ilman väliainetta. Kolmas osuus jakautui edelleen kahteen vaiheeseen, joista ensimmäisessä tutkittiin elvyttimen ja sideaineiden välistä sekoittumista uusiomassan valmistuksen yhteydessä. Toisessa vaiheessa tutkittiin elvyttimien ja sekoitustapojen sekä esivaikutusajan vaikutuksia uusiomassojen ja tiivistettyjen uusiopäällysteiden ominaisuuksiin. Ohuiden öljymäisten elvyttimien on pelätty heikentävän uusiopäällysteiden kestävyyttä esimerkiksi alentamalla liiallisesti päällysteen lujuutta ja heikentämällä deformaatiokestävyyttä. Tutkimuksen osa-alueita on havainnollistettu kuvassa 13.



Kuva 13. Tutkimuksen laboratorio-osuuden rakenne.

3.2 Raaka-ainetutkimukset

3.2.1 Kiviainestutkimukset

Uusiomassojen valmistamiseen käytetty lisäkiviaines noudettiin NCC Roadsin asfalttiasemalta. Kiviaines oli Rudus Oy:n louhimaa ja murskaamaa. Kalliomurske oli jaettu lajitteisiin 0/5, 5/11 sekä 11/16. Lisäksi asfalttiasemalta noudettiin asfalttimassan fillerinä käytettävää lentotuhkaa. Kaikissa laboratoriossa valmistetuissa uusiomassoissa käytettiin samaa kiviainesta, joten kiviaineksesta tutkittiin vain perusominaisuuksia sen soveltuvuuden varmistamiseksi (taulukko 1).

Taulukko 1. Kiviaineskokeiden menetelmätiedot.

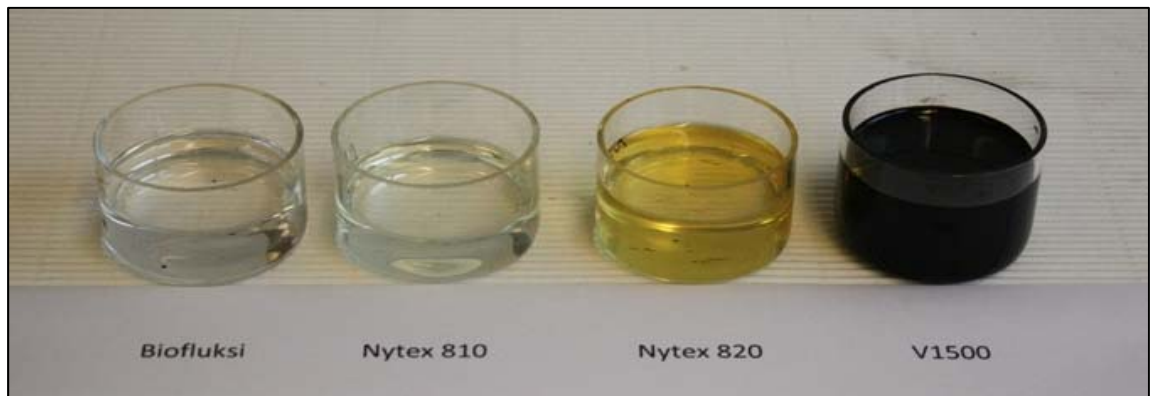
Tutkittava ominaisuus	Menetelmä
Kiviaineksen kiintotiheys verkkokorimenetelmällä	SFS-EN 1097-6 Liite A
Hienoaineksen veden adsorptio	PANK 2108
Hienoaineksen ominaispinta-ala	Liite A
Rakeisuus	SFS-EN 12697-2

Hienoainestutkimuksia suoritettiin kiviaineksen 0/5 -lajitteesta erotetulle hienoainekselle sekä asfalttirouheesta uutuosuodatuksessa erotetulle hienoainekselle ja fillerikiviaineksena käytettävälle lentotuhkalle. Hienoaineksista tutkittiin veden adsorptio sekä ominaispinta-ala hienoaineksen hydrofiilisuuden selvittämiseksi. Hydrofiilisuus lasketaan veden adsorption

ja ominaispinta-alan suhteena eli se kuvaa hienoaineksen vedenadsorptiokykyä pinta-alayksikköä kohti. Ominaispinta-ala määritettiin Turun yliopiston geologian laitoksella.

3.2.2 Elvyttimet

Tutkimukseen valittiin mukaan neljä tuotetta: biofluksi, Nytex 810, Nytex 820 ja V1500. Taulukossa 2 on lyhyesti esitelty näiden tuotteiden ominaisuuksia. Tuotteiden väri on nähtävissä kuvasta 14.



Kuva 14. Tutkimukseen valitut elvyttimet: biofluksi, Nytex 810, Nytex 820 ja V1500.

Biofluksi on bioöljypohjainen tuote, joka valmistetaan Neste Oilin patentoimalla NExBTL-prosessilla uusiutuvista raaka-aineista, kuten kasviöljyistä ja eläinrasvoista, sekä vedystä. Biofluksi koostuu 10–20 hiiliatomin haaraketjuisista ja lineaarisista alkaaneista, joten sitä voidaan pitää kemialliselta luonteeltaan parafiinisena. Biofluksin käytön etuina ovat sen raaka-aineiden uusiutuvuuden lisäksi vähäisemmät hiilivetyypäästöt. Biofluksin käyttöä elvyttimenä on tutkittu aiemmin Teknillisessä korkeakoulussa valmistuneessa kandidaatintyössä (Pasanen 2009).

Nytex 810 ja Nytex 820 ovat korkeasti jalostettuja prosessiöljyjä, joiden kemiallista luonnetta voidaan pitää nafteenisina. Ne siis sisältävät runsaasti rengasmaisia hiilivetyjä, mutta niistä on hydrauksella poistettu vaaralliset polyaromaattiset hiilivedyt. Hydraus on kemiallinen reaktio, jossa molekyylin tyydyttymättömiin sidoksiin liitetään vetyä, jolloin yhdisteistä tulee stabiilimpia. Nytex 820:n ominaisuuksia asfalttirouheen elvyttimenä tutkittiin Ruotsissa vuonna 2010 (Tyllgren 2010). Nytex 810 on vastaavanlainen tuote, mutta hieman kevyempi ja viskositeetiltaan alhaisempi.

Viskositeettiluokiteltu bitumi V1500 edustaa tutkimuksen bitumista elvytintä, ja on luonteeltaan aromaattinen. V1500 on viskositeetiltaan alhaisin asfalttinormeissa luokiteltu bitumi, mutta sen ominaisuuksia elvyttimenä ei tunneta. Muista tutkittavista lisäaineista poiketen V1500 on asfalttiteollisuudessa yleisesti käytettävä valmiste, jolloin sen saatavuus on hyvä.

Taulukko 2. Tutkimukseen valittujen tuotteiden ominaisuuksia.

Ominaisuus	Yks.	Biofluksi	Nytex 810	Nytex 820	V1500
Hiilivetyjen tyyppi		Parafiininen	Nafteeninen	Nafteeninen	Aromaattinen
Väri		Kirkas	Kirkas	Vaal. keltainen	Musta
Tiheys 15 °C	kg/m ³	777	903	920	985
Kin. viskositeetti 60 °C	mm ² /s	2	10	36	1500
Leimahduspiste	°C	> 60	174	212	> 200
Jähmettymispiste	°C		-45	-30	

3.2.3 Asfalttirouheen tutkimukset

Asfalttirouhe noudettiin tutkimuksia varten NCC Roadsin asfalttiasemalta. Asfalttirouhe oli murskattu asemalla vanhan asfaltin varastokasasta raekokoon 0/16. Rouheet otettiin katoksessa säilytetystä varastokasasta. Asfalttirouheen sideainepitoisuudesta ja rakeisuudesta sekä niiden hajonnasta saatiin tietoja NCC Roadsin valvontanäytteistä. Rouheen ominaisuuksissa esiintyy hajontaa johtuen murskatun materiaalin laadun ja iän vaihtelusta. Tielaboratorioon noudetun rouhe-erän ominaisuuksien tarkentamiseksi rouheesta jaettiin jakolaatikon avulla neljä rinnakkaisnäytettä, joille tehtiin taulukon 3 mukaiset tutkimukset.

Taulukko 3. Asfalttirouheen tutkimusmenetelmät.

Ominaisuus	Menetelmä
Sideainepitoisuus	PANK 4102
Rakeisuus	SFS-EN 933-1
Sideaineen talteenotto	PANK 1003
Sideaineen tunkeuma	SFS-EN 1426

Asfalttirouheen sideaineen (RAP-sideaine) ominaisuuksia tutkittiin laajemmin sideainekokeiden yhteydessä (luku 3.2.4). Asfalttirouheen seassa oli yksittäisiä kiinteitä epäpuhtauksia, kuten pieniä paloja puuta, betonia sekä tiemerkinämassaa. Epäpuhtauksien määrä oli kuitenkin hyvin vähäinen.

Asfalttirouheen tutkimuksien yhteydessä laskettiin RAP-sideaineen pehmentämiseen vaadittavat elvytinnäärät kaavalla (5). Sideaineseoksen tunkeuman tavoitetasoksi asetettiin 85 1/10 mm, joka sijoittuu bitumiluokan 70/100 puoliväliin. Kyseinen tunkeuma vastaa noin 115 Pas dynaamista viskositeettia 60 °C:n lämpötilassa. Arvio perustuu 70/100-bitumin sideaineanalyysien tuloksiin. RAP-sideaineen tunkeumana käytettiin laskennassa arvoa 30 1/10 mm, jonka arvioitiin vastaavan noin 1500 Pas dynaamista viskositeettia 60° lämpötilassa. RAP-sideainetta koskevat lähtöarvot perustuivat NCC Roadsin ja Nynas Oy:n kokemuseräiseen tietoon sekä tutkimus- ja valvontatulosten keskimääräisiin tuloksiin.

Laskentaa varten dynaamiset viskositeetit muutettiin kinemaattisiksi viskositeeteiksi kaavan (1) mukaisesti. Sideaineen tiheytenä käytettiin likimääräistä arvoa 1000 kg/m^3 . Laskennan lähtöarvot on esitetty taulukossa 4 ja tulokset taulukossa 5.

Taulukko 4. Viskositeetilaskennassa käytetyt lähtöarvot RAP-sideaineen ja tavoitetason osalta.

	Laskennassa käytetty tiheys	Tunkeuma	Dynaaminen viskositeetti	Kinemaattinen viskositeetti
	<i>kg/m³</i>	<i>1/10 mm</i>	<i>Pas</i>	<i>mm²/s</i>
RAP-sideaine	1000	30	1500	1500000
Tavoitetaso	1000	85	115	115000

Taulukko 5. Elvyttimien ja RAP-sideaineen sekoitussuhteet tavoitellun 70/100 -bitumin tunkeumatason saavuttamiseksi.

Elvytin	Sideaineseoksen nimi	Kinemaattinen viskositeetti 60 °C	Elvyttimen osuus	RAP-sideaineen osuus
		<i>mm²/s</i>	<i>massa- %</i>	<i>massa- %</i>
Biofluksi	RAP+BF	2	6,6	93,4
Nytex 810	RAP+N81	10	11,0	89,0
Nytex 820	RAP+N82	36	14,4	85,6
V1500	RAP+V15	1500	30,0	70

3.2.4 Sideainetutkimukset

Sideainetutkimuksissa tutkittiin elvyttimen vaikutuksia RAP-sideaineen ominaisuuksiin. Elvytettyjen sideaineiden ominaisuuksia vertailtiin tuoreeseen 70/100 -bitumiin, sillä elvyttämisen tavoitteena oli palauttaa sideaineen toiminnalliset ominaisuudet kyseisen bitumiluokan puoliväliin.

Elvyttimillä ei voida täysin palauttaa sideaineen kemiallisia ominaisuuksia, joten sideainetutkimusten painopiste sijaitsi fysikaalisten ominaisuuksien tutkimisessa. Sideaineista määritettiin tunkeuma, pehmenemispiste, Fraass -murtumispiste sekä reologisista ominaisuuksista kompleksinen leikkausmoduuli ja vaihekulma. Sideaineen kykyä vastustaa deformaatiota tutkittiin myös MSCR-kokeella. Kylmäominaisuuksia testattiin murtumispisteen lisäksi taivutusplakkireometrillä (BBR). Lisäksi tutkittiin sideaineiden SARA -fraktiot ohutlevykromagrafiaan perustuvalla Iatrosan -laitteella kemiallisessa koostumuksessa tapahtuvien muutosten selvittämiseksi. Tutkimuksissa käytetyt menetelmät on kirjattu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Sideainekokeiden menetelmätiedot.

Tutkittava ominaisuus	Menetelmä
Sideaineen talteenotto	PANK-1003
Tunkeuma	SFS-EN 1426
Pehmenemispiste	SFS-EN 1427
Fraass -murtumispiste	SFS-EN 12593
Kompleksinen leikkausmoduuli ja vaihekulma (DSR)	Liite B / SFS-EN 14770
Deformaatiokestävyys (MSCR)	AASHTO TP 70-11
Taivutusvirumajäykkyys (BBR)	SFS-EN 14771
SARA-fraktiot (Iatrosan)	Liite C

Sideainetutkimuksia varten asfalttirouheen sisältämää bitumia eristettiin rotaatiohaiduttimella NCC Roadsin toimittamista bitumi-metyleenikloridiliuoksista, jotka oli kerätty talteen rouheen uuttosuodatusten yhteydessä. Näytteiden valmistamista varten talteen otettu sideaine lämmitettiin 160 °C lämpötilaan ja sekoitettiin huolellisesti. Sideainetta kaadettiin tunnettu määrä neljään tunkeumakoeastiaan, minkä jälkeen ne peitettiin kellolasilla ja asetettiin takaisin lämpökaappiin odottamaan sekoitusta. Elvytintä lisättiin tarvittava määrä suhteessa sideaineen määrään taulukon 5 mukaisesti. Sideainenäytettä sekoitettiin 10 minuuttia pienellä lastalla lämpölevyn päällä. Sekoituksen jälkeen näyte peitettiin jälleen kellolasilla ja jätettiin jäähtymään huoneenlämpöön noin tunnin ajaksi. Elvytettyjen näytteiden lisäksi valmistettiin vertailunäytteet RAP-sideaineesta ilman elvytintä sekä tuoreesta 70/100 -bitumista. Näytteet temperoitiin vesihauteessa 25 °C lämpötilaan tunkeuman määrittämistä varten.

Tielaboratoriossa näytteistä määritettiin tunkeuma sekä reometrillä kompleksinen leikkausmoduuli, vaihekulma sekä virumis- ja palautumisominaisuudet. Näytteiden ylimääräisiä lämmityskertoja vältettiin, joten osanäytteet reometritutkimuksia varten otettiin huoneenlämpöisestä sideainenäytteestä kuumalla lastalla. Näiden tutkimusten jälkeen näytteet toimitettiin Porvooseen Neste Oil Oy:n tutkimuslaboratorioon muita taulukossa 6 esitettyjä sideainekokeita varten. Ennen kokeiden suorittamista Porvoossa näytteet sekoitettiin ja homogenisoitiin uudelleen.

3.3 Elvyttimien käyttäytyminen asfalttirouheen kanssa

Asfalttirouheen ja elvyttimien seokset valmistettiin kaikilla neljällä elvyttimellä käyttäen taulukon 5 mukaisia elvytinosuuksia. Asfalttirouhetta lämmitettiin lämpökaapissa 140 °C:ssa noin viisi tuntia kosteuden poistamiseksi. Asfalttirouhe kaadettiin esilämmitettyyn sekoitimeen, jonka käydessä rouheen sekaan valutettiin elvytin tasaisesti ohuena nauhana. Sekoitusajaksi valittiin 2 minuuttia, jotta varmistuttiin suhteellisen pienen elvytinmäärän hyvästä sekoittumisesta rouheeseen. Seos siirrettiin pellillä lämpökaappiin odottamaan

tiivistystä. Asfalttirouheen lämpötila aleni sekoituksen aikana 135 °C:sta noin 117 °C lämpötilaan, ja seoksen uudelleen lämpenemistä jouduttiin odottamaan noin 45 minuuttia. Rouheseoksista valmistettiin halkaisijaltaan 100 mm koekappaleita. Koekappaleiden tiivistys suoritettiin kiertotiivistimellä käyttäen 200 kierrosta, 1° kallistuskulmaa ja 600 kPa tiivistyspainetta. Vertailun vuoksi valmistettiin referenssikoekappaleita pelkästä lämmitetystä asfalttirouheesta ilman elvyttintä. Koekappaleiden valmistuksen yhteydessä ei siis käytetty lisämassaa tai sideainetta.

Koekappaleiden geometria tarkistettiin mittaamalla korkeus ja halkaisija. Lisäksi näytteet punnittiin sekä ilmassa että vedessä kappaleiden tiheyksien määrittämiseksi. Koekappaleista määritettiin epäsuora jäykkyysmoduuli, dielektrisyysarvo sekä ultraäänen kulkeutumisaika näytteen läpi 1, 7, 14 ja 28 vuorokautta tiivistämisen jälkeen. Kaikki kokeet tehtiin 20 °C lämpötilassa. Kokeiden välillä koekappaleet varastoitiin huoneenlämmössä. Koesarjan lopuksi kappaleista määritettiin halkaisuvetolujuus. Käytetyt tutkimusmenetelmät on listattu taulukossa 7. Dielektrisyiden ja ultraäänen läpikulkuajan avulla haluttiin selvittää koekappaleissa ajan suhteen tapahtuvia muutoksia homogeenisuudessa. Molemmat menetelmät ovat kappaleita rikkomattomia. Epäsuoran jäykkyysmoduulin ja halkaisuvetolujuuden avulla arvioitiin elvyttimien vaikutusta asfalttirouheesta valmistettujen koekappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin.

Taulukko 7. RC100 -koekappaleille tehdyt tutkimukset.

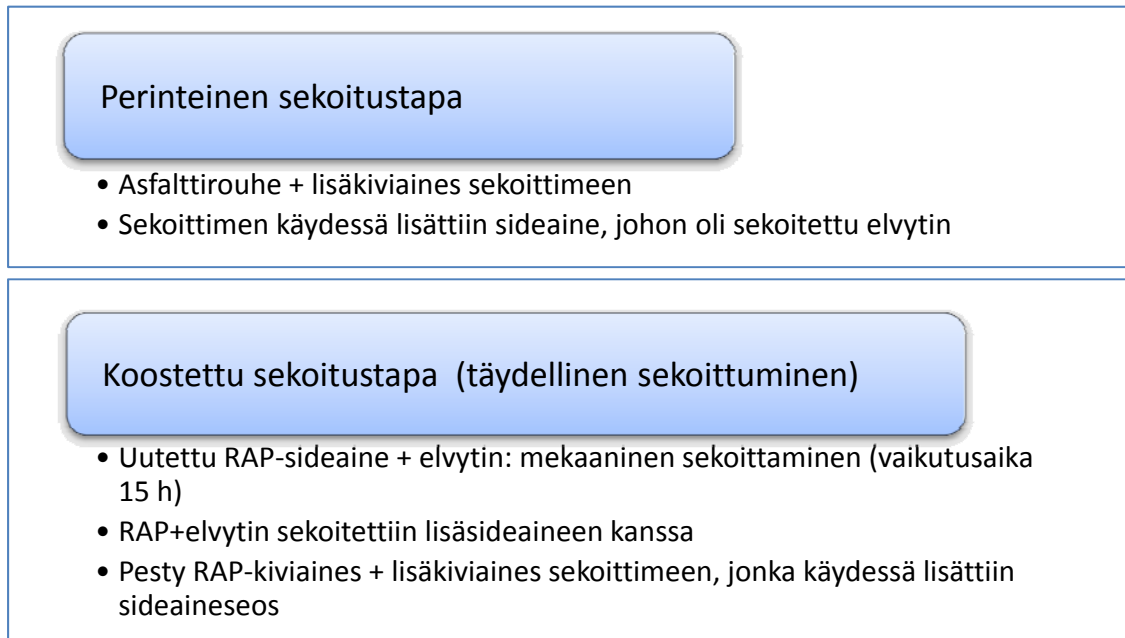
Tutkittava ominaisuus	Menetelmä
Tyhjätila	SFS-EN 12697-8
Ultraäänen läpikulku-aika	Liite E
Epäsuora jäykkyysmoduuli 20 °C	SFS-EN 12697-26
Halkaisuvetolujuus 20 °C	SFS-EN 12697-23

3.4 Elvyttimien käyttäytyminen uusiomassassa

3.4.1 Elvyttimen ja sideaineen sekoittuminen uusiomassan valmistuksen yhteydessä

Tässä laboratorio-osuuden vaiheessa tutkittiin elvyttimien ja sideaineen sekoittumista uusiomassan valmistuksessa. Öljymäisiä, viskositeetiltaan alhaisia elvyttimiä käytettäessä on oltava varma sideaineiden ja elvyttimen välillä tapahtuvasta hyvästä sekoittumisesta. Epätäydellisen sekoittumisen myötä vaarana on uusiomassan epähomogeenisuus ja päällysteen epästabiili käyttäytyminen. Kun elvyttimen ja RAP-sideaineen sekä uuden lisäsideaineen välillä tapahtuu sekoittuminen, uusiomassan sideaine on homogeenista ja päällyste tasalaatuinen. Jos elvyttin levittyy epätasaisesti, sekoittumista ei tapahdu tai elvyttin jopa pyrkii erottumaan sideaineesta, uusiopäällysteen koostumus ei ole homogeeninen ja lujuus oletettavasti alenee. Uusiomassassa tapahtuvan sekoittumisen

tutkimiseen käytettiin teoreettista vertailuasetelmaa, jossa käytettiin kahta eri sekoitustapaa kuvan 15 mukaisesti.



Kuva 15. Sekoittumistutkimukseen liittyvien AB8 RC40 -massojen sekoitustavat.

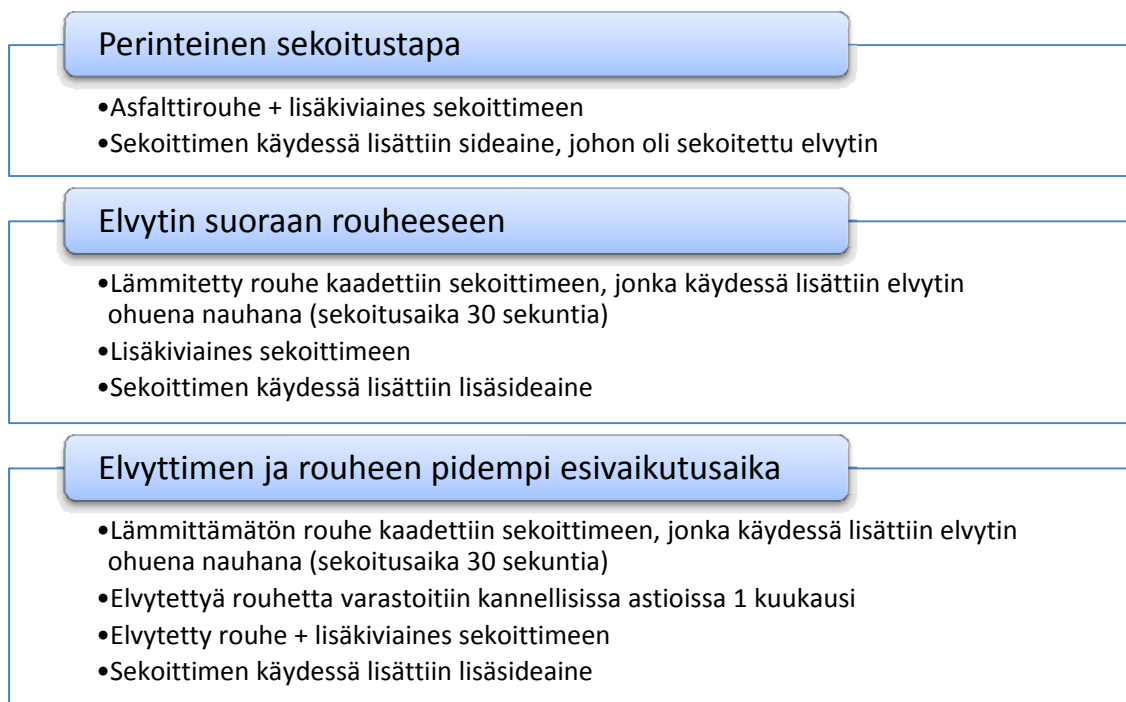
Koostetussa sekoitustavassa uusiomassan komponentit erotettiin toisistaan ja sekoitettiin uudelleen vaiheittain. Koostettu sekoitustapa toimii tutkimuksen teoreettisena ideaalitapauksena, jossa elvyttimen ja asfalttirouheen vanhan sideaineen välillä tapahtuva sekoittuminen on täydellinen. Koostetulla valmistustavalla elvytin ja uutettu RAP-sideaine sekoitettiin toisiinsa ennen tuoreen 70/100 -bitumin lisäämistä, jolloin elvyttimen diffuusio RAP-sideaineeseen pääsi tapahtumaan ilman väliainetta. Tällaisessa ihanteellisessa tilanteessa elvyttimellä oletettiin olevan suurempi palauttava vaikutus sideaineen ominaisuuksiin kuin perinteisellä sekoitustavalla valmistetuissa uusiomassoissa. Jos näillä kahdella eri sekoitustavalla valmistettujen massojen ja niistä tiivistettyjen koekappaleiden tutkimuksissa esiintyy eriävää käyttäytymistä, voidaan olettaa, että perinteisellä sekoitustavalla tapahtuva sideainekomponenttien välinen sekoittuminen ei ole täydellistä. Uusiomassojen suunnittelu ja valmistamiseen liittyvät yksityiskohdat on esitelty luvussa 3.4.3. Massoille ja koekappaleille suoritettavat kokeet on kuvattu alaluvussa 3.4.4 ja tulokset luvussa 5.1.3.

3.4.2 Elvyttimien ja sekoitustapojen vaikutus uusiomassan ja -päällysteen ominaisuuksiin

Tässä laboratorio-osuuden vaiheessa tutkittiin elvyttimien, elvyttien lisäystavan ja esivaikutusajan vaikutuksia uusiopäällysteen ominaisuuksiin. Elvyttimien vaikutusta uusiopäällysteen ominaisuuksiin tutkittiin vertailemalla elvytetyistä uusiomassoista valmistettujen koekappaleiden ominaisuuksia referenssimassasta valmistettuihin

koekappaleisiin. Referenssimassa oli vastaavalla kiviaineksen rakeisuudella ja RC -prosentilla valmistettu tyypillinen uusiomassa, jossa varsinaisen elvyttimen sijaan käytettiin pehmeämpää lisäsideainetta. Sekoitustavan ja esivaikutusajan vaikutusta uusiopäällysteen ominaisuuksiin tutkittiin valmistamalla uusiomassoja kolmella eri sekoitustavalla. Tutkimuksilla haluttiin selvittää, onko eduksi lisätä öljymäinen elvytin suoraan asfalttirouheen joukkoon: Saavutetaanko näin toimittaessa homogeenisempi sideaineseos ja parempi elvyttävä vaikutus kuin perinteisellä sekoitustavalla, jossa elvytin sekoitetaan uusiomassaan lisäsideaineen mukana. Esivaikutusajan merkityksen selvittämiseksi massoja valmistettiin kahdella esivaikutusajalla. Lyhyemmäksi ajaksi valittiin 30 sekuntia, joka vastaa asfalttiasemalla kuumasekoituksen yhteydessä järjestettävissä olevaa esivaikutusaikaa. Pidemmäksi esivaikutusajaksi valittiin 1 kuukausi, jonka järjestäminen asfalttiasemalla tarkoittaisi elvyttimen lisäämistä rouheeseen esimerkiksi murskauksen yhteydessä.

Tässä tutkimusosiossa käytetyt sekoitustavat on esitelty kuvassa 16. Uusiomassojen suunnittelu ja valmistamiseen liittyvät yksityiskohdat on esitelty luvussa 3.4.3. Massoille ja koekappaleille suoritettut tutkimukset on esitetty luvuissa 3.4.4 ja tulokset luvussa 5.1.3.



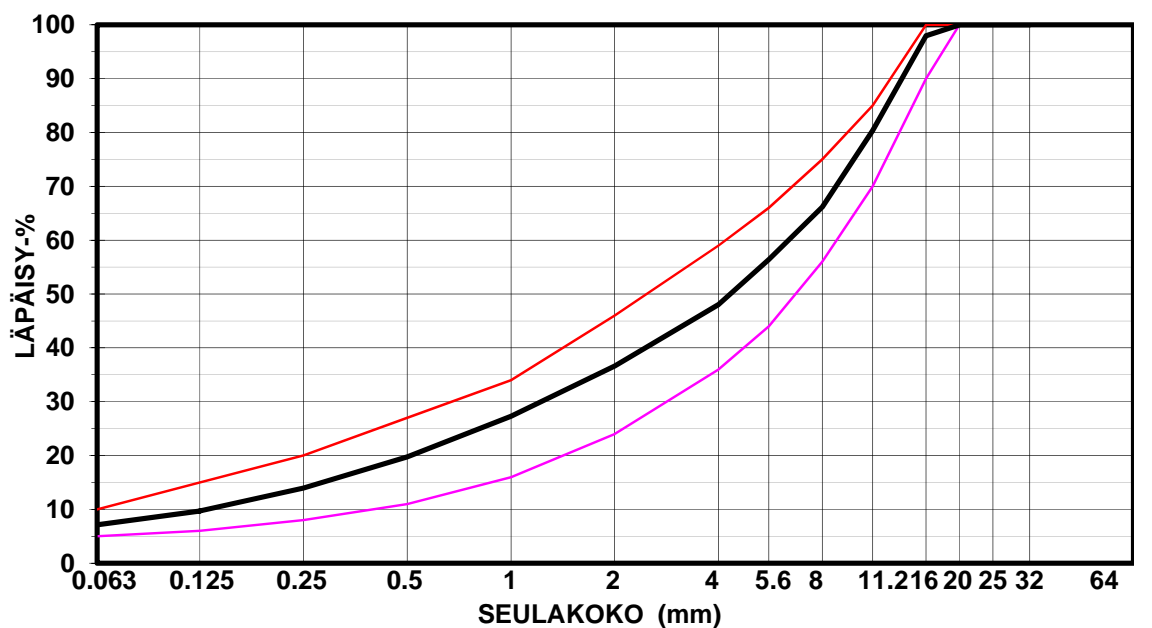
Kuva 16. AB16 RC40 -massojen sekoitustavat ja esivaikutusajat.

3.4.3 Asfalttiasemien suunnittelu ja valmistus

Tässä luvussa on esitelty laboratoriossa sekoitetut uusiomasfalttiasemat ja niiden valmistukseen liittyvät yksityiskohdat. Lisätietoa asemien suunnittelusta on esitetty liitteessä P. Laboratoriossa sekoitettiin kahta kulutuskerroksen asfalttibetonia: AB8 RC40

ja AB16 RC40. Luvussa 3.4.1 esiteltyä elvyttimen ja sideaineen sekoittumistutkimusta varten valmistettujen massojen maksimiraekooksi valittiin 8 mm, koska pienempi maksimiraekoko pienentää koekappaleiden välistä hajontaa halkaisuvetolujuuskokeissa. Luvussa 3.4.2 kuvattua elvyttimien ja sekoitustapojen vertailua varten valmistettiin AB16 RC40 -massaoja, jotka suunniteltiin NCC Roadsin koekohteessa käyttämän uusiomassan kaltaiseksi. Massoissa käytetyt elvyttinmäärät olivat taulukon 5 mukaiset. Elvytettyjen uusiomassojen lisäsideaineena käytettiin 70/100 -bitumia.

AB8 RC 40 -massojen valmistamista varten kiviaineslajite 5/11 katkaistiin 5/8 -lajitteeksi ja asfalttirouhe seulottiin rakeisuudeltaan yhdeksi 0/8 -lajitteeksi. Uuden kiviaineslajitteen rakeisuus tarkistettiin pesuseulonnalla ja asfalttirouheen rakeisuus ja sideainepitoisuus uuttosuodatuksella. Massa suunniteltiin asfalttinormien (PANK ry 2011) mukaisesti vastaamaan ohjerakeisuusalueen keskialuetta, ja tavoitesideainepitoisuudeksi valittiin 5,9 massa- %. Suunnittelua vaikeutti kiviaineslajitteiden vähäinen määrä, jolloin lajitteet olivat leveitä ja ohjerakeisuuden saavuttaminen vaikeaa. Vaihtoehtona olisi ollut lajitteiden katkaisu edelleen kapeammiksi, mutta tähän ei haluttu ryhtyä kireän aikataulun vuoksi. Suunniteltu rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 17.



Seulakoko	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8
Läpäisy- %	9,0	12	18	26	37	50	66	77	90

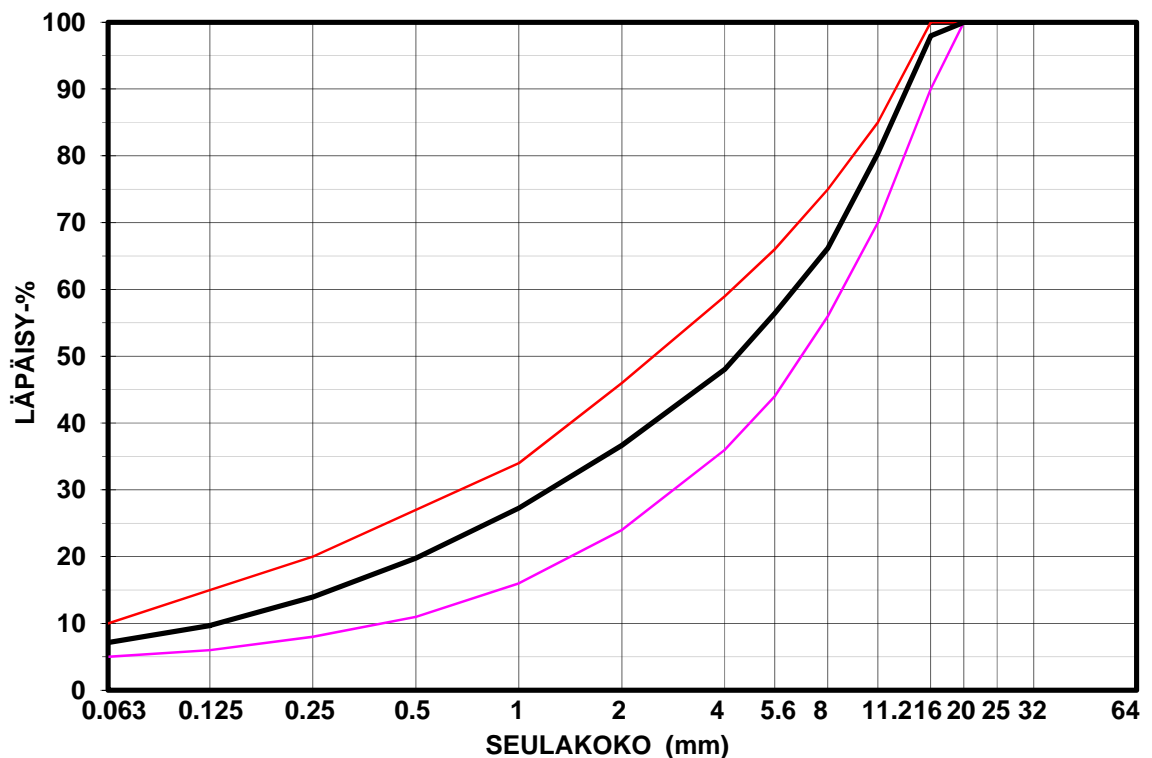
Kuva 17. AB8 RC40 -massojen suunniteltu kiviaineksen rakeisuus.

Sekoittumistutkimuksessa käytettiin kahta elvyttintä: biofluksi ja Nytex 820. Elvyttimet valittiin siten, että mukaan otettiin luonteeltaan ja viskositeetiltaan erilaiset elvyttimet. Lisäksi valintaan vaikuttivat RC100 -kokeiden tulokset: biofluksi ja Nytex 820 osoittivat toisistaan poikkeavaa käyttäytymistä. Massat nimettiin taulukon 8 mukaisesti.

Taulukko 8. AB8 RC40 -massojen nimet elvyttimen ja sekoitustavan mukaan.

Sekoitustapa / Elvytin	Biofluksi	Nytex 820
Perinteinen	BF Perint	N82 Perint
Koostettu	BF Koost	N82 Koost

AB16 RC40 -massat suunniteltiin vastaamaan NCC Roadsin koekohteen uusiomassan rakeisuuskäyrää. Massojen valmistamista varten 0/5 -kiviaineslajitteesta erotettiin hienoaines, jotta rakeisuuskäyrän hienon kiviaineksen osuus saataisiin varmemmin kohdalleen. Sideainepitoisuudeksi valittiin 5,5 massa- %. Massan suunniteltu rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 18.



Seulakoko [mm]	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	11.2	16	20
Läpäisy -%	7.1	10	14	20	27	37	48	56	66	80	98	100

Kuva 18. AB16 RC40 -massojen suunniteltu rakeisuuskäyrä.

Laboratoriossa sekoitettiin 13 erilaista AB 16 RC 40 -massaa, jotka nimettiin käytetyn elvyttimen ja sekoitustavan perusteella taulukon 9 mukaisesti. Massojen annoskoko oli 20 kg, lukuun ottamatta kahta massaa: REF ja N82 RH. Näitä massoja tarvittiin 50 kg annos, ja hyvän sekoittumisen varmistamiseksi massat päädyttiin sekoittamaan kahdessa erässä: 20 ja 30 kg.

Taulukko 9. Sekoitettut AB16 RC40 -massat ja niistä käytettävät lyhenteet.

Elvytin / Sekoitustapa	Perinteinen (tapa 1)	Elvytin rouheeseen 30 s (tapa 2)	Elvytin rouheeseen 1kk (tapa 3)
Biofluksi	BF Perint	BF RH	BF 1kk
Nytex 810	N81 Perint	N81 RH	N81 1kk
Nytex 820	N82 Perint	N82 RH	N82 1kk
V1500	V15 Perint	V15 RH	V15 1kk
Referenssi, B148	REF	-	-

Kaikkien tässä tutkimuksessa valmistettujen uusiomassojen sekoitukseen käytettiin kaksiakselista lavoilla varustettua laboratoriosekoitinta, joka esilämmitettiin n. 155 °C lämpötilaan. Raaka-aineiden esilämmitysajat ja -lämpötilat on esitetty taulukossa 10. Lisäkiviainesta kuumennettiin uunissa yön yli, mutta asfalttirouheen lämmitysaika säädettiin ajastimella lyhyemmäksi (noin 5 tuntia). Rouhe sitoo itseensä runsaasti kosteutta, joka tulee haihduttaa pois ennen sekoitusta. Lisäksi sideaineiden sekoittumisen kannalta on välttämätöntä, että RAP-sideaine on riittävän pehmeää. Toisaalta rouheen liallista kuumentamista on varottava sideaineen vanhenemisen vuoksi. Elvyttimet V1500 -bitumia lukuun ottamatta olivat viskositeetiltaan niin alhaisia, ettei niitä tarvinnut erikseen lämmittää ennen sekoittamista rouheeseen tai lisäsideaineeseen. V1500 lämmitettiin 120 °C lämpötilaan hyvän sekoittumisen saavuttamiseksi. Massoja sekoitettiin 2–3 minuuttia ennen kuin ne siirrettiin uuniin odottamaan tiivistystä.

Sekoitustavassa 3 (elvyttimen ja rouheen 1 kuukauden esivaikutusaika) on huomattava, ettei rouhetta lämmitetty ennen elvyttimen lisäämistä. Myöskään laboratoriosekoitinta ei lämmitetty, mutta sekoittimessa oli aiemmin samana päivänä sekoitettujen massojen vuoksi. Tällä menettelyllä vältettiin yksi sideaineen lämmityskerta ja estettiin rouheen paakkuuntuminen varastoinnin aikana.

Taulukko 10. Uusiomassan raaka-aineiden lämmitysajat ja lämpötilat.

	Yks.	Lisäkiviaines	Asfalttirouhe	Lisäsideaine	Elvytin
Lämpötila	°C	170	140	160	25–120
Lämmitysaika	h	> 12	5	2–3	0,5–2

3.4.4 Tiivistämättömän ja tiivistetyn asfalttimassan tutkimukset

Sekoituksen jälkeen massojen lämpötila oli noin 130 °C. Sekoitustavalla 2 valmistettujen massat jäähtyivät hieman enemmän rouheen lämpötilan laskeutessa esisekoituksen aikana. Massojen annettiin lämmitä lämpökaapissa n. 145 °C lämpötilaan ennen tiivistämisen aloittamista. Kaikista sekoitetuista asfalttimassoista otettiin massanäyte maksimitiheyden ja sideainepitoisuuden määrittämistä varten.

Maksimitiheyden määrittäminen Ricen menetelmällä (PANK 4109) on sitä tarkempaa, mitä irtonaisempaa massa on. Jokaisesta massasta tehtiin kaksi rinnakkaista määrittystä jakamalla massanäytteestä kaksi sopivan kokoista osanäytettä. Uusiomassojen sideainepitoisuus ja rakeisuus tarkistettiin uuttosuodatusmenetelmällä (PANK 4102) käyttäen kahta rinnakkaista määrittystä. Sideainepitoisuuden tarkistukset koettiin tarpeellisiksi, koska sekoituksen yhteydessä bitumin lisäys tehdään käsin ja oikean määrän kaataminen sekoittimeen on vaikeaa.

Sekoitetuista uusiomassoista tiivistettiin koekappaleita ICT -kiertotiivistimellä käyttäen 100 kierrosta, 1 ° kallistuskulmaa ja 600 kPa painetta. Kaikista uusiomassoista valmistettiin 12 halkaisijaltaan 100 mm ja korkeudeltaan noin 60 mm koekappaleita. Lisäksi kahdesta AB16 RC40 -massasta (REF ja N82 RH) valmistettiin halkaisijaltaan 150 mm ja korkeudeltaan 80 mm koekappaleita, jotka sahattiin 60 mm korkeiksi. Koekappaleet sahattiin, jotta niiden pinta olisi mahdollisimman suora ja tasainen jaksollista virumiskoetta varten. Kaikkien koekappaleiden geometria tarkistettiin, ja päällysteen tiheys määritettiin hydrostaattisesti punnitsemalla kappaleet ilmassa ja vedessä. Päällysteen tiheyden ja asfalttimassan maksimitiheyden perusteella laskettiin päällysteeseen jäävän tyhjätilan osuus.

Koekappaleita tutkittiin 1, 7 ja 28 vuorokautta tiivistyksen jälkeen taulukon 11 mukaisesti. AB8 RC40 -massojen koekappaleista tutkittiin elvyttimen sekoittumisen vaikutusta päällysteen halkaisuvetolujuuteen ja epäsuoraan jäykkyysmoduuliin. AB16 RC40 -massoista tiivistetyille koekappaleille tehtyjen kokeiden avulla tutkittiin elvyttimien ja sekoitustapojen vaikutusta uusiopäällysteen halkaisuvetolujuuteen ja epäsuoraan jäykkyysmoduuliin. Lisäksi AB16 RC40 -koekappaleista tutkittiin ultraäänen läpikulku-aika vuorokausi tiivistyksen jälkeen. Jaksollinen virumiskoe suoritettiin 4 ja 32 vuorokautta tiivistyksen jälkeen kahdelle massalle: referenssi ja N82 RH (Nytex 820 sekoitustavalla 2). Jaksollista virumiskoetta ei voitu toteuttaa kaikille uusiomassoille laboratorio-osuuden tiukan aikataulun ja yksittäisen kokeen pitkän keston vuoksi. Ultraäänen läpikulku-aika määritettiin kaikista 100 mm koekappaleista, muissa kokeissa rinnakkaisnäytteiden lukumäärä oli 3. Koekappaleita säilytettiin tutkimusten välillä huoneenlämmössä.

Taulukko 11. Tiivistetyille asfalttikappaleille tehdyt tutkimukset.

Tutkittava ominaisuus	Menetelmä/Laite	AB8 RC 40	AB16 RC 40
Tyhjätila	SFS-EN 12697-8	x	x
Ultraäänen läpikulku-aika	Liite E		x
Epäsuora jäykkyysmoduuli 10 °C	SFS-EN 12697-26	x	x
Halkaisuvetolujuus 20 °C*	SFS-EN 12697-23	x	x
Jaksollinen virumiskoe 40 °C	SFS-EN 12697-25		x

*Alkuperäinen koestuslämpötila oli 10 °C, mutta lämpötila jouduttiin nostamaan 20 °C:n UTM-laitteen kapasiteettiongelmiensa vuoksi

4 Kenttäkokeet

4.1 Koekohteen suunnittelu ja päällystys

Koekohteella haluttiin saada käytännön kokemuksia biofluksista kulutuskerroksessa käytettävän uusiomassan elvyttimenä. Biofluksilla elvytetyllä uusiomassalla päällystettävä koekohde oli Nynas Oy:llä ja NCC Roads Oy:llä suunnitteilla Pasasen (2009) kandidaatintyön tutkimusten jälkeen. Koekohteen uusiomassan valmistuksessa käytettiin NCC Roadsin asfalttiasemalle asennettua elvyttimen lisäyslaitteistoa, jolla elvytin ruiskutetaan lämmitettyyn asfalttirouheeseen ennen sen syöttämistä annoskeittimeen.

Koekohteen uusiomassatyypiksi valittiin AB16 RC40 ja sideainepitoisuudeksi 5,5 massa-%. Kohde päätettiin toteuttaa käyttäen kahta elvytinpitoisuutta. Ensimmäiseksi vaihtoehdoksi Pasasen tutkimuksen perusteella valittiin 5 massa-% lisäsideaineen määrästä. Tällä määrällä biofluksia lopputuotteen sideaineen laskennallinen tunkeuma olisi noin 120 l/10 mm. Toisen käytetyn elvytinpitoisuuden laskennassa tavoiteltiin elvytetylle sideaineelle tunkeumaa 80 l/10 mm. Elvytinpitoisuudet laskettiin asfalttiorneissa (PANK ry 2011) esitettyjen laskentaesimerkkien mukaisesti kaavalla (5). Laskennan lähtöoletuksena käytettiin asfalttirouheen sideaineen tunkeumaa 30 l/10 mm, joka on NCC Roadsin valvontanäytteiden pitkän aikavälin keskiarvo. Massat on esitelty taulukossa 12.

Taulukko 12. Koekohteen AB16 RC40 -uusiomassat: Sideainepitoisuus 5,5 massa-%. Lisäsideaine 70/100. Massan annoskoko 4000 kg.

Suunnitteluperuste	Laskennallinen tunkeuma	Biofluksin määrä	Lyhenne
Biofluksia 5 massa-% lisäsideaineen määrästä	120	8 kg / 1600 kg rouhetta	BF 8
Elvytetyn sideaineen tunkeuma 80	80	4 kg / 1600 kg rouhetta	BF 4

Eri elvytinpitoisuuksilla valmistettuja päällysteitä vertailemalla haluttiin arvioida elvytinmäärän vaikutusta päällysteen toimintaan ja kestävyyteen kulutuskerroksessa. Tutkimuksen kenttäkoeosuutena toimi NCC Roadsin päällystämä katuosuus. Katu on liikennemäärältään hyvin vähäinen asuinkatu, joten koekohteen havaintojen perusteella voidaan arvioida lähinnä päällysteen säänkestävyyttä. Vertailun kannalta vilkasliikenteisempi koekohde olisi antoisampi. Uusiomassat levitettiin kaistoittain, jolloin vierekkäisten kaistojen suuri rinnakkainen pinta-ala helpottaa päällysteiden käyttäytymisen vertailua.

Päällystys tapahtui 16.6.2011 puolipilvisessä säässä ilman lämpötilan ollessa noin 13 °C. Päällystystyön yhteydessä havaittiin massan höyryämistä sekä tavallisesta asfalttimassasta poikkeavaa hajua samoin kuin laboratoriosekoitusten yhteydessä. Elvytetyn asfalttimassan työstettävyys arvioitiin paremmaksi ja elävämmäksi kuin tavallisen pelkällä lisäsideaineella

valmistetun uusiomassan. Myös elvytettyjen massojen välillä havaittiin ero: suuremmalla biofluksipitoisuudella valmistettu BF 8 oli liikkuvaisempaa ja helpommin tiivistyvää.

4.2 Koekappaleiden tiivistäminen ja tutkimukset

4.2.1 Laboratoriossa tiivistetyt koekappaleet

Koekohteessa käytetyistä uusiomassoista otettiin levityksen yhteydessä n. 30 kg näytteet, jotka lapioitiin peltiastioihin levittimen suppilosta. Lisäksi noudettiin referenssimassanäyte NCC Roadsin toisesta päällystyskohteesta Naantalista. Kyseisen uusiomassan AB16 RC40 valmistuksessa oli käytetty pehmeämpää bitumilaatua siten, että uusiomassan sideaineseoksen tunkeuma oli 85 l/10 mm. Kaikissa kolmessa massassa käytettiin samaa kiviainesta. Massanäytteiden avulla laboratoriossa oli mahdollista tutkia biofluksin vaikutusta uusiopäällysteen lujuteen ja deformaatiokestävyyteen verrattuna tavanomaiseen pehmeämmällä lisäsideaineella valmistettuun uusiopäällysteeseen.

Massanäytteet lämmitettiin laboratoriossa uudelleen seuraavana päivänä 140 °C lämpötilaan. Massoista valmistettiin koekappaleita kiertotiivistimellä käyttäen 100 tiivistyskierrosta, 1 ° kallistuskulmaa ja 600 kPa näytoppainetta. Massoista valmistettiin halkaisijaltaan 100 mm ja korkeudeltaan noin 60 mm koekappaleita HVL-kokeita varten. Jaksollista virumiskoetta varten valmistettiin halkaisijaltaan 150 mm koekappaleita, jotka sahattiin 60 mm korkuisiksi tasaisen koestuspinnan varmistamiseksi. Koekappaleiden tiheys määritettiin hydrostaattisesti ilma-vesipunnituksella, ja massojen maksimitiheys tutkittiin Ricen menetelmällä päällysteen tyhjätilan määrittämiseksi. Laboratoriossa tiivistetyille koekappaleille suoritettiin halkaisuvetolujuuskoe 7 vuorokautta tiivistyksen jälkeen ja jaksollinen virumiskoe 4–5 vuorokautta tiivistyksen jälkeen (taulukko 13).

4.2.2 Asfalttiasemalla tiivistetyt koekappaleet

Asfalttiasemalla otettiin massanäytteet kuorma-auton lavalta molemmista biofluksilla elvytettyistä uusiomassoista. Massoista tiivistettiin koelaatat käyttäen pientä laboratoriotäryjyriä. Laattoja säilytettiin säältä suojattuina hallirakennuksessa, ja laatoista porattiin sekä 100 että 150 mm koekappaleita 10 viikkoa tiivistyksen jälkeen. Laitekohtaisen variaation poistamiseksi koekappaleet tutkittiin samalla UTM -laitteella Aalto-yliopistossa kuin laboratoriossa tiivistetyt koekappaleet. Koekappaleista tutkittiin pysyvä muodonmuutos jaksollisella virumiskokeella ja halkaisuvetolujuus viikon kuluessa näytteiden valmistamisesta (taulukko 13). Koekappaleiden tiheys ja tyhjätila määritettiin vastaavasti kuin laboratoriossa tiivistetyistä kappaleista.

Taulukko 13. Koekohteen uusiomassoista tiivistetyille koekappaleille tehdyt tutkimukset ja suunnitellut rinnakkaisnäytteiden määrät.

AB16 RC40	Tiivistystapa	Halkaisuvetolujuus 20 °C*		Jaksollinen virumiskoe 40 °C		
		7 vrk	70 vrk	4 vrk	32 vrk	70 vrk
70/100 +						
BF 8	Kierto	6	-	3	3	-
BF 4	Kierto	6	-	3	3	-
REF	Kierto	6	-	3	3	-
BF 8 laatta	Jyrä	-	5	-	-	3
BF 4 laatta	Jyrä	-	5	-	-	3

*Alkuperäinen koestuslämpötila oli 10 °C, mutta lämpötila jouduttiin nostamaan 20 °C:n UTM-laitteen kapasiteettiongelmien vuoksi

4.3 Elvytetyn asfalttirouheen ulkosäilytys

Tämän tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli tutkia saavutettaisiinko elvyttimen pidemmällä esivaikutusajalla lisäetua, ja onko vaikutusajan pidentäminen asfalttiasemalla mahdollista. Asemalle asennetun laitteiston avulla elvytin voidaan ruiskuttaa asfalttirouheen pintaan noin 17 sekuntia ennen sen siirtymistä annoskoittimeen. Pidemmän esivaikutusajan järjestäminen asemasekoituksen yhteydessä ei kuitenkaan ole mahdollista ilman laitteistomuutoksia, joten elvytin pitää lisätä varastoitavaan asfalttirouheeseen esimerkiksi murskauksen yhteydessä. Kenttäkoeosuuden yhteydessä selvitettiin onko elvytetyn asfalttirouheen säilyttäminen mahdollista ilman, että elvytintä haihtuu tai liukenee liiaksi säilytyksen aikana.

Pitkäaikaissäilytyksen mahdollisuuksien selvittämiseksi valmistettiin NCC Roadsin asfalttiasemalla 3200 kg varastokasat 0/16 -asfalttirouheesta kahdella eri biofluksipitoisuudella. Elvyttämiseen käytettiin samoja pitoisuuksia kuin koekohteen päällystyksessä: BF 4 ja BF 8 (taulukko 12). Rouhe ajettiin aseman läpi samalla tavoin kuin uusiomassaa sekoitettaessa: Elvytin ruiskutettiin rouheeseen ennen sen siirtymistä puhdistettuun annoskoittimeen, josta rouhe pudotettiin kauhakuormaimen kauhaan ja kuljetettiin varastopaikalle. Rouhetta ei lämmitetty ennen elvyttimen lisäämistä. Tällä menettelyllä vältettiin sideaineen turha lämmityskerta ja ehkäistiin rouheen paakkuuntumista varastokasassa. Koska asemaa oli aiemmin päivällä käytetty uusiomassan valmistamiseen, rinnakkaisrummun jälkilämpö nosti rouheen lämpötilan noin 40 °C:n.

Eri pitoisuuksilla valmistettujen rouhekasojen välillä havaittiin selvä väriero: enemmän biofluksia sisältävä kasa oli tummempi, kuten kuvasta 19 voidaan nähdä. Rouhe-erät varastoitettiin puhdistetulle asfalttikentälle ilman katosta, jotta ne altistuisivat sään vaikutukselle. Molemmista eristä otettiin noin 20 kg näytteet kannellisiin astioihin, joita säilytettiin sisätiloissa tasaisessa lämpötilassa.



Kuva 19. Varastokasat elvytetyistä asfalttirouheista. Vasemmalla tummempi BF8 ja oikealla vaaleampi BF4.

Viiden viikon ulkosäilytyksen jälkeen varastokasoista haettiin vertailunäytteet sekä kasojen pinnoilta että sisältä. Näytteiden nimeäminen on esitetty taulukossa 14. Näiden näytteiden perusteella arvioitiin, onko biofluksia haihtunut tai liuennut ulkosäilytyksen aikana.

Taulukko 14. Elvytettyjen rouhenäytteiden nimeäminen.

BF4 / BF8	Näytteiden nimeäminen
Lähtö	Sisätiloissa kannellisessa astiassa säilytetty rouhenäyte
Kasa	Ulkona säilytetty rouhe, näyte kasan sisältä
Pinta	Ulkona säilytetty rouhe, näyte kasan pinnalta

Kaikista kuudesta rouhenäytteestä määritettiin biofluksipitoisuus simuloidulla jakotislauksella. Elvytetyistä asfalttirouhenäytteistä tiivistettiin laboratoriossa halkaisijaltaan 100 mm koekappaleita ICT-kierrotiivistimellä käyttäen 100 tiivistyskierrosta. Tiivistyslämpötila oli noin 135 °C. Kappaleista tutkittiin halkaisuvetolujuus 20 °C lämpötilassa 7 vuorokautta tiivistyksen jälkeen. Simuloidun jakotislauksen ja rouhekoekappaleiden halkaisuvetolujuuksien avulla arvioitiin rouheessa ulkosäilytyksen aikana tapahtuneita muutoksia. Simuloitu jakotislauk suoritetttiin Neste Oilin tutkimuslaboratoriossa standardin SFS-EN 15199-2 mukaisesti.

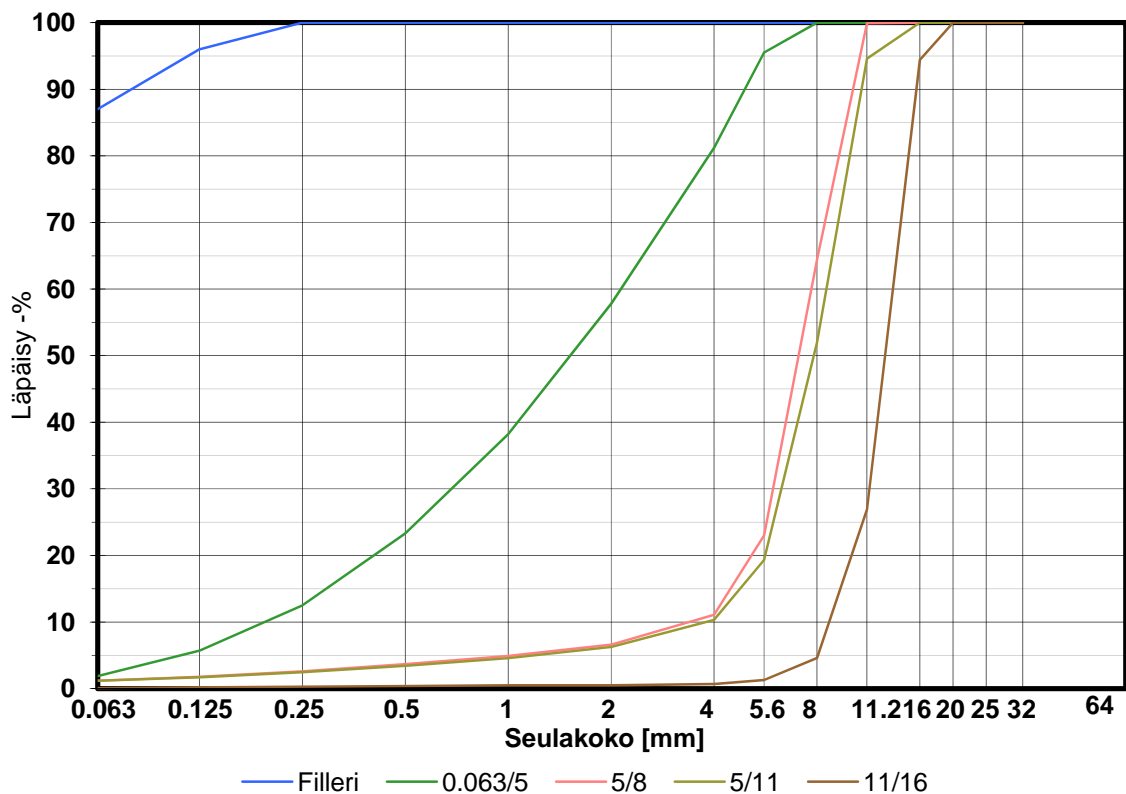
5 Tutkimustulokset

5.1 Laboratorio-osuus

5.1.1 Raaka-ainetutkimukset

Kiviainestutkimukset

Kiviaineslajitteiden rakeisuudet tutkittiin seulomalla. Rakeisuus määritettiin kahdesta jakolaatikon avulla jaetusta rinnakkaisnäytteestä. Pesuseulonnan tulokset on esitetty kuvassa 20. Samassa kuvaajassa on esitetty myös AB 8 -massoja varten katkaistu 5/8 -kiviaineslajite.



Kuva 20. Kiviaineslajitteiden rakeisuuskäyrät.

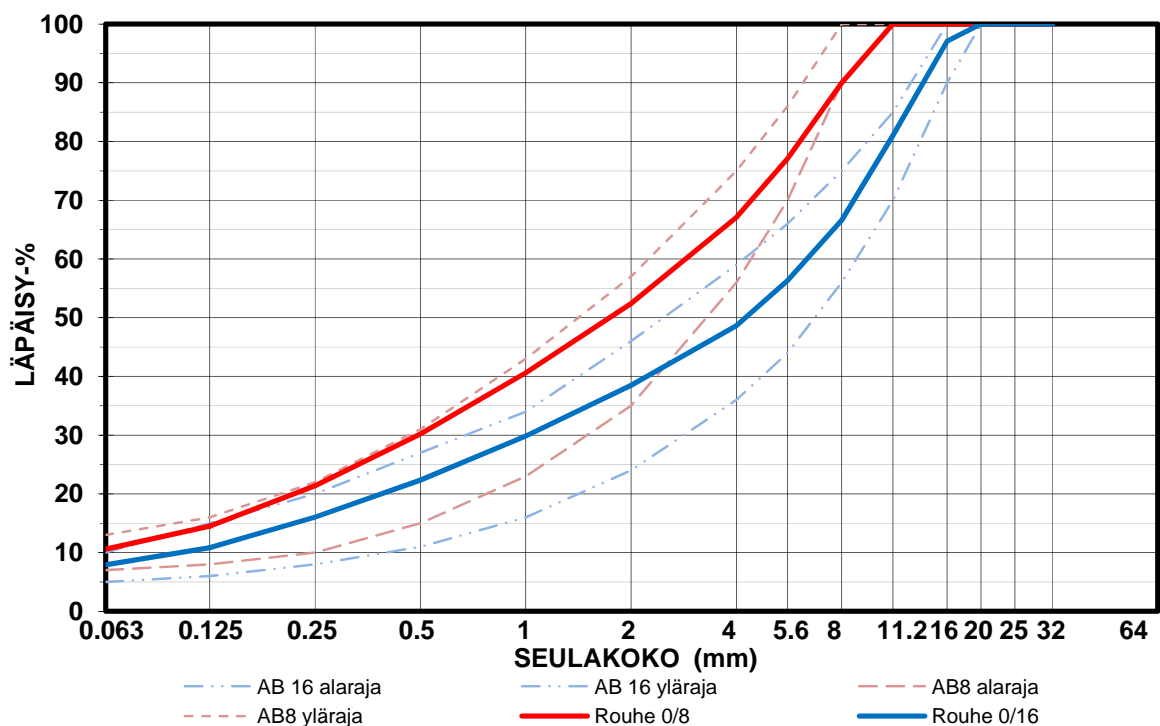
Kiviaineksen kiintotiheys tutkittiin 11/16 -lajitteesta verkkokorimenetelmällä, ja tulokseksi saatiin $2,71 \text{ Mg/m}^3$ kahden määrittelyn keskiarvona. Hienoaineskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 15. Hienoaines täyttää asfalttinormeissa esitetyt vaatimukset ja suosituksen asfalttimassan hienoainesseoksen ominaisuuksille.

Taulukko 15. Hienoaineskokeiden tulokset.

Hienoaines:	Veden adsorptio	Ominaispinta-ala	Hydrofiilisyyys
	mg/g	m ² /g	mg/m ²
Kiviaines	6,18	1,653747	3,74
Lentotuhkafilleri	12,84	3,174603	4,05
RAP-hienoaines	15,68	1,874899	8,37
Seos	11,94	2,170259	5,72
Asfalttinormit 2011		≤ 5	≤ 10

Asfalttirouheen tutkimukset

Asfalttiasemalta noudetusta asfalttirouheesta jaettujen 0/16 -näytteiden kiviaineksen rakeisuuskäyrät ovat nähtävissä kuvasta 21. Kuvassa on esitetty myös alkuperäisestä rouheesta katkaistu 0/8 -lajite, sekä ohjerakeisuusalueet vastaavan asfalttimassan kiviaineksen rakeisuudelle. Uuttosuodatus suoritettiin kahdelle rinnakkaisnäytteelle. Näytteiden sideainepitoisuudet on esitetty taulukossa 16.



Kuva 21. Asfalttirouheen kiviaineksen rakeisuus.

Kahden rinnakkaisen uuttosuodatuksen yhteydessä talteen otetut sideaineliuokset yhdistettiin, ja liuksesta eristettiin sideaine rotavaporilla. Liuokset päätettiin yhdistää, koska yhden näytteen sisältämä sideainemäärä ei olisi riittänyt tunkeuman määrittämiseen. Myös tunkeumakokeen tulokset on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Asfalttirouhenäytteiden sideainepitoisuudet ja yhdistettyjen näytteiden sideaineen tunkeuma.

Näyte	Lajite	Sideainepitoisuus	Keskihajonta	Sideaineen tunkeuma
		%	% -yks	1/10 mm
1	0/16	4,0	0,08	26
2	0/16	4,1		
1	0/8	4,8	0,14	32
2	0/8	4,6		

Sideainetutkimukset

Sideainekokeita varten rotaatiohahduttimella eristettiin n. 600 g bitumia NCC Roadsin toimittamista sideaineliuoksista, jotka oli otettu talteen asfalttirouheen uutusuodatusten yhteydessä. Näytteet valmistettiin luvussa 3.2.4 esitetyllä tavalla. Näytteiden tutkimuksista vastasi Neste Oilin tutkimuslaboratorio Porvoossa. Aalto-yliopiston tielaboratoriossa näytteille suoritettiin alustavat tunkeumakokeet ja DSR-ajot, mutta eri testien tulosten vertailtavuuden takaamiseksi tässä työssä käsitellään vain Porvoon koesarjan tuloksia muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Sideaineseosten tunkeumat, pehmenemispisteet ja Fraass -murtumispisteet on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Sideaineseosten tunkeuma, pehmenemispiste ja Fraass -murtumispiste.

Ominaisuus		70/100	RAP	RAP+BF	RAP+V15	RAP+N81	RAP+N82
Tunkeuma	1/10 mm	82	26	89	97	99	103
Pehmenemispiste	°C	46,6	61,4	46,8	44,6	44,8	44,8
Fraass -murtumispiste	°C	-20	-7	< -35	-18	-22	-25

Sideaineiden ominaisuuksia kylmissä lämpötiloissa tutkittiin murtumispisteen lisäksi Bending Beam Rheometer (BBR) -laitteella. Tuloksina saatavat taivutusvirumajäykkyys ja jännityksen relaksoimiskykyä kuvaava m-arvo on esitetty taulukossa 18. Materiaalin niukasta määrästä johtuen tulokset ovat yhden palkin taivutustuloksia. Tavallisesti tulos lasketaan kahden testin keskiarvona. Ensimmäinen tutkimuslämpötila oli -16 °C, ja koe toistettiin -24 °C:ssa. Tästä poikkeuksena RAP-sideaine, jonka toisen kokeen lämpötila oli -20 °C. Elvytettyjä sideaineseoksia testattiin vielä -30 °C:n lämpötilassa, koska niiden kylmäominaisuudet osoittautuivat erittäin hyviksi korkeammissa testilämpötiloissa.

Taulukko 18. Sideaineseosten taivutusvirumajäykkyydet (St) ja m-arvot -16, -24 ja -30 °C:ssa.

	BBR -16 °C		BBR -24 °C		BBR -30 °C	
	St	m-arvo	St	m-arvo	St	m-arvo
	MPa		MPa		MPa	
RAP	238	0,305	407*	0,259*	-	-
70/100	150	0,389	439	0,279	-	-
RAP+BF	27,8	0,426	88,8	0,345	196	0,306
RAP+N81	29,3	0,432	100	0,350	236	0,311
RAP+N82	28,8	0,448	103	0,361	237	0,321
RAP+V15	63,9	0,424	207	0,336	434	0,274

*Testilämpötila -20 °C

Sideaineiden deformaatiokestävyysominaisuuksia tutkittiin MSCR-testillä. Tiellaboratoriossa testi ajettiin PG-luokituksen mukaisessa 64 °C lämpötilassa, mutta Neste Oilin tutkimuslaboratoriossa testilämpötilana käytettiin 50 °C. MSCR-testien tulokset on esitetty taulukossa 19. Tulosten laskentaperiaate ja yksityiskohtaisemmat tulokset on esitetty liitteessä D.

Taulukko 19. MSCR -kokeen tulokset 50 ja 64 °C lämpötiloissa: palautumaton virumismyötääminen J_{nr} sekä keskimääräinen palautumaprosentti 100 ja 3200 Pa jännityksillä.

	J_{nr} 100 [kPa ⁻¹]		J_{nr} 3200 [kPa ⁻¹]		R100 [%]		R3200 [%]	
	50 °C	64 °C	50 °C	64 °C	50 °C	64 °C	50 °C	64 °C
RAP	0,1	0,6	0,1	0,7	33,7	9,0	32,1	1,1
70/100	1,2	17,6	2,2	20,6	5,3	-2,5	0,7	-4,5
RAP+BF	1,0	10,6	1,1	14,2	12,6	-0,5	5,0	-3,9
RAP+N81	1,4	13,5	1,6	17,0	9,0	-1,5	2,8	-4,1
RAP+N82	1,6	15,2	1,8	19,3	9,2	-1,7	2,5	-4,3
RAP+V15	2,2	19,2	2,5	23,6	5,4	-2,4	1,0	-4,5

Sideaineseosten Iatrosan -laitteella määritetyt SARA-fraktioiden jakaumat on esitetty taulukossa 20.

Taulukko 20. Sideaineseosten SARA-fraktiot.

Fraktio		70/100	RAP	RAP+BF	RAP+V15	RAP+N81	RAP+N82
Tyydyttyneet	%	5,9	3,8	6,1	7,5	9,5	11,9
Aromaattit	%	53,1	37,9	35,3	44,5	36,3	37,0
Hartsit	%	23,3	40,6	43,5	33,0	39,9	38,2
Asfalteenit	%	17,8	17,6	15,1	14,9	14,3	12,8

Lisäksi määritettiin sideaineen kompleksinen leikkausmoduuli ja vaihe-ero reometrilla. DSR-mittausten yhteydessä saatiin selville myös sideaineiden kompleksiset viskositeetit. Tulokset on esitetty 1,78 Hz kuormitustaaajuudella liitteessä B. Yksittäisiä mittaustuloksia ei voida esittää täydessä laajuudessaan tässä diplomityössä, mutta tuloksista piirretyt tyyppikäyrät on esitetty luvussa 6.1.

5.1.2 Elvyttimien käyttäytyminen asfalttirouheen kanssa

Taulukossa 21 on ilmoitettu rouheen ja koekappaleiden keskimääräiset tiheydet sekä tyhjätilat keskihajontoineen. Yksittäiset tulokset on esitetty liitteessä F.

Taulukko 21. RC100 -koekappaleiden keskimääräiset tiheydet ja tyhjätilat.

Seos	Rouheen maksimitiheys	Koekappaleiden tiheys	kh.	Koekappaleiden tyhjätila	kh.
	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	%	% - yks.
RC100	2513	2410	11	4,1	0,4
RC100 BF	2522	2414	7	4,3	0,3
RC100 N81	2488	2441	7	1,9	0,3
RC100 N82	2486	2450	4	1,4	0,2
RC100 V15	2483	2456	9	1,1	0,4

RC100 -koekappaleiden tulosten keskiarvoista on jätetty pois epäsuoran jäykkyyssmoduulin määrittämisessä hajonneet koekappaleet, jotka vääristäisivät keskiarvoa. Kustakin rouheen ja elvyttimen seoksesta ehjiksi jääneiden koekappaleiden lukumäärä on esitetty taulukon 22 yhteydessä.

Koekappaleista tutkittiin ultraäänen läpikulku-aika huoneenlämpöisessä vesihautteessa 1, 7, 14 ja 28 vuorokautta tiivistämisen jälkeen. Ultraäänen läpikulkuajan määrittäminen on esitelty liitteessä E ja tulokset taulukossa 22. Keskiarvot on laskettu vain niiden koekappaleiden tuloksista, jotka säilyivät ehjinä kuukauden kestäneen koesarjan loppuun saakka. Koska koekappaleiden korkeuksissa esiintyi hajontaa, kuvan arvot on korjattu vastaamaan tasan 60 mm korkuista näytettä.

Taulukko 22. RC100 -koekappaleiden ultraäänen läpikulku-aika mikrosekunteina.

Seos	n	1 vrk		7 vrk		14 vrk		28 vrk	
		ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
RC100	4	18,7	2,3	18,9	3,2	17,5	2,6	18,4	2,7
RC100 BF	3	21,2	1,6	21,1	1,5	21,1	1,5	22,0	0,5
RC100 N81	5	21,3	5,9	19,0	2,0	18,9	2,0	19,0	2,0
RC100 N82	3	17,7	2,1	16,2	0,3	16,2	0,4	16,4	0,2
RC100 V15	4	15,1	0,5	15,0	0,5	15,0	0,5	15,3	0,5

Koekappaleista määritettiin myös dielektrisyysarvo. Mittaukset suoritettiin Gann Hydromette UNI 2 laitteella, jonka mittapäänä käytettiin Active Electrode B50 pallopäistä anturia, jonka mittaussyvyys ulottuu noin 15–30 millimetriin. Anturi mittaa materiaalin dielektrisyyttä muodostamansa mittauskentän perusteella ja muuttaa luvun kosteusarvoksi. Asfaltin materiaalit, koostumus ja tiheys vaikuttavat tulokseen, joten menetelmää voidaan käyttää vain suhteellisten muutosten tarkasteluun eikä menetelmä sovellu yksittäisten koekappaleiden vertailuun. Lisäksi mittausten yhteydessä ei kiinnitetty riittävästi huomiota mittaolosuhteiden tasaisuuteen ja pallopäisen anturin muodostamaan sähköisen kentän häiriöihin, joten mittaustulokset päätettiin hylätä eikä niitä esitetä tässä tutkimuksessa.

Epäsuoraa jäykkyyssmoduulia määritettäessä pelkästä asfalttirouheesta valmistettujen koekappaleiden hauraus tuli odotetusti ilmi, ja yhteensä kuusi koekappaletta murtui ennen aikaisesti määrittämisen aikana. Epäsuoran jäykkyyssmoduulin keskimääräiset arvot ehjinä säilyneistä koekappaleista 20 °C lämpötilassa on esitetty taulukossa 23. Keskiarvoista on poistettu kesken koesarjan rikkoutuneiden koekappaleiden tulokset sekä standardin mukaisesti kahden rinnakkaismäärittämisen suurimman sallitun erotuksen ylittävät koetulokset. Yksittäiset koetulokset on esitetty liitteessä G.

Taulukko 23. RC100 -koekappaleiden epäsuoran jäykkyyssmoduulin keskiarvot ja keskihajonnat 20 °C:ssa [MPa].

Ikä	1 vrk		7 vrk		14 vrk		28 vrk	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
RC100	5581	267	5641	140	5718	230	5755	405
RC100 BF	3783	630	3695	650	3972	519	4048	547
RC100 N81	3123	252	3220	283	3163	243	3485	340
RC100 N82	1868*	410	2029	348	2060	350	2256	371
RC100 V15	2073	241	1934	241	2126	293	2038	313

*keskiarvosta poistettu yksi näyte

Jäykkyysmoduulikoesarjan päätteeksi koekappaleille suoritettiin halkaisuvetolujuuskoe 20 °C:ssa 28 vuorokautta tiivistämisen jälkeen. Keskimääräiset tulokset on esitetty taulukossa 24 ja yksittäiset koetulokset liitteessä F.

Taulukko 24. RC100 -koekappaleiden halkaisuvetolujuus 20 °C:ssa.

Seos	HVL keskiarvo	Keskihajonta	Variaatiokerroin
	<i>kPa</i>	<i>kPa</i>	<i>%</i>
RC100	1498	91	6,0
RC100 BF	1199	46	3,9
RC100 N81	1144	49	4,3
RC100 N82	960	50	5,2
RC100 V15	1007	59	5,8

5.1.3 Elvyttimien käyttäytyminen uusiomassassa

Elvyttimen ja sideaineen sekoittuminen uusiomassan valmistuksen yhteydessä

AB8 RC40 -massoja valmistettiin kahdella elvyttimellä: Biofluksi ja Nytex 820. Valmistuksessa käytettiin kahta erilaista sekoitustapaa: perinteinen sekoitus ja koostettu sekoitus. Massojen sideainepitoisuudet ja rakeisuudet tutkittiin uutusuodatuksella kahdesta rinnakkaisnäytteestä. Sideainepitoisuus jouduttiin määrittämään tiivistetyistä koekappaleista, koska tiivistämätöntä massaa ei riittänyt kaikkiin kokeisiin. Kaikkien muiden paitsi N82 Koost -massan sideainepitoisuudet poikkesivat tavoitellusta 5,9 massa-% sideainepitoisuudesta. Juuri oikean sideainemäärän kaataminen käsivaraisesti laboratoriosekoittajaan on vaikeaa. Myös massasta tiivistettyjen koekappaleiden sideainepitoisuus voi vaihdella koekappaleiden pienen koon ja helposti tapahtuvan lajittumisen takia. Määritetyt sideaineprosentit ja massan maksimitiheydet sekä koekappaleiden keskimääräiset tiheydet ja tyhjätilat on esitetty taulukossa 25. Yksittäiset tulokset massakokeiden osalta on esitetty liitteessä Q ja koekappaleiden tilavuussuhteet liitteessä H.

Taulukko 25. AB8 RC40 -koekappaleiden keskimääräiset tiheydet ja tyhjätilat.

Massa	Massan tiheys	Sideainepitoisuus	Päällysteen tiheys	kh.	Tyhjätila	kh.
	<i>kg/m³</i>	<i>massa -%</i>	<i>kg/m³</i>	<i>kg/m³</i>	<i>%</i>	<i>% -yks.</i>
BF Perint	2448	6,1	2382	4,7	2,7	0,2
BF Koost	2443	6,1	2401	5,5	1,7	0,2
N82 Perint	2465	6,0	2375	8,4	3,6	0,3
N82 Koost	2447	5,9	2408	7,6	1,6	0,3

Koekappaleista määritettyjen epäsuorien jäykkyyssmoduulien keskiarvot on esitetty taulukossa 26. Kaikissa kokeissa käytettiin kolmea rinnakkaiskappaletta. Näytekohtaiset tulokset on esitetty liitteessä I. Yksittäinen tulos jätettiin pois keskiarvosta, jos kahden rinnakkaismäärityksen välinen standardin mukainen maksimiero ylittyi.

Taulukko 26. AB8 RC40 -koekappaleiden epäsuoran jäykkyyssmoduulin keskiarvot ja keskihajonnat 10 °C:ssa [MPa].

Ikä	1 vrk		7 vrk		28 vrk	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
BF Perint	7975	695	8468	210	7731	535
BF Koost	7853	306	8092	672	8376	789
N82 Perint	7004	799	6972	751	7600	836
N82 Koost	7493	151	7970	226	8341*	89

*keskiarvosta poistettu yksi näyte

Halkaisuvetolujuuskokeet oli tutkimussuunnitelman mukaan tarkoitus tehdä 10 °C lämpötilassa, mutta lujuuskehityksen seurauksena UTM-laitteen kapasiteetti ei riittänyt kappaleiden halkaisemiseen enää 28 vuorokautta tiivistyksen jälkeen. Tästä syystä HVL-tulokset 28 vrk ikäisistä koekappaleista on määritetty 20 °C lämpötilassa. Kolmen rinnakkaisnäytteen perusteella lasketut keskiarvot on esitetty taulukossa 27. Näytekohtaiset tulokset on esitetty liitteessä H.

Taulukko 27. AB8 RC40 -koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat 10 ja 20 °C:ssa.

Massa	HVL 10 °C [kPa]				HVL 20 °C [kPa]	
	1 vrk		7 vrk		28 vrk	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
BF Perint	2072	122	2291	114	1302	3
BF Koost	2065	24	2225	38	1312	57
N82 Perint	2019	47	2321	43	1236	28
N82 Koost	2128	120	2357	35	1242	50

Elvyttimien ja sekoitustapojen vaikutus uusiomassan ja -päällysteen ominaisuuksiin

Laboratoriossa sekoitettujen AB16 RC40 -massojen sideainepitoisuudet ja maksimitiheydet sekä massoista kiertotiivistimellä valmistettujen koekappaleiden tiheydet ja tyhjätilat on esitetty taulukossa 28. Sideainepitoisuudet ja rakeisuudet tutkittiin uuttosuodatuksella

kahdesta rinnakkaisnäytteestä. Yksittäiset tulokset on esitetty liitteessä Q. Tiivistämättömän massan niukan määrän vuoksi uuttosuodatuksissa jouduttiin käyttämään hajoitettuja koekappaleita. Massojen maksimitiheydet määritettiin irtonaisesta massasta kahdesta näytteestä. Koekappaleiden tiheydet ja tyhjätilat on laskettu 12 näytteen keskiarvona; yksittäisten koekappaleiden tilavuussuhteet on esitetty liitteessä J. Poikkeuksena tästä 150 mm koekappaleiden valmistamista varten sekoitetut massat, joille keskiarvo on laskettu 6 koekappaleen perusteella. Tiheys määritettiin 150 mm koekappaleista vasta sahauksen jälkeen. Halkaisijaltaan 150 mm koekappaleiden tilavuussuhteet on esitetty liitteessä L.

Taulukossa 28 on esitetty myös koekappaleista tutkitut ultraäänen läpikulkuajat. Vertailun mahdollistamiseksi tulokset on korjattu vastaamaan tasan 60 mm korkuisia koekappaleita. Koska RC100 -rouhekappaleista ei ultraäänimenetelmällä havaittu merkittävää muutosta ajan suhteen, AB16 -koekappaleiden kohdalla ultraäänitutkimus päätettiin suorittaa vain 1 vuorokauden ikäisille koekappaleille. Ultraäänitutkimuksissa käytettiin 12 rinnakkaisnäytettä.

Taulukko 28. AB16 RC40 -massojen sideainepitoisuudet ja massan tiheydet sekä massoista kiertotiivistimellä valmistettujen koekappaleiden keskimääräiset tiheydet ja tyhjätilat keskihajontoineen. Lisäksi taulukossa on esitetty koekappaleista määritetyn ultraäänen läpikulkuajan keskiarvo ja keskihajonta.

Massa	Sideaine-	Massan	Päällysteen	kh.	Tyhjätila	kh.	UÄ-aika	kh.
	pitoisuus	tiheys	tiheys					
	massa -%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	%-yks.	μs	μs
REF	5,5	2449	2444	8	0,2	0,2	14,2	0,6
REF 150 mm	5,4	2477	2455	5	0,9	0,2	-	-
BF Perint	5,4	2475	2438	5	1,5	0,2	15,3	0,6
BF RH	5,3	2479	2443	3	1,5	0,1	14,7	0,2
BF 1kk	5,5	2475	2443	6	1,3	0,2	14,2	0,2
N81 Perint	5,3	2485	2437	8	2,0	0,3	16,4	2,4
N81 RH	5,6	2459	2441	13	0,7	0,5	14,5	0,1
N81 1kk	5,4	2464	2443	5	0,8	0,3	14,5	0,4
N82 Perint	5,6	2458	2444	6	0,6	0,2	14,4	0,2
N82 RH	5,4	2458	2448	5	0,4	0,2	14,6	0,1
N82 RH 150mm	5,6	2462	2449	4	0,5	0,2	-	-
N82 1kk	5,6	2457	2444	8	0,5	0,3	14,3	0,3
V15 Perint	5,4	2476	2437	7	1,6	0,3	15,8	1,5
V15 RH	5,4	2466	2439	10	1,1	0,4	14,4	0,3
V15 1kk	5,8	2449	2437	9	0,5	0,4	14,4	0,4

Koekappaleista määritettyjen epäsuorien jäykkyyssmoduulien tulosten keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 29. Kokeissa käytettiin kolmea rinnakkaisnäytettä. Yksittäinen tulos jätettiin pois keskiarvosta, jos kahden rinnakkaismäärittelyn välinen standardin mukainen maksimiero ylittyi. Yksittäiset koetulokset on esitetty liitteessä K.

Taulukko 29. Kiertotiivistimellä valmistettujen AB16 RC40 -koekappaleiden epäsuoran jäykkyyssmoduulin keskiarvot ja keskihajonnat 10 °C:ssa [MPa].

Massa	1 vrk		7 vrk		28 vrk	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
REF	6485	308	7453	558	7802	531
BF Perint	8391*	226	9514	504	10475	476
BF RH	9269	573	9589	95	11036	416
BF 1kk	9759	923	10192	821	10502	1012
N81 Perint	6482	2171	6867	2285	6241	1770
N81 RH	5943	596	7037	683	6984	733
N81 1kk	8283*	202	8865	470	8629	99
N82 Perint	6732	639	7588	309	7863	398
N82 RH	6979	413	7192	560	7708	488
N82 1kk	7834	263	7604	588	8022	461
V15 Perint	8905	263	8775	569	9164	910
V15 RH	9071	759	9117	757	9087	504
V15 1kk	7604	345	8411	778	8094	261

*keskiarvosta poistettu yksi näyte

Koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 30. AB8 RC40 -halkaisuvetolujuuskokeiden yhteydessä ilmenneiden kapasiteettiongelmien vuoksi kaikki HVL -kokeet tehtiin tutkimussuunnitelmasta poiketen 20 °C lämpötilassa. Keskiarvot on laskettu kolmen rinnakkaisnäytteen tuloksista. Yksittäiset koetulokset on esitetty liitteessä J.

Taulukko 30. Kiertotiivistimellä valmistettujen AB16 RC40 -koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat 20 C:ssa [kPa].

Massa	1 vrk		7 vrk		28 vrk	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
REF	1054	53	1083	51	1205	22
BF Perint	1136	66	1197	22	1417	88
BF RH	1266	51	1357	24	1455	13
BF 1kk	1242	29	1341	18	1372	30
N81 Perint	1120	47	1224	27	1239	23
N81 RH	821	125	922	51	1041	35
N81 1kk	1179	32	1234	36	1332	44
N82 Perint	1048	22	1135	35	1231	34
N82 RH	1063	67	1141	53	1220	39
N82 1kk	977	64	998	33	1138	17
V15 Perint	1107	29	1203	13	1297	25
V15 RH	1058	178	1176	26	1222	39
V15 1kk	969	86	1037	33	1224	59

Jaksollisen virumiskokeen tulokset on esitetty taulukossa 31. Kulmakerroin kuvaa deformaation nopeutta koekappaleessa tapahtuvan esitiivistymisen jälkeen. Kokeissa käytettiin kolmea rinnakkaisnäytettä. Lämpötilan kontrollointi oli vaikeaa hellekesän vuoksi. Standardissa annettu lämpötilan vaihteluväli 40 ± 1 °C ylitettiin ajoittain, mutta ylitykset olivat kestoaltaan lyhyitä. Yksittäiset koetulokset on esitetty liitteessä L.

Taulukko 31. Kiertotiivistimellä valmistettujen AB16 RC40 -koekappaleiden jaksollisella virumiskokeella määritetyt pysyvän muodonmuutoksen keskiarvot ja keskihajonnat 40 °C:ssa.

Massa	4 vrk			32 vrk		
	ϵ_n [%]		Kulmakerroin*	ϵ_n [%]		Kulmakerroin*
	ka.	kh.	ka.	ka.	kh.	ka.
REF	0,95	0,49	$2,02 \cdot 10^{-5}$	0,85	0,53	$1,51 \cdot 10^{-5}$
N82 RH	0,77	0,12	$2,41 \cdot 10^{-5}$	0,88	0,21	$2,99 \cdot 10^{-5}$

*kulmakerroin on laskettu välille 1500–3600 sykliä

5.2 Kenttäkokeet

5.2.1 Koekohteen massojen ja tiivistettyjen koekappaleiden tutkimukset

Koekohteen uusiomassoista tutkitut sideainepitoisuudet ja massojen tiheydet on esitetty taulukossa 32. Sideainepitoisuus ja rakeisuus tutkittiin NCC Roadsin toimesta, ja massojen tiheydet on tutkittu Aalto-yliopiston tielaboratoriossa.

Taulukko 32. Koekohteen AB16 RC40 -massojen sideainepitoisuudet ja tiheydet.

Massa	Sideainepitoisuus	Massan tiheys
	%	kg/m ³
REF	5,6	2493
BF 4	5,3	2491
BF 8	5,3	2481

Koekohteen massoista valmistettujen koekappaleiden tiheyksien ja tyhjätilojen keskiarvot on esitetty taulukossa 33. Rinnakkaisnäytteiden lukumäärät olivat seuraavanlaiset: kiertotiivistetyt 6 kpl, laatasta poratut 5 kpl. Yksittäisten koekappaleiden tilavuussuhteet on esitetty liitteessä M.

Taulukko 33. Koekohteen AB16 RC40 -koekappaleiden tiheyksien ja tyhjätilojen keskiarvot ja keskihajonnat.

Massa	Tiivistystapa	Päällysteen tiheys	kh.	Tyhjätila	kh.
		kg/m ³	kg/m ³	%	% -yks.
REF	Kierto	2475	3	0,7	0,1
BF4	Kierto	2464	5	1,1	0,2
BF8	Kierto	2458	12	0,6	0,3
BF4 Laatta	Jyrä	2442	3	2,0	0,1
BF8 Laatta	Jyrä	2446	5	1,4	0,2

Koekohteen uusiomassoista tiivistetyistä koekappaleista tutkittujen halkaisuvetolujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 34. Referenssimassan koekappaleet olivat jäykempiä, eikä UTM 25-laitteen kapasiteetti riittänyt niiden halkaisemiseen 10 °C:ssa. BF4 massan koekappaleet olivat kapasiteetin ylärajoilla, joten puolet koekappaleista halkaistiin 20 °C:ssa. Yksi halkaisuvetokoe epäonnistui BF8 -massojen osalta. Yksittäiset koetulokset on esitetty liitteessä M.

Taulukko 34. Koekohteen AB16 RC40 -koekappaleiden halkaisuvetolujuudet ja keskihajonnat 10 ja 20 °C:ssa.

Massa	HVL 10 °C [kPa]			HVL 20 °C [kPa]			
	AB16 RC40	Keskiarvo	Keskihajonta	n	Keskiarvo	Keskihajonta	n
REF Kierto	> 2500	-	-	3	1617	51	3
BF4 Kierto	2511	43	-	3	1334	42	3
BF8 Kierto	2267	179	-	5	-	-	-
BF4 Laatta	-	-	-	-	688	47	5
BF8 Laatta	-	-	-	-	559	34	5

Koekohteen uusiomassojen jaksollisen virumiskokeen tulokset on esitetty taulukossa 35. Kulmakerroin kuvaa deformatiivisuuden nopeutta koekappaleessa tapahtuvan esitiivistymisen jälkeen. Keskiarvo on laskettu kolmen rinnakkaisnäytteen tuloksesta. Kiertotiivistimellä valmistetuille BF8 -näytteiden kokeista yksi keskeytyi teknisen vian vuoksi, joten keskiarvo on laskettu vain kahdesta tuloksesta. Yksittäiset koetulokset on esitetty liitteessä L.

Taulukko 35. Koekohteen AB16 RC40 -koekappaleiden jaksollisella virumiskokeella määritetyt pysyvän muodonmuutoksen keskiarvot ja keskihajonnat 40 °C:ssa.

Massa	4 vrk		70 vrk			
	ϵ_n [%]		Kulmakerroin*	ϵ_n [%]		Kulmakerroin*
	ka.	kh.	ka.	ka.	kh.	ka.
REF Kierto	0,5	0,13	$2,30 \cdot 10^{-5}$	-	-	-
BF4 Kierto	0,5	0,06	$1,56 \cdot 10^{-5}$	-	-	-
BF8 Kierto	0,5**	0,05**	$1,69 \cdot 10^{-5}$ **	-	-	-
BF4 Laatta	-	-	-	3,4	0,57	$1,84 \cdot 10^{-4}$
BF8 Laatta	-	-	-	3,2	0,31	$2,14 \cdot 10^{-4}$

* kulmakerroin on laskettu välille 1500–3600 sykliä

** n = 2

5.2.2 Koekohteen kuntokatselmus

Koekohteelle suoritettiin silmämääräinen katselmus viisi viikkoa päällystyksen jälkeen. Kadun päällysteen todettiin olevan moitteettomassa kunnossa, eikä eri elvytinpitoisuuksilla valmistettujen päällysteiden välillä ollut nähtävissä mitään eroa. Katselmuksen yhteydessä havaittiin, että suurin osa liikenteestä käyttää BF8 -massalla päällystettyä kaistaa, ja että kyseiselle kaistalle kulkeutuu hiekkaa tien päässä sijaitsevalta päällystämättömältä

tieosuudelta (kuva 22). Kyseisen kaistan suosimisen arveltiin johtuvan loivemmista ajolinjoista vähäliikenteisellä kadulla.



Kuva 22. Koekohde: vasemmalla BF8 ja oikealla BF4 -massalla päällystetty kaista. Vasemmanpuoleiselle kaistalle kulkeutuu hiekkaa kadun päässä sijaitsevalta päällystämättömältä alueelta.

5.2.3 Elvytetyn rouheen ulkosäilytys

Varastokasasta otetuista rouhenäytteistä tiivistettyjen koekappaleiden tiheyksien ja tyhjätilojen keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 36.

Taulukko 36. Elvytetyistä rouheista valmistettujen koekappaleiden tiheyksien ja tyhjätilojen keskiarvot ja keskihajonnat.

Rouhe	Rouheen tiheys	Koekappaleiden tiheys	kh.	Koekappaleiden tyhjätila	kh.
	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	%	% -yks.
BF4 Lähtö	2535	2335	7	10,3	0,3
BF4 Kasa	2547	2340	6	10,1	0,3
BF4 Pinta	2541	2329	5	9,2	0,4
BF8 Lähtö	2535	2273	8	7,9	0,3
BF8 Kasa	2550	2289	6	8,2	0,2
BF8 Pinta	2558	2307	10	8,9	0,2

Varastokasojen elvytetyille rouhekappaleille suoritettujen halkaisuvetolujuuskokeiden tulosten keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 37.

Taulukko 37. Varastokasan elvytetyistä rouheista valmistettujen koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien (20 °C) keskiarvot, keskihajonnat ja variaatiokertoimet 20 °C:ssa.

Rouhe	HVL	kh.	cv.
	<i>kPa</i>	<i>kPa</i>	<i>%</i>
BF4 Lähtö	458	79	17,2
BF4 Kasa	442	50	11,3
BF4 Pinta	555	56	10,0
BF8 Lähtö	389	49	12,5
BF8 Kasa	441	61	13,9
BF8 Pinta	537	44	8,2

6 Tutkimustulosten tarkastelu

6.1 Elvytettyjen sideaineiden ominaisuudet

Elvytettyjen sideainenäytteiden valmistaminen onnistui hyvin ja näytteistä saatiin kohtalaisen homogeenisia. Viskositeetiltaan hyvin erilaisten aineiden sekoittaminen on hankalaa. Esimerkiksi elvyttimistä ohuimman, eli biofluksin, sekoittaminen oli vaikeaa verrattuna V1500:n, joka bitumina on luonteeltaan samanlaista RAP-sideaineen kanssa. Näytteiden sekoittamista vaikeutti niiden pieni koko, jolloin lisättävä elvytymäärä oli vähäinen. Lisäksi näytteen koon vuoksi sekoitus oli tehtävä käsin käyttäen pientä lastaa. Näytteiden homogenisoimiseksi ne lämmitettiin ja sekoitettiin uudelleen Nesteen tutkimuslaboratoriossa ennen kokeiden suorittamista.

Elvytettyjen sideaineiden tunkeumatavoite 85 1/10 mm ylitettiin, mutta tulokset kuuluivat kuitenkin bitumiluokkaan 70/100. RAP+N82 ylitti luokan rajat kolmella yksiköllä. Elvyttimet siis kasvattivat tunkeumaa arvioitua enemmän. Syitä tähän voi olla useita. Pienissä näytemäärissä korostuu punnitustarkkuudesta aiheutuva virhe: Elvyttimet ovat viskositeetiltaan hyvin alhaisia, ja niitä lisättiin RAP-sideaineeseen vain muutamia grammoja. Myös käytettyjen laskentakaavojen tarkkuus heikkenee, kun komponenttien välinen viskositeettiero on suuri. Lisäksi elvytymäärät laskettiin muuttamalla tunkeuma kinemaattiseksi viskositeetiksi. Nämä muutokset eivät välttämättä ole täysin yhteneviä todellisen viskositeetin kanssa. Elvytettyjen sideaineiden tunkeuma-arvoissa on eroa kuitenkin vain 14 yksikköä, joten sideaineet ovat keskenään hyvin vertailukelpoisia.

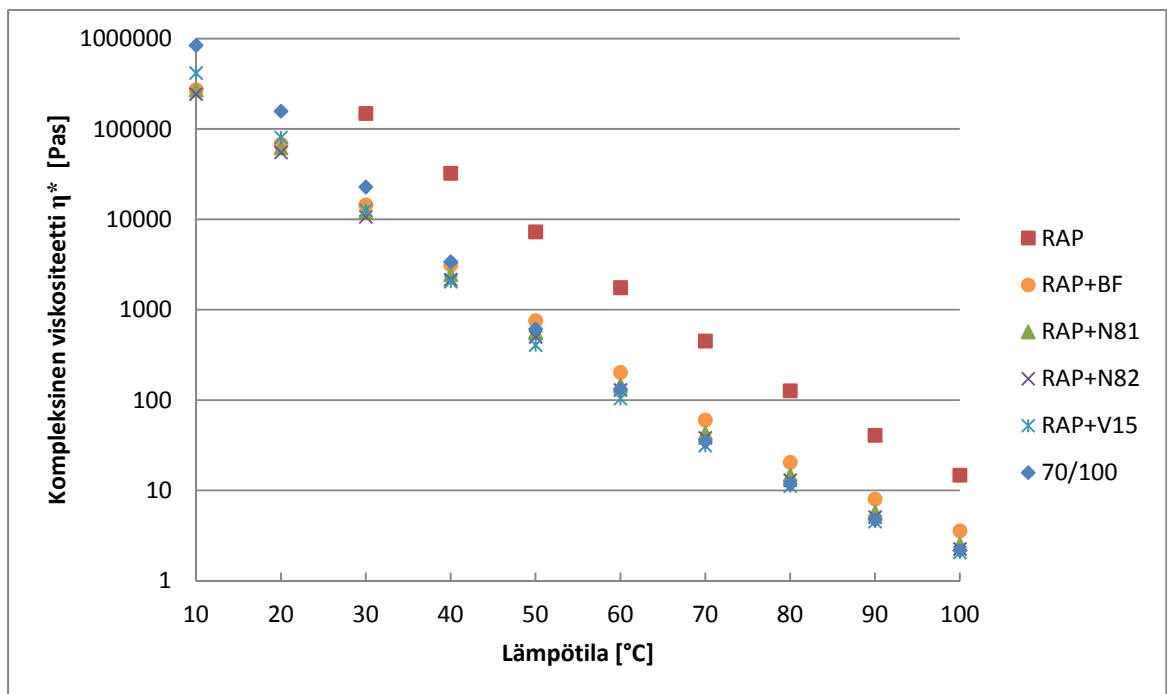
Elvyttimet alensivat RAP-sideaineen pehmenemispisteen 70/100 -bitumin tasolle. Sideaineille lasketut lämpötilaherkkyttä kuvaavat penetraatioindeksit ja plastisuusalueet on esitetty taulukossa 38. RAP-sideaineen PI oli odotetusti lähellä nollaa, sillä vanhentunut sideaine ei ole enää yhtä herkkä lämpötilan muutoksille kuin tuoreet sideaineet. Elvytettyjen sideaineiden penetraatioindeksit lähestyivät 70/100 -bitumin arvoa. RAP+V15 antoi muita elvytettyjä sideaineita pienemmän arvon, joten sen odotettiin olevan herkempi lämpötilan muutoksille. Puolestaan RAP+BF sideaineen herkkyys lämpötilalle on muita elvytettyjä sideaineita pienempi. Penetraatioindeksien ja plastisuusalueiden tulokset tukevat toisiaan.

Taulukko 38. Sideaineille lasketut penetraatioindeksit ja plastisuusalueet.

	RAP	70/100	RAP +BF	RAP +N81	RAP +N82	RAP +V15
PI	-0,14	-0,88	-0,59	-0,89	-0,76	-1,01
Plastisuusalue, °C	68,4	66,6	81,8*	66,8	69,8	62,6

*Plastisuusalueen laskennassa on käytetty Fraass -murtumispisteen arvoa -35 °C.

Vaihtelu lämpötilaherkkydessä voidaan havaita myös sideaineiden viskositeettien muutoksesta lämpötilan mukana. Kuvassa 23 on esitetty sideaineiden kompleksiset viskositeetit 10–100 °C lämpötilassa 1,78 Hz taajuudella. Kompleksiset viskositeetit laskettiin Porvoossa tehtyjen DSR-mittausten tuloksista. Sideaineiden viskositeetin herkkyyttä lämpötilalle voidaan arvioida käyrien kulmakertoimien perusteella: RAP+V15 ja 70/100 -käyrien kulmakertoimet olivat suuremmat, eli sideaineiden viskositeetit olivat voimakkaammin riippuvaisia lämpötilan muutoksesta. Kylmissä lämpötiloissa RAP+V15:n ja 70/100:n viskositeetit olivat suurempia kuin muilla elvytetyillä sideaineilla, kun taas korkeissa lämpötiloissa viskositeetit oli muita sideaineita alhaisempia. Yleisesti elvyttimet alensivat RAP-sideaineen viskositeetin 70/100 -sideaineen tasolle, mutta ääriämpötiloissa käyttäytymisessä esiintyi eroja. Näitä ominaisuuksia käsitellään tarkemmin myöhemmin tässä luvussa.

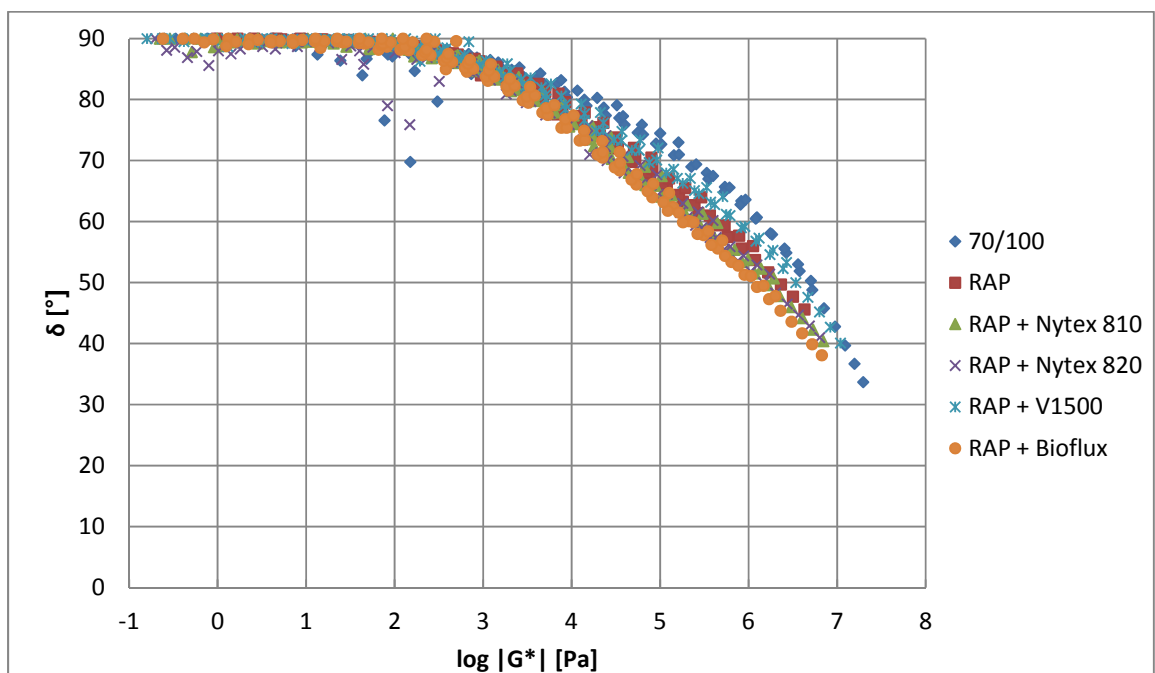


Kuva 23. Sideaineiden kompleksiset viskositeetit DSR-mittausten perusteella 1,78 Hz taajuudella.

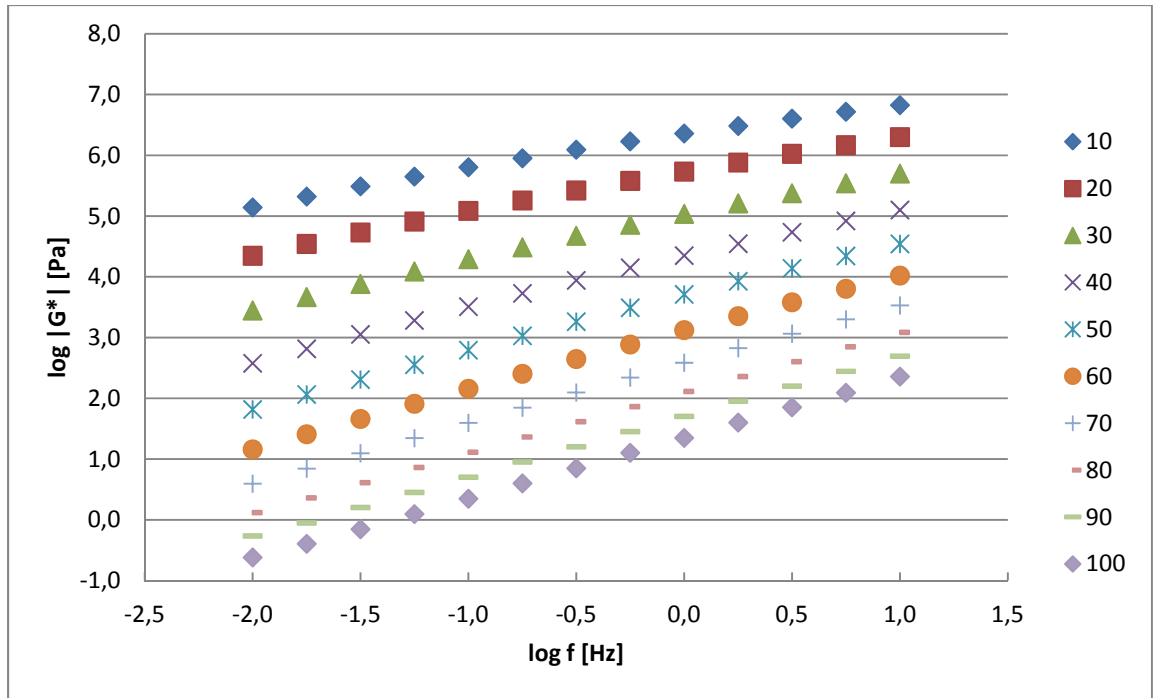
RAP-sideaineen DSR-mittaus epäonnistui 10 ja 20 °C lämpötiloissa. Tämä johtui leikkausreometrin rajallisesta kapasiteetista ja RAP-sideaineen suuresta jäykkyydestä matalissa lämpötiloissa. Tästä syystä RAP-sideaineen osalta on esitetty tulokset vain lämpötila-alueelta 30–100 °C.

Kuvassa 24 esitetty black diagram on yleinen tapa esittää DSR-mittauksien tulokset kaikilla käytetyillä taajuuksilla ja lämpötiloilla. Black diagram on yksinkertainen tapa tunnistaa mittausvirheitä tai sideaineen poikkeava käytös. DSR-mittausten tulokset muodostavat tasaiset käyrät jokaisella sideaineella, vain sideaineilla 70/100 ja RAP+N82

esiintyy korkeimmissa lämpötiloissa muutamia hajanaisia mittaustuloksia, mutta niillä ei ole merkitystä mittaustulosten luotettavuuden kannalta. Sideaineen käytös on täysin viskoosia korkeissa lämpötiloissa ja/tai pitkillä kuormitusajoilla, vaihekulman ollessa 90° . Toinen tehokas menetelmä mittausrvirheiden löytämiseen on tulosten piirtäminen kuvan 25 mukaiseen kuvaajaan: Taajuuden logaritmin funktiona piirrettyjen $\log |G^*|$ -arvojen tulee muodostaa yhtenevä muotoiset suorat. Poikkeavat pisteet tai vaihtelevat kulmakertoimet kertovat mittausrvirheistä. Kuvassa 25 on esitetty vain RAP+BF -sideaineen arvot, mutta vastaava tarkastelu tehtiin kaikille sideaineille. Arvioinnin perusteella mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina ja sideaineita reologisesti yksinkertaisina. (Marasteanu ym. 2001)

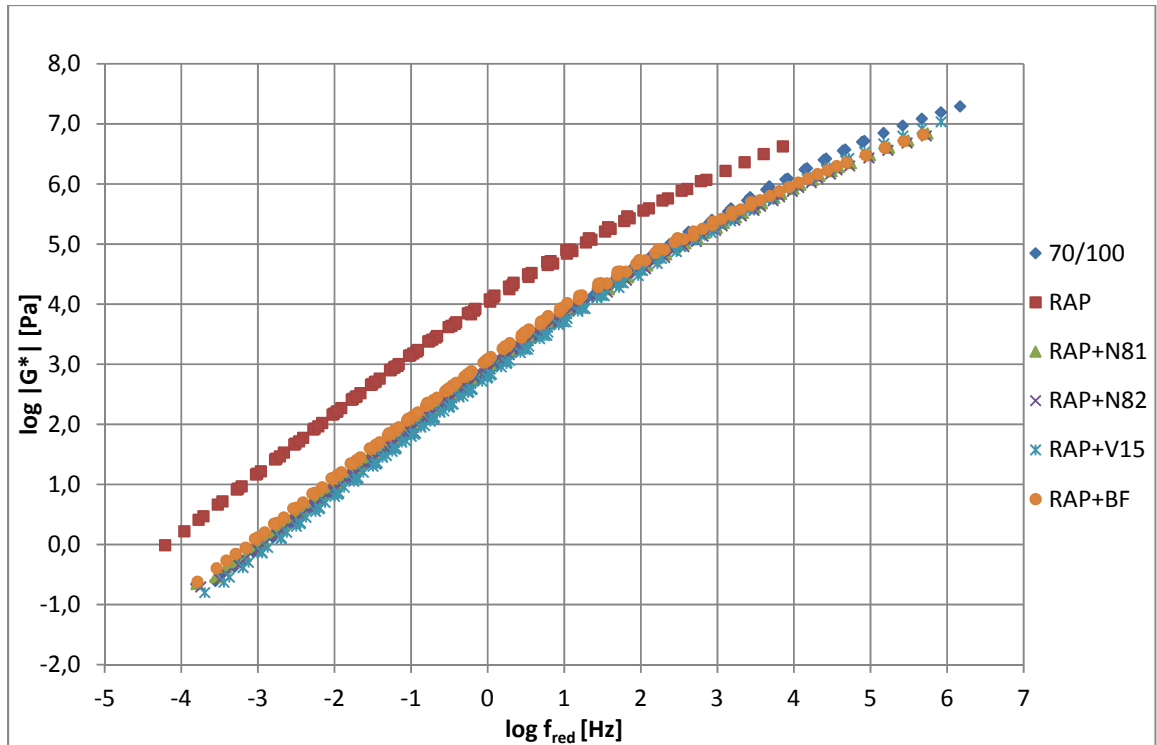


Kuva 24. DSR-mittauksien tuloksista piirretty black diagram.



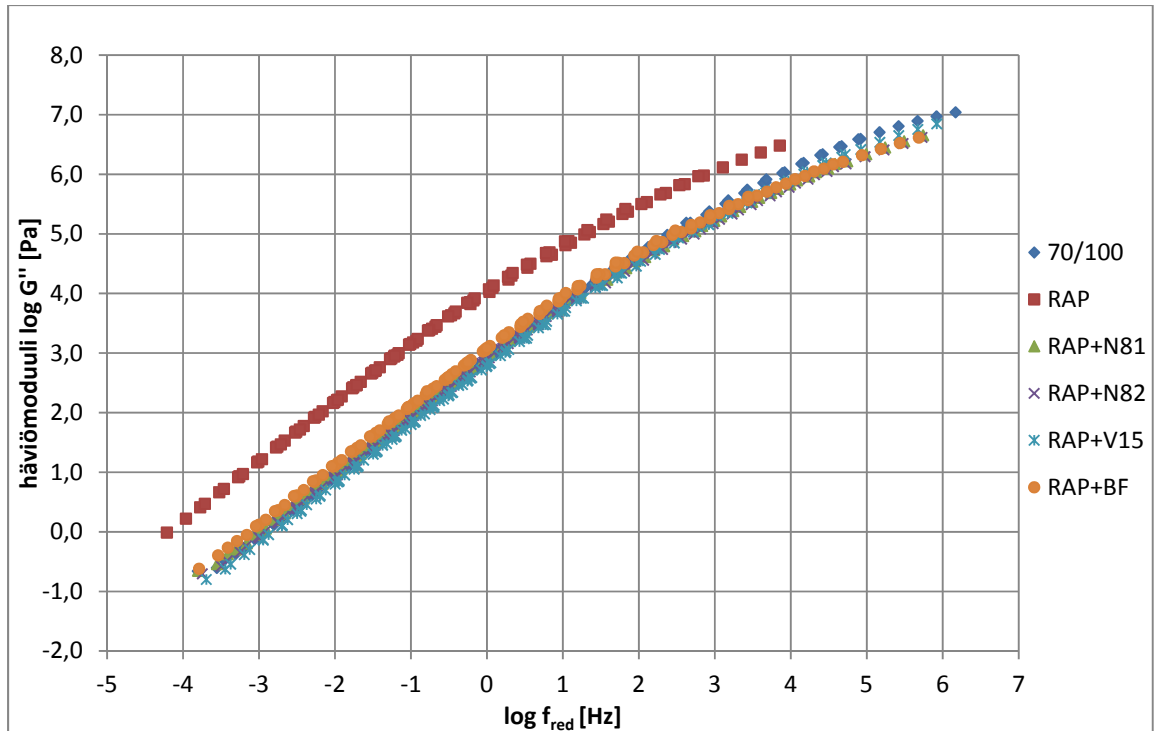
Kuva 25. RAP+BF -sideaineen $\log |G^*|$ -arvot piirrettyinä lämpötiloittain taajuuden logaritmin funktiona.

Eri lämpötiloissa ja taajuuksilla määritetyt $|G^*|$ arvot -yhdistettiin tyyppikäyriksi. Kuvaajat piirrettiin käyttäen Gordon & Shaw:n pareittaisen limityksen menetelmää (Rowe ym. 2008). Lopuksi tyyppikäyrä siirrettiin vastaamaan valittua 60 °C referenssilämpötilaa. Käyrän oikea laita edustaa kylmiä lämpötiloja tai lyhyitä kuormitusaikoja kun taas vasen reuna edustaa korkeita lämpötiloja tai pitkiä kuormitusaikoja. Kuvasta 26 nähdään, että elvyttimet alensivat RAP-sideaineen jäykkyyden 70/100 -bitumin tasolle. Lyhyillä kuormitusaajoilla tai kylmissä lämpötiloissa referenssi 70/100 sekä RAP+V15 olivat öljymäisillä tuotteilla elvytetytyjä sideaineita jäykempiä. Toisaalta pitkillä kuormitusaajoilla tai korkeissa lämpötiloissa öljymäisillä lisäaineilla elvytetyt sideaineet ovat hieman jäykempiä. Kuvaajasta voidaan jälleen nähdä ero sideaineiden lämpötilaherkkyudessa: 70/100 ja RAP+V15 -käyrät ovat kulmakertoimeltaan jyrkempiä, eli niiden jäykkyys on herkempi kuormitustaajuuden ja lämpötilan muutoksille.

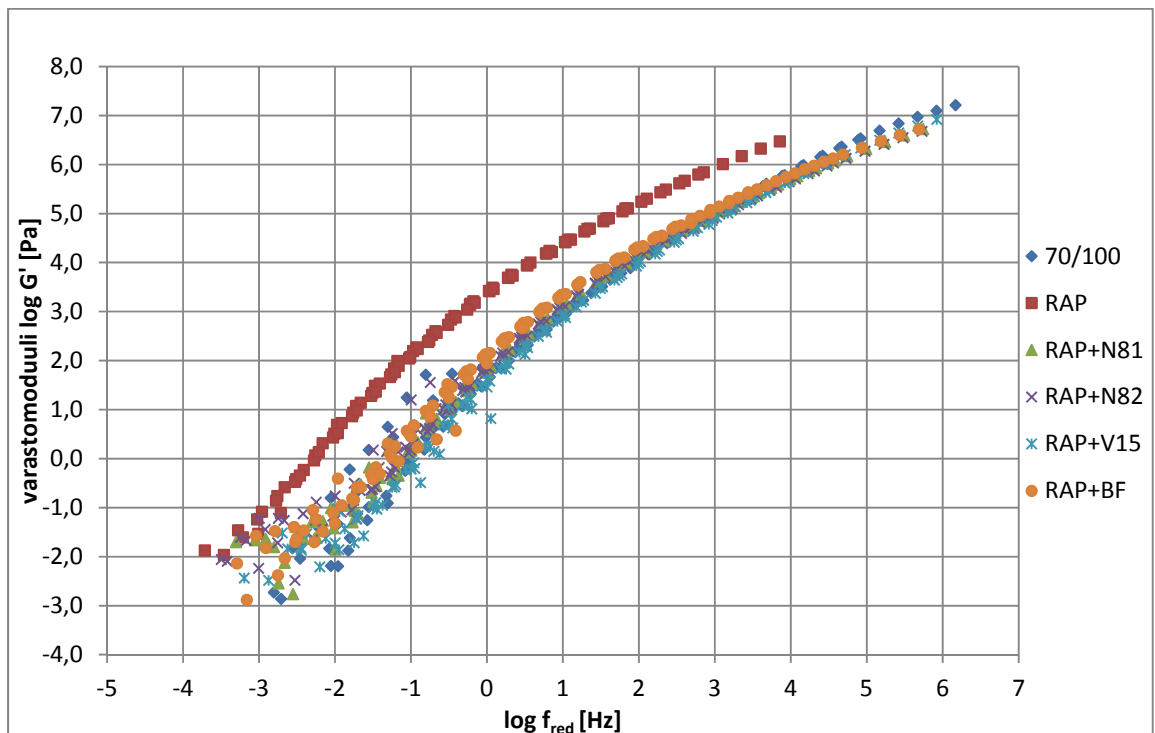


Kuva 26. Sideaineiden kompleksisen leikkausjännityksen esitys tyypikäyrän avulla (T_{ref} 60 °C).

Kompleksinen leikkausjännitys koostuu varasto- ja häviömoduuleista, joille voidaan piirtää erikseen tyypikäyrät sideaineiden ominaisuuksien vertailun helpottamiseksi. Häviömoduuli G'' (kuva 27) edustaa sideaineen viskoosista käyttäytymistä, eli lämpönä häviävää energiaa. Riittävän alhaisissa lämpötiloissa tai lyhyillä kuormitusajoilla viskoosinen osa häviää kokonaan, ja bitumi käyttäytyy täysin elastisesti. Varastomoduli G' kuvaa sideaineen elastista käyttäytymistä, eli energiaa joka on palautettavissa. Varastomodulleista piirretyt tyypikäyrät on esitetty kuvassa 28.



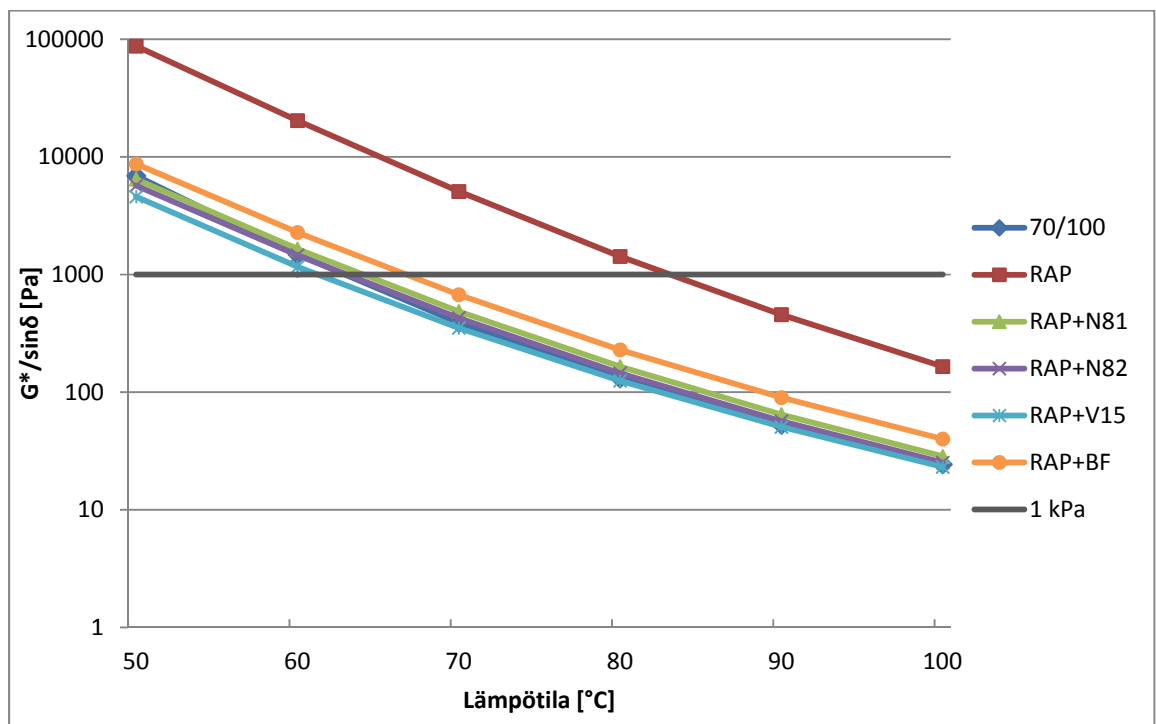
Kuva 27. Sideaineiden häviömoduulin tyypikäyrät ($T_{ref} 60$ °C).



Kuva 28. Sideaineiden varastomoduulien tyypikäyrät ($T_{ref} 60$ °C).

Sideaineiden deformaatiokestävyyttä arvioitiin myös laskemalla $|G^*|/\sin\delta$ -tunnusluku urautumiselle. Standardi AASHTO M320-10 mukaisessa PG-luokituksessa hyvän

viskoelastisen käyttäytymisen rajana pidetään lämpötilaa, jossa lämpötilan funktiona laskeva $|G^*|/\sin\delta$ saavuttaa arvon 1 kPa. Kriittisellä lämpötilalla tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jossa sideaine juuri kohtaa luokituksen asettaman raja-arvon. Sideaineille lasketut kriittiset lämpötilat on esitetty kuvassa 29. Tuloksien laskentaan käytetyt arvot on mitattu 1,78 Hz taajuudella, joka oli lähinnä spesifikaatiossa käytettyä 1,59 Hz taajuutta (10 rad/s). Tämä taajuus vastaa kuormitusajaltaan noin 70 km/h nopeudella etenevää ajoneuvoa. Tulosten perusteella biofluksilla ja Nytex -öljyillä elvytetyt sideaineet olivat deformaatiokestävyydeltään parempia tai ainakin samalla tasolla kuin tuore 70/100 -bitumi. Sen sijaan RAP+V15:n kriittinen lämpötila oli alhaisempi kuin vertailubitumin.

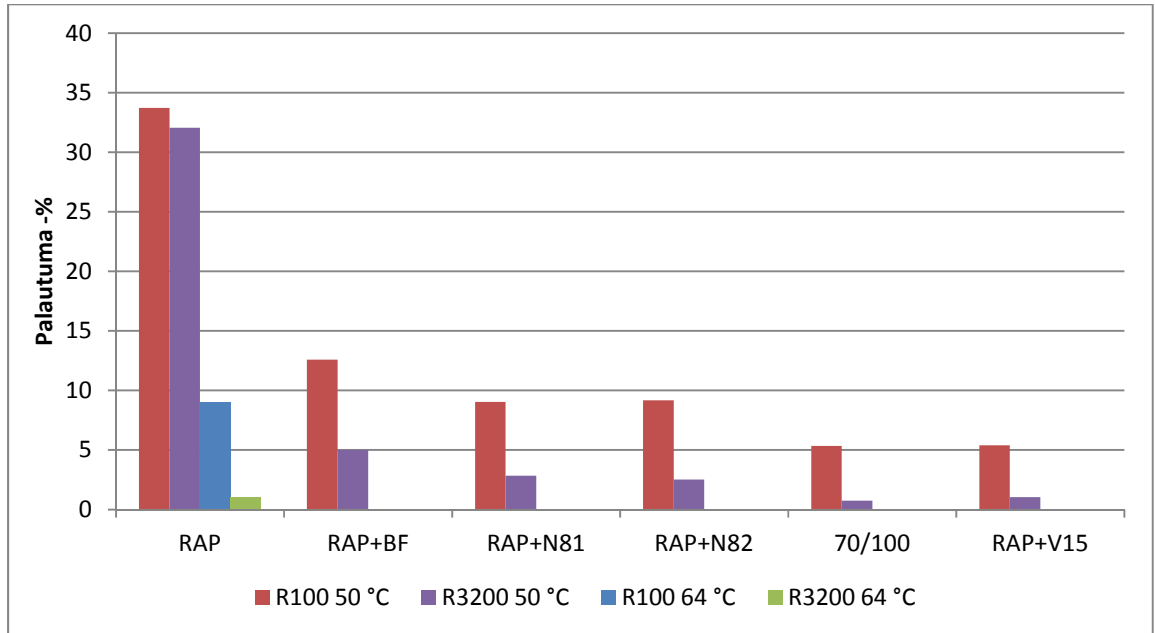


$ G^* /\sin\delta = 1 \text{ kPa}$	RAP	70/100	RAP+BF	RAP+V15	RAP+N81	RAP+N82
°C	77,9	64,4	68,0	62,0	65,5	64,4

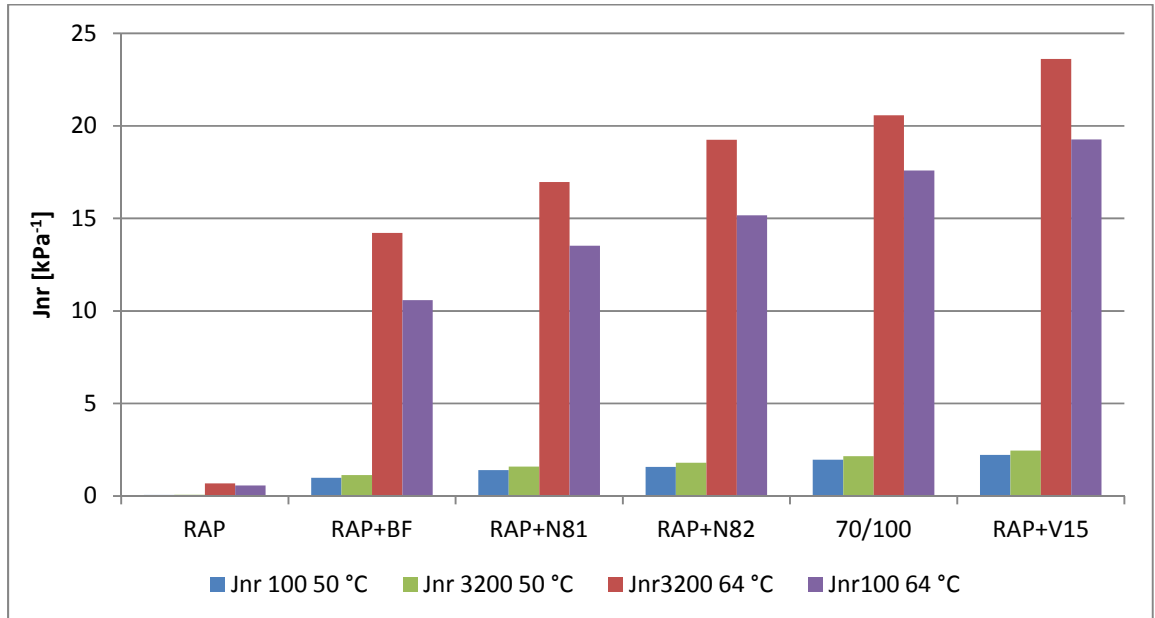
Kuva 29. $|G^*|/\sin\delta$ -tunnusluvun perusteella lasketut kriittiset lämpötilat sideaineen pysyvän muodonmuutoksen kannalta. Taulukossa on lisäksi esitetty sideaineiden $|G^*|$ ja δ -arvot kriittisessä lämpötilassa.

Sideaineseosten kykyä vastustaa deformaatiota tutkittiin tarkemmin MSCR-kokeella, koska sen toisena tuloksena saatavan J_{nr} -arvon on todettu korreloivan päällysteen deformaatioherkkyyden kanssa paremmin verrattuna $|G^*|/\sin\delta$ -arvoon erityisesti modifioituilla bitumeilla. MSCR-kokeen tulokset kahdessa eri lämpötilassa on esitetty kuvissa 30 ja 31. Elvytetyillä sideaineilla 64 °C:ssa lasketut palautumaprosentit olivat negatiivisia. Palautumaprosentti ilmaisee lepojaksen aikana palautuneen muodonmuutoksen osuuden kuormitusjakson aikana syntyneestä muodonmuutoksesta. Negatiiviset palautumaprosentit 64 °C:n lämpötilassa johtuvat reometrin mittausrvirheestä,

joten ne on jätetty pois tuloksista. MSCR -testi toistettiin alemmassa lämpötilassa tarkemmalla reometrilla, jolloin myös palautumaprosentit olivat positiivisia.



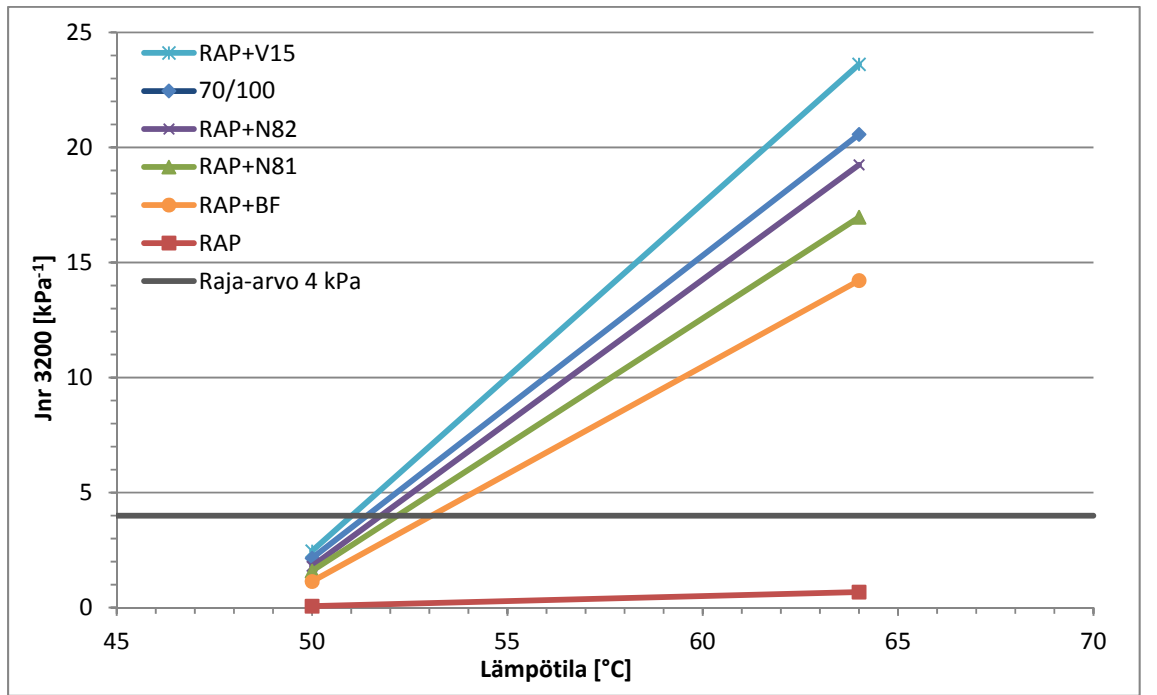
Kuva 30. Sideaineiden keskimääräiset palautumaprosentit MSCR -kokeessa 50 ja 64 °C:n lämpötiloissa.



Kuva 31. Sideaineiden keskimääräiset palautumattomat myötäykset MSCR -kokeessa 50 ja 64 °C:n lämpötiloissa.

Kahden lämpötilan tulosten perusteella on mahdollista määrittää kriittinen lämpötila PG-luokituksen asettaman raja-arvon mukaisesti ($J_{nr3200} \leq 4 \text{ kPa}^{-1}$ tavanomainen liikennekuormitus standardin AASHTO MP 19-10 mukaisesti). Kuvassa 32 esitetyt

kriittiset lämpötilat vahvistivat edellä esitetyn $|G^*|/\sin\delta$ -tunnusluvun antamat tulokset: Biofluksilla ja Nytex -öljyillä elvytettyjen sideaineiden deformaation kannalta kriittinen lämpötila on hieman korkeampi tai ainakin samalla tasolla verrattuna 70/100 -bitumiin. Käyttämällä elvyttimenä V1500 -bitumia ei päästä yhtä hyvään tulokseen. Puhdas RAP-sideaine oli odotetusti erittäin deformaatiokestävää.



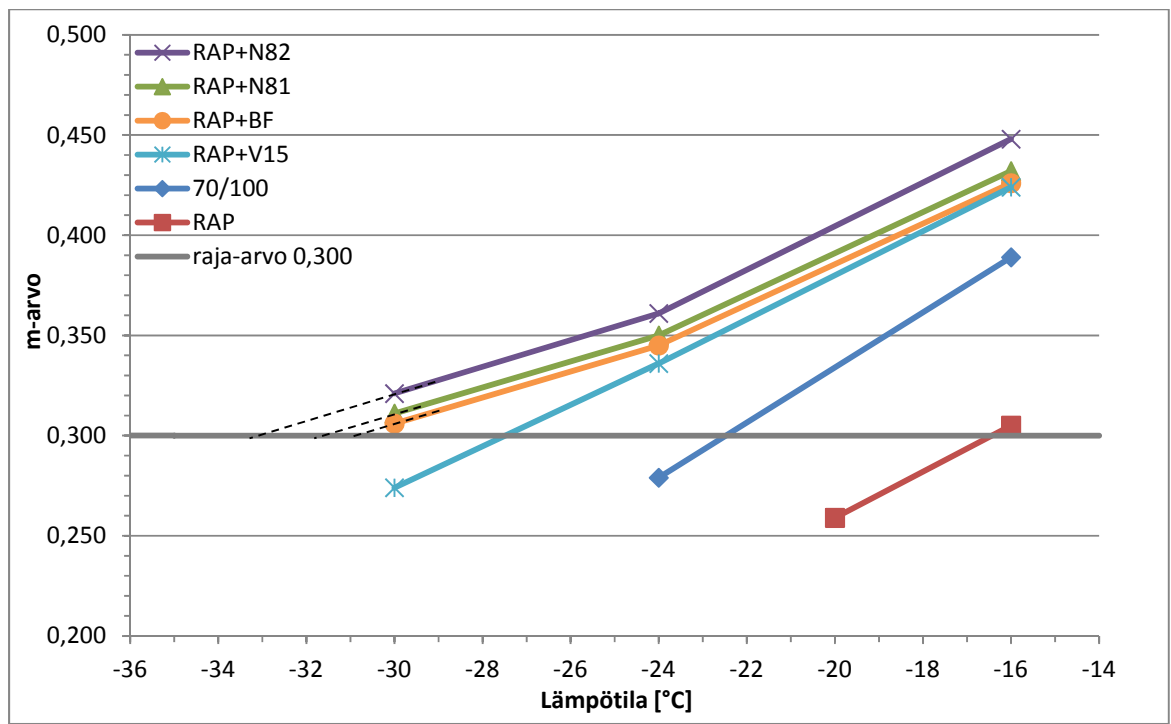
$J_{nr3200} = 4 \text{ kPa}^{-1}$	RAP	70/100	RAP+BF	RAP+V15	RAP+N81	RAP+N82
°C	-	51,4	53,0	51,0	52,2	51,7

Kuva 32. MSRC -tulosten perusteella määritetyt kriittiset lämpötilat sideaineiden deformaatiokestävyydelle ($J_{nr3200} 4 \text{ kPa}^{-1}$).

Elvytettyjen sideaineiden kylmäominaisuuksia tutkittiin Fraass -murtumispisteen ja taivutusvirumajäykkyuden avulla. Elvytettyjen sideaineiden murtumispistelämpötilat olivat 70/100 -bitumia alemmat biofluksilla ja molemmilla Nytex -öljyillä. RAP+BF sideaine ei murtunut mittauksen kylmimpään lämpötilaan (-35 °C) mennessä. Kyseiset elvyttimet siis parantavat bitumin kylmäkestävyyttä lisäämällä sideaineen joustavuutta. V1500:lla elvytetyn sideaineen murtumispiste oli 2 astetta korkeampi kuin 70/100 -bitumilla. Murtumispistekokeiden lupaavien tulosten johdosta elvytettyjen sideaineiden kylmäominaisuuksia tutkittiin myös taivutusvirumakokeella.

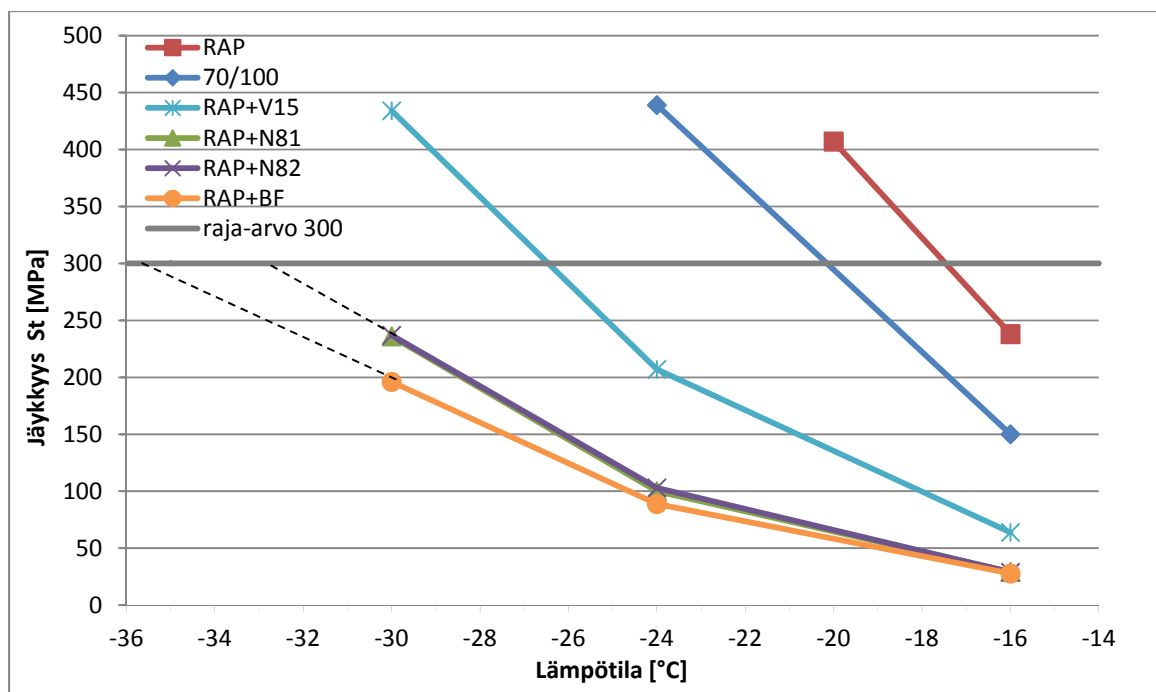
Taivutusvirumakoe suoritettiin BBR-laitteella aluksi kahdessa lämpötilassa: -16 ja -24 °C. Näistä lämpötiloista poiketen elvyttämätön RAP-sideaine testattiin -16 ja -20 °C:ssa. Elvytettyjen sideaineiden osoittaessa erittäin hyviä kylmäominaisuuksia kokeet toistettiin -30 °C:n lämpötilassa. Sideaineille laskettiin mittaustulosten perusteella kriittiset lämpötilat, joissa PG-luokituksen mukaiset raja-arvot vielä täyttyvät. Öljymäisillä tuotteilla elvytettyt

sideaineseokset eivät vielä kylmimmässäkään testauslämpötilassa saavuttaneet mukaisia raja-arvoja, joten niiden käyttäytymisen oletettiin jatkuvan lineaarisena kahden kylmimmän mittauspisteen suuntaisesti. Karkean lineaarisen oletuksen vuoksi kriittistä lämpötilaa tulee tarkastella vain suuntaa-antavana arvona. Kriittisten lämpötilojen laskenta ja tulokset on esitetty kuvissa 33 ja 34. Koska sideainenäytteet olivat kooltaan pieniä, taivutusvirumakokeissa testattiin vain yksi sideainepalkki lämpötilaa kohti standardin vaatiman kahden palkin sijaan. Kyseisen kokeen toistettavuus on kuitenkin hyvä, joten yhden palkin antamia tuloksia voidaan pitää luotettavina.



m-arvo = 0,300	RAP	70/100	RAP+BF	RAP+V15	RAP+N81	RAP+N82
°C	-16,4	-22,5	-30,9	-27,5	-31,7	-33,2

Kuva 33. Taivutusvirumakokeen m-arvot -16, -24 ja -30 °C:ssa. Kriittisen lämpötilan laskenta.



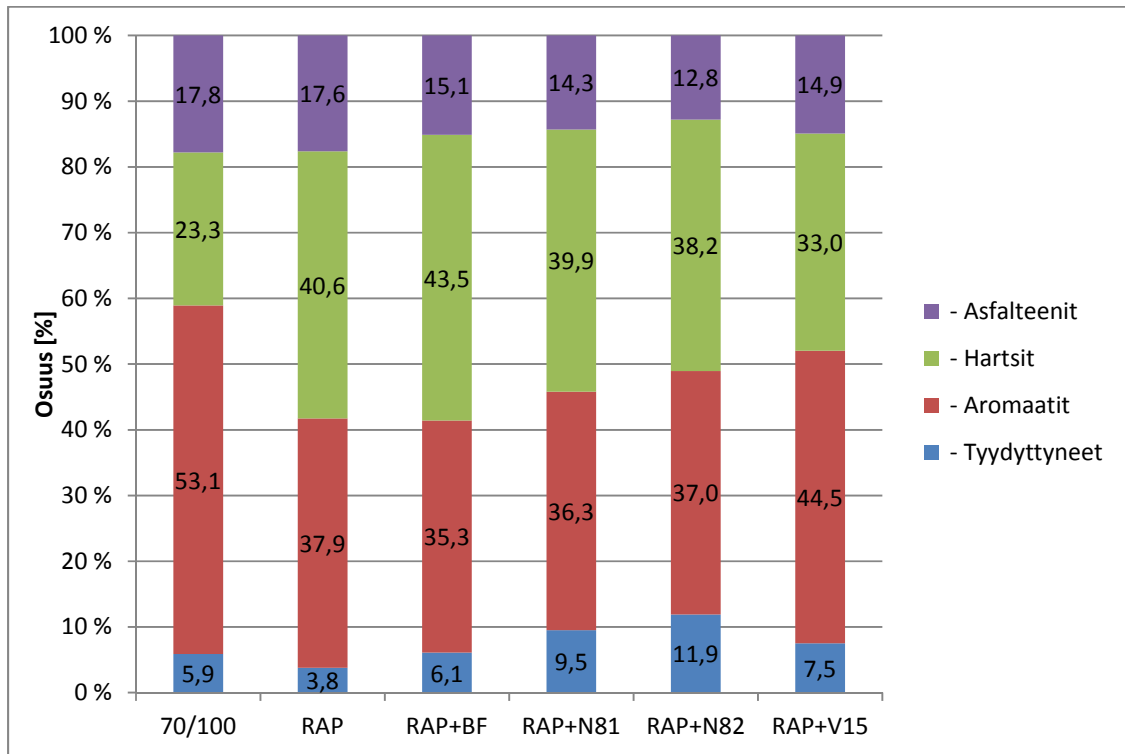
St = 300 MPa	RAP	70/100	RAP+BF	RAP+V15	RAP+N81	RAP+N82
°C	-17,5	-20,2	-35,8	-26,5	-32,8	-32,8

Kuva 34. Taivutusvirumakokeen jäykkyydet -16, -24 ja -30 °C:ssa. Kriittisen lämpötilan laskenta.

BBR-kokeiden tuloksista havaittiin, että elvytettyjen sideaineiden kylmäominaisuudet ovat paremmat kuin tuoreen 70/100 -bitumin. Lisäksi öljymäiset elvyttimet biofluksi ja Nytex-öljyt paransivat RAP-sideaineen kylmäominaisuuksia enemmän kuin V1500. Öljymäisillä elvyttimillä vaikuttaa olevan suuri merkitys RAP-sideaineen käyttäytymiseen kylmissä ja korkeissa lämpötiloissa: Öljymäisillä lisäaineilla elvytetty sideaineet kestävät korkeampia lämpötiloja ilman deformatumista ja matalampia lämpötiloja ilman murtumista.

Sideaineiden kemiallisessa koostumuksessa tapahtuvia muutoksia tutkittiin ohutlevykromatografisella fraktiointimenetelmällä (Iatroscan-laite). Sideaineiden SARA-fraktiot on esitetty kuvassa 35. Vanhenemisen myötä tapahtuva muutos bitumin kemiallisessa koostumuksessa voidaan nähdä vertailemalla sideaineita 70/100 ja RAP: Hartsien osuus on kasvanut voimakkaasti, samalla kun kevyempien fraktioiden, erityisesti aromaattien, osuudet ovat pienentyneet. Tämä vastaa tyypillistä kirjallisuusselvityksessä esiin tullutta muutosta sideaineen koostumuksessa. Joissakin tutkimuksissa raportoitiin myös huomattavaa asfalteenien määrän kasvua vanhenemisen myötä, mutta tässä tutkimuksessa asfalteenien määrässä ei tapahtunut muutosta. Biofluksin ja Nytex -öljyjen lisääminen näkyi SARA-fraktioissa tyydyttyneiden öljyjen fraktion osuuden kasvuna. Aromaattisia hiilivetyjä sisältävä V1500 puolestaan kasvatti odotetusti aromaattien fraktion osuutta. Aiemman tutkimustiedon perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että biofluksi on ainakin osittain poistunut sideaineseoksesta ensimmäisen liuotinaineen mukana (Simonen

2011). Menetelmä ei täysin sovellu prosessoiduille petrokemian tuotteille, joten niistä saadut tulokset voivat olla vääristyneitä (Tyllgren 2010). Lisäksi SARA-fraktioita tarkasteltaessa on muistettava, että kyse on keinotekoisesta jaottelusta eivätkä fraktiot edusta puhtaita kemiallisia ryhmiä.



Kuva 35. Sideaineista Iatroskan-laitteella määritetyt SARA-fraktiot.

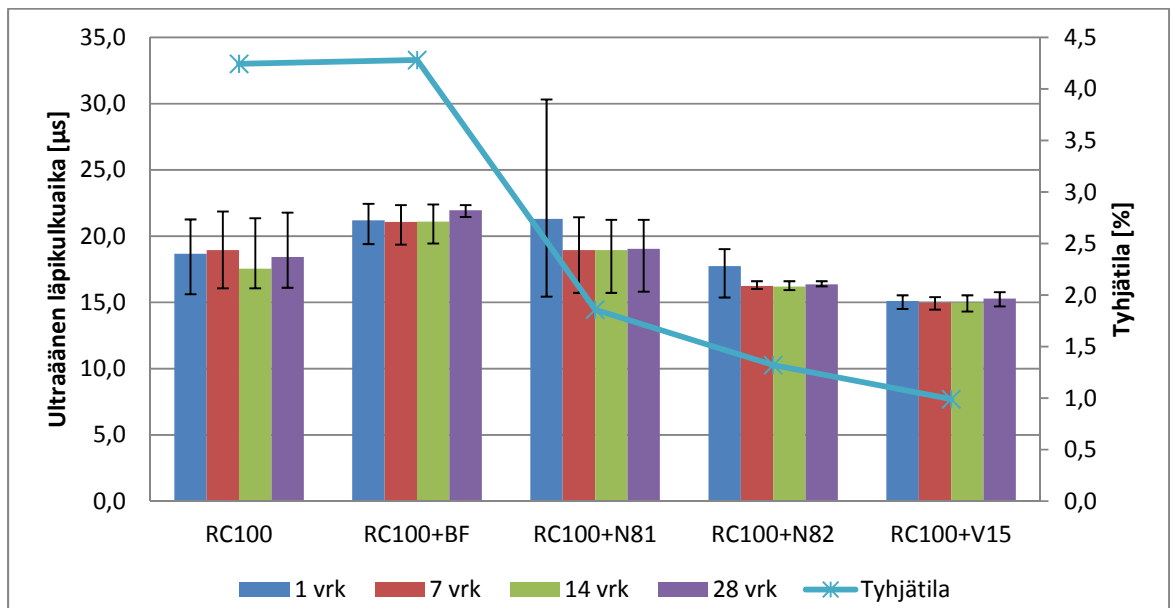
Useiden testien kohdalla on huomattava, että tulokset vaikuttavat järjestäytyvän elvyttimen osuuden suhteen. Biofluksia lisättiin RAP-sideaineeseen suhteessa vähiten, ja biofluksilla elvytetyt näytteet saavuttivat parhaat ominaisuudet kylmä- ja deformaatio-ominaisuuksia mittaavissa testeissä. Tämä herätti kysymyksen, kumpi vaikuttaa enemmän sideaineen ominaisuuksiin: elvyttimen määrä vai laatu. Pehmeää bitumista elvyttintä käytettäessä sideaineen ominaisuudet palautuvat 70/100 bitumin tasolle, mutta öljymäisillä elvyttimillä saavutetaan parannusta käyttölämpötila-alueen ääripäiden käyttäytymisessä. Testit suoritettiin vanhentamattomille sideainenäytteille, joten tutkimukset tulisi toistaa vanhennetuilla näytteillä.

6.2 Elvyttimien käyttäytyminen asfalttirouheen kanssa

RC100 -koekappaleiden valmistus ja koestus onnistuivat odotettua paremmin. Koekappaleiden pelättiin olevan liian hauraita tutkittaviksi, sillä seokset valmistettiin ilman lisäsideainetta. Riittävällä rouheen lämmityksellä ja tiivistämällä koekappaleita normaaleja massanäytteitä enemmän päästiin kuitenkin kohtalaisen hyvään lopputulokseen. Koesarjan aikana hajonneiden koekappaleiden murtopinnoilla esiintyi suuria kiviainesrakeita ilman

bitumipintaa tai jossain tapauksessa rouheen mukana tulleita epäpuhtauksia, kuten pieni puupala. Rouheen ominaisuuksien vaihtelun merkitys korostui ilman lisäsideainetta tai rakeisuutta korjaavaa lisäkiviainesta valmistettavissa RC100-koekappaleissa. Ehjänä säilyneiden koekappaleiden tuloksissa esiintyvä hajonta oli pientä. Variaatiokerroin halkaisuvetolujuuskokeissa oli 3,9–6 %. Epäsuoran jäykkyyssmoduulin määrittämisessä variaatiokerroin vaihteli välillä 4,8–22 % sen mukaan, mikä oli keskiarvoon mukaan hyväksytyjen koetulosten määrä. Nämä variaatiokertoimet ovat varsin hyviä ottaen huomioon menetelmän hajonnan ja materiaalin ominaisuudet.

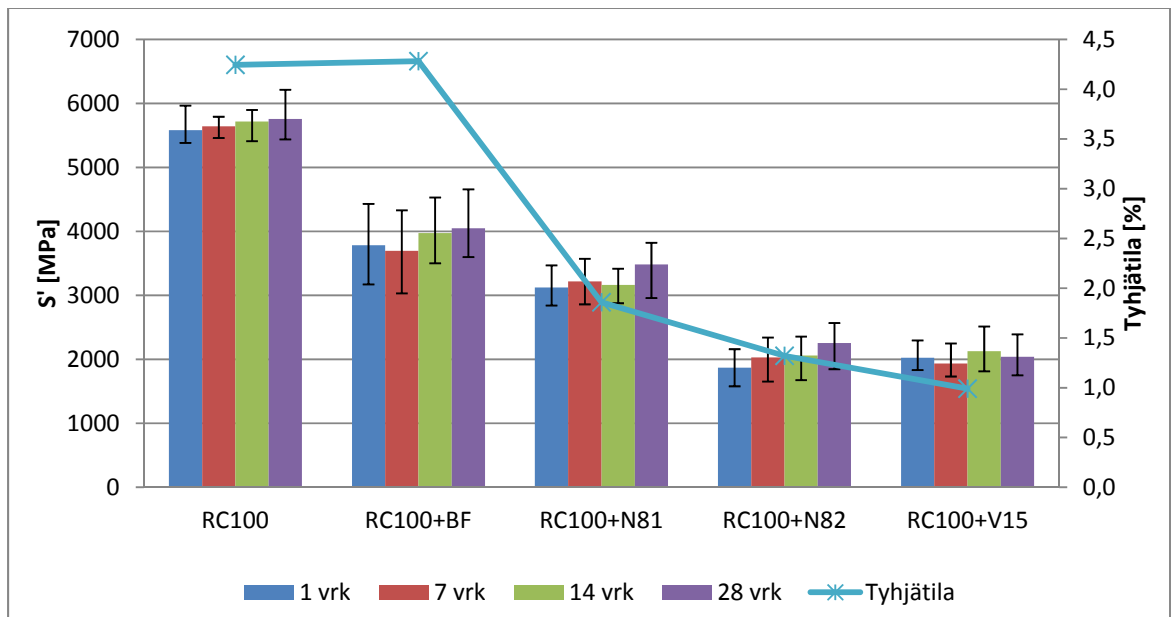
Elvytetystä asfalttirouheesta valmistettujen koekappaleiden ultraäänitutkimuksissa ei havaittu tilastollisesti merkittävää muutosta ajan suhteen (kuva 36). RC100+N81-koekappaleiden suuri vaihteluväli 1 vrk iässä johtuu yksittäisestä koekappaleesta, joka jostain syystä antoi keskiarvoa huomattavasti suuremman tuloksen. Kyseessä voi olla pelkkä mittausvirhe. Epäsuoran jäykkyyssmoduulin koesarjan aikana hajonneiden koekappaleiden tulokset jätettiin keskiarvoista pois, jotta keskiarvon laskentaperusteena ollut koekappaleiden lukumäärä olisi kaikkien aikamuuttujien suhteen sama. Tarkoituksena oli seurata ajan suhteen tapahtuvia muutoksia, jolloin keskiarvojen tulee perustua samoihin koekappaleisiin jokaisena tutkimusajankohtana.



Kuva 36. RC100 -koekappaleiden keskimääräiset ultraäänien läpikulkuajat sekä tyhjätilat.

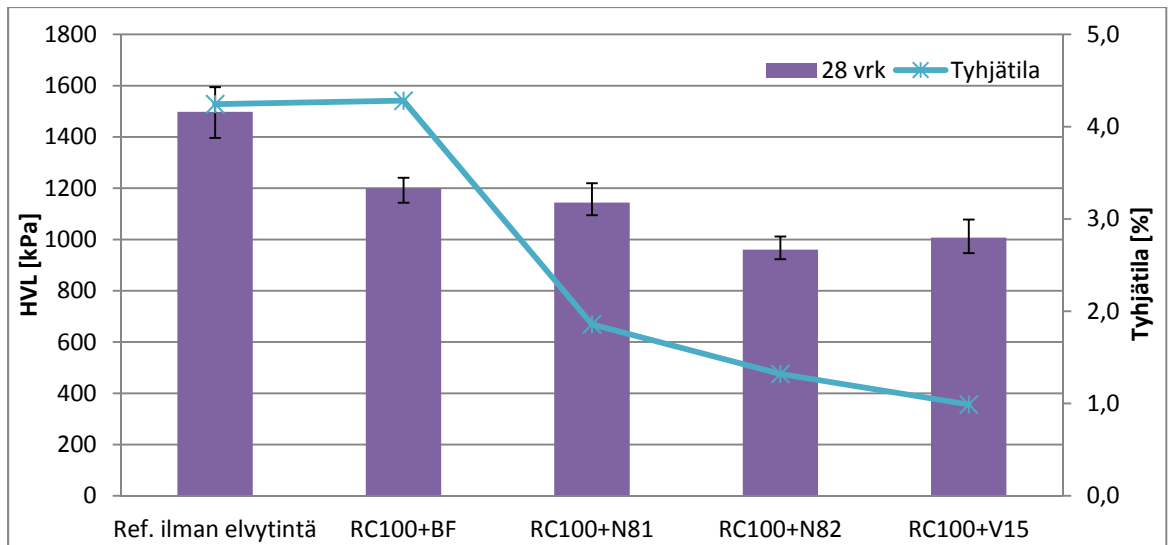
Kaikki elvyttimet alensivat asfalttirouheesta valmistettujen koekappaleiden jäykkyyssmoduulia (kuva 37) ja halkaisuvetolujuutta (kuva 38) ilman elvytintä valmistettuihin referenssikoekappaleisiin verrattuina. Tämä oli odotettu tulos, sillä elvyttimen tarkoitus on pehmentää asfalttirouheen vanhaa sideainetta. Sideaineen tunkeuman kasvaessa ja jäykkyyden alentuessa halkaisuvetolujuus pienenee. Jäykkyyssmoduulissa ei tapahtunut tilastollisesti merkittävää kasvua 1–28 vuorokauden

välillä. Epäsuoran jäykkyysmoduulin tulosten perusteella voitiin olettaa, että elvytin imeytyi RAP-sideaineeseen nopeasti ja käyttäytyi rouheessa tasaisesti tutkitulla aikavälillä. Koekappaleiden jäykkyysmoduulin tuloksissa olisi esiintynyt enemmän hajontaa tekeytymisajan suhteen, jos elvytin ei olisi heti imeytynyt rouheen sideaineeseen. Koska RC100 -koekappaleille ei voitu suorittaa luotettavaa tyhjätilakorjausta, kuvaajissa on nähtävillä myös koekappaleiden keskimääräiset tyhjätilat.



Kuva 37. RC100 -koekappaleiden epäsuoran jäykkyysmoduulin S' keskimääräiset arvot 20 °C:ssa.

HVL-kokeiden tulokset on esitetty kuvassa 38. Eniten halkaisuvetolujuutta alensivat V1500 ja Nytex 820, joiden HVL oli 33 – 36 % pienempi kuin referenssikoekappaleiden. Todellisuudessa erot ovat hieman esitettyä suuremmat, kun tyhjätilan vaikutus lujuteen otetaan huomioon: V1500 on muita elvyttimiä huomattavasti paksumpi, joten halutun pehennysvaikutuksen saavuttamiseksi V1500:a oli lisättävä rouheeseen huomattavasti enemmän kuin ohuita öljymäisiä elvyttimiä. Suuri elvytinmäärä nostaa myös koekappaleiden sideainepitoisuutta, joten tulokset eivät ole enää suoraan vertailukelpoisia. Elvytettyjen koekappaleiden lujouden korreloiminen lisätyn elvytinmäärän kanssa on merkille pantava seikka. Sama ilmiö havaittiin sideainekokeiden tuloksista.



Kuva 38. RC100 -koekappaleiden keskimääräiset halkaisuvetolujuudet 20 °C:ssa.

Koekappaleiden murtopinnoilla esiintyi selvästi murtuneita kiviainesrakeita. Tämä on osoitus siitä, että pelkästä rouheesta valmistetuissa koekappaleissa syntyi kuitenkin hyvä tartunta rouherakeiden ympärille. Jos murtopinnat olisivat olleet bitumikerroksen peittämiä, murtuma olisi syntynyt sideaineeseen. Rouheessa oli mukana myös kiviainesrakeita, jotka eivät olleet täysin sideaineen peitossa ja kun koekappaleet valmistettiin ilman lisäsideainetta, myös lämmitettyyn rouheeseen jäi paljaita kiviainespintoja. Ilman kunnollista sideaineen tartuntaa rouheesta tiivistettyjen kappaleiden lujuus jäisi erittäin alhaiseksi.

RC100 -koekappaleille tehtyjen tutkimusten tuloksia ei voi suoraan vertailla uusiomassasta valmistettuihin koekappaleisiin, sillä pelkkä asfalttirouhe on materiaalina hyvin erilainen, eikä koekappaleiden valmistuksessa käytetty lisäsideainetta. Tutkimuksissa rouhetta käytettiin yhtenä lajitteena 0/16, jolloin sen koostumuksen kontrollointi oli vaikeaa. RC100 -koekappaleilla suoritetut kokeet tarjosivat hyvää lähtötietoa elvyttimien käyttäytymisestä asfalttirouheen kanssa. Myös tutkimusmenetelmien soveltuvuudesta saatiin käytännön kokemuksia, joten uusiomassoja koskevaa tutkimussuunnitelmaa oli mahdollista tarkentaa. Esimerkiksi dielektrisyysarvon määrittäminen suunnitelluilla koejärjestelyillä ei onnistunut, joten menetelmän käytöstä tässä tutkimuksessa luovuttiin. Ultraäänimenetelmällä ei voitu erottaa koekappaleen ominaisuuksien muuttumista tekeytymisajan suhteen, joten uusiomassojen osalla seuranta ei enää jatkettu.

6.3 Elvyttimien käyttäytyminen uusiomassoissa

6.3.1 Yleistä uusiomassojen sekoittamisesta ja tutkimuksista

Uusiomassojen sekoittaminen ja valmistaminen onnistuivat hyvin. Massojen sideainepitoisuudet vaihtelivat välillä 5,3–5,8 massa- %. Massojen rakeisuudet olivat hieman suunniteltua hienojakoisemmat, mutta läpäisyprosentit pysyivät AB16:n

ohjearvojen sisäpuolella. Uuttosuodatuksissa käytettiin HVL-kokeissa rikottuja koekappaleita, joten hajonta näytteiden rakeisuuksissa ja sideainepitoisuuksissa voi olla todellisuutta suurempi. Tarkempi tulos olisi saatu käyttämällä sekoituksen yhteydessä otettuja massanäytteitä. Laboratoriossa sekoitettavien massojen sideainepitoisuuden saaminen täsmälleen oikeaksi on vaikeaa. Sideaine kaadetaan sekoittimeen käsivaralta, ja lisätyn sideaineen määrää voidaan kontrolloida vain tihein välipunnituksin. Sideaineen lisäyksen tulisi kuitenkin tapahtua ripeästi. Kaadettaessa sideainetta myös tarttuu sekoittimen suojakannen ritilään, joka lisää epätarkkuutta. Sideainepitoisuuden vaihtelu vaikuttaa päällysteen ominaisuuksiin, joten sideainepitoisuuden vaihtelu on otettava huomioon tulosten vertailussa. Lisäksi laboratoriossa sekoitettavat massamäärät ovat erittäin pieniä, jolloin virheet korostuvat ja jopa kertaantuvat. Laboratorio-oloissa valmistetut massat ja koekappaleet eivät todellisuudessa vastaa asemasekoitteisia massoja ja niistä tiivistettyjä päällysteitä. Erilaisten tiivistystapojen merkitys tuli vahvasti esille tämän tutkimuksen deformaatiokestävyyskokeissa.

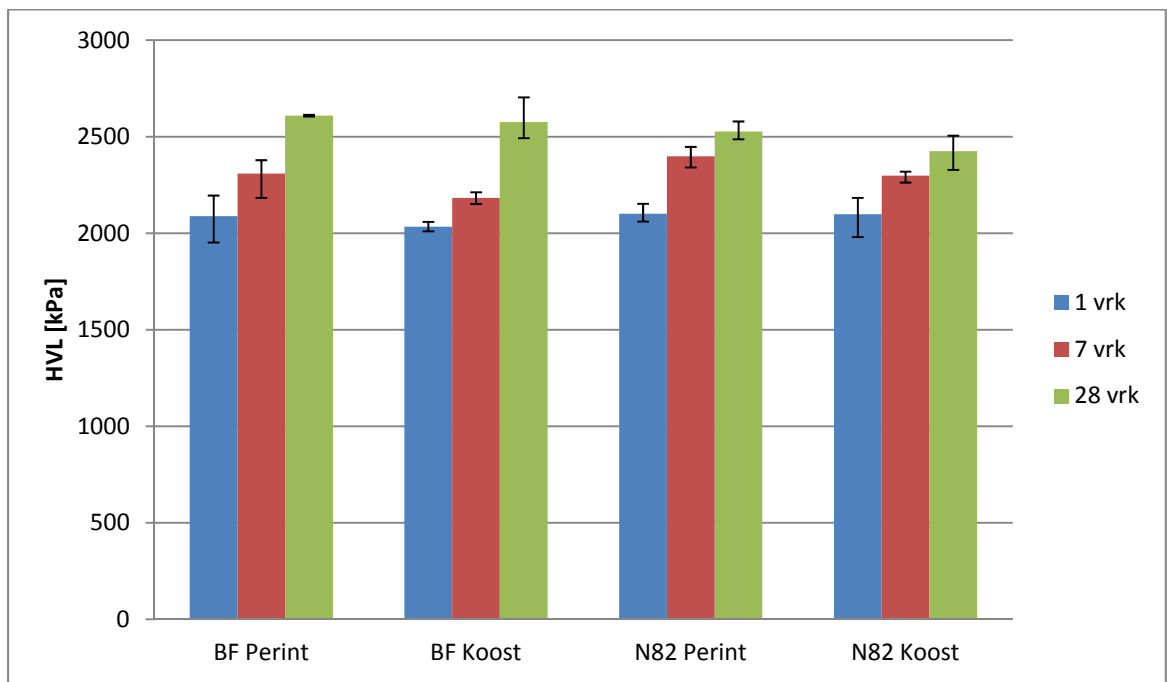
Laboratorio-osuuden laajuuden ja tiukan aikataulun vuoksi kokeita varten valmistettiin vain kolme rinnakkaisnäytettä kutakin koetta ja tekeytymisaikaa kohti. Suurempi rinnakkaisnäytteiden määrä olisi tuonut lisävarmuutta tulosten tulkintaan ja luotettavuuteen. Samoin koekappaleiden tiivistämisessä jouduttiin tekemään kompromisseja: koekappaleet tiivistettiin kiertotiivistimellä käyttäen vakioitua tiivistysmäärää. Tästä syystä tiivistysominaisuuksiltaan erilaisista massoista valmistettujen koekappaleiden tiheydet ja tyhjätilat poikkesivat toisistaan. Optimaalisessa tilanteessa jokaiselle massalle olisi haettu sopiva tiivistyskierrosten määrä halutun tiheyden aikaansaamiseksi. Tyhjätilan vaihtelun vaikutusta koetuloksiin arvioitiin tekemällä tyhjätilakorjaus yksinkertaisella lineaarisella regressiolla. Epäsuoran jäykkyysmoduulin tuloksien osalta apuna käytettiin Hirschin mallia. Tyhjätilakorjausten periaate on esitetty liitteessä O. Koekappaleiden tutkimustulosten tilastollisissa analyysissä on käytetty yksisuuntaista varianssianalyysia ja Bonferronin odotusarvovertailua 5 % merkitsevyystasolla.

6.3.2 Elvyttimen ja sideaineen sekoittuminen uusiomassan valmistuksen yhteydessä

Perinteisellä ja koostetulla sideaineella valmistetuista uusiomassoista tiivistettyjen koekappaleiden tuloksia vertailemalla saatiin tietoa elvyttimen ja sideaineiden sekoittumisesta uusiomassan valmistuksessa. Perinteisellä sekoitustavalla valmistettujen massojen pelättiin olevan epähomogeenisia sideaineen komponenttien huonon sekoittumisen vuoksi. Huonosti sekoittuneen elvyttimen arveltiin alentavan päällysteen lujuutta, sillä viskositeetiltaan huomattavasti alhaisempi aine voisi toimia liukupintakerroksena kiviainesrakeiden välillä. Vertailukohdan luomiseksi käytettiin koostettua sekoitustapaa, jossa asfalttirouheen sideaine eristettiin ja sekoitettiin mekaanisesti elvyttimen ja tuoreen lisäsideaineen kanssa. Koostetun sekoitustavan ajateltiin vastaavaan teoreettista täydellistä sekoittumista.

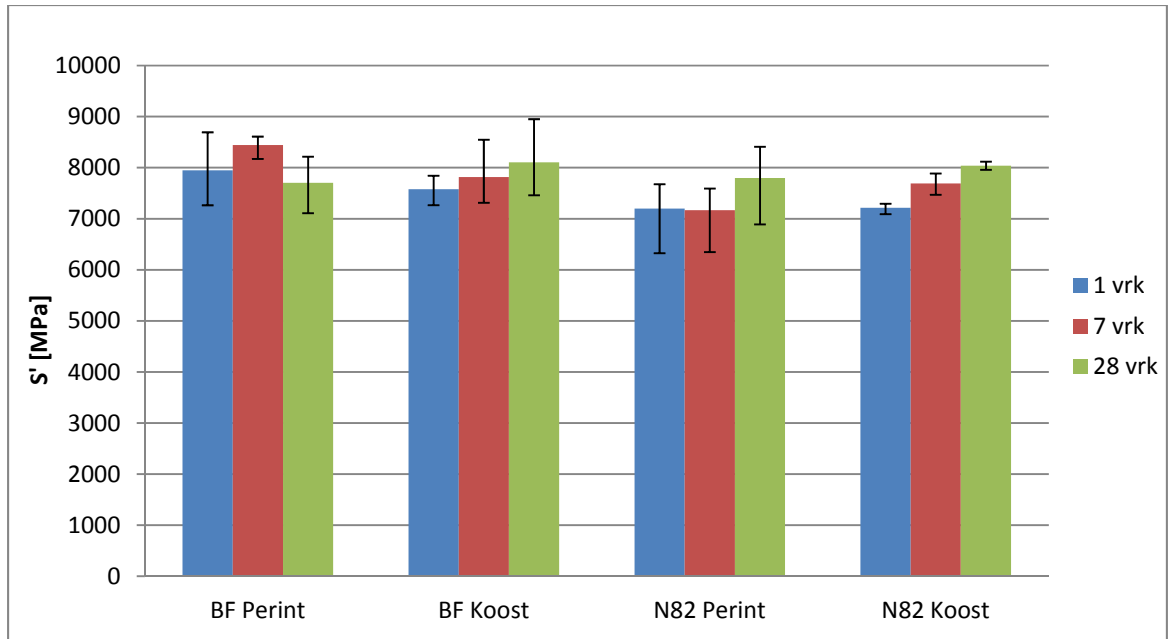
Koekappaleita valmistettaessa havaittiin, että koostetun sekoitustavan massat tiivistyvät paremmin kuin perinteisen sekoitustavan massat. Perinteisen sekoitustavan koekappaleiden keskimääräinen tyhjätila jäi 1–2 % -yksikköä suuremmaksi kuin koostetun sekoitustavan koekappaleiden. Paremman tiivistyvyyden arvioitiin johtuvan massojen homogeenisemmasta rakenteesta.

Kuvissa 39 ja 40 on esitetty koekappaleista määritetyt halkaisuvetolujuudet ja epäsuorat jäykkyysmoduulit, joille on suoritettu tyhjätilakorjaus (liite O). Halkaisuvetolujuuden 28 vrk tuloksille on lisäksi tehty lämpötilakorjaus. Lämpötilakorjauskertoimenä käytettiin koeobjektin massojen HVL-tulosten perusteella määritettyä arvoa 1,9 (liite N).



Kuva 39. AB8 RC40 -koekappaleiden tyhjätilan suhteen korjatut halkaisuvetolujuudet 10 °C:ssa. Tulokset 28 vrk ikäisille koekappaleille on korjattu myös lämpötilan suhteen.

Koekappaleiden lujuudessa tapahtui tilastollisesti merkittävää kehitystä 1–28 vuorokauden aikana. Biofluksilla elvytettyjen massojen koekappaleiden lujuudet kasvoivat 25–27 %. Nytex 820 -koekappaleilla vastaava kehitys oli 16–20 %. Lujuuskehitystä arvioitaessa tulee kuitenkin muistaa, että 28 vuorokauden tulokset eivät ole tarkkoja lämpötilakorjauskertoimen epätarkkuuden vuoksi. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että lujuuskehitystä tapahtui. Jäykkyysmoduulien arvot olivat kaikilla massoilla hyvin lähellä toisiaan, eivätkä ne eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi. Jäykkyyden kehitys 1–28 vrk välillä ei myöskään ollut tilastollisesti merkittävää.



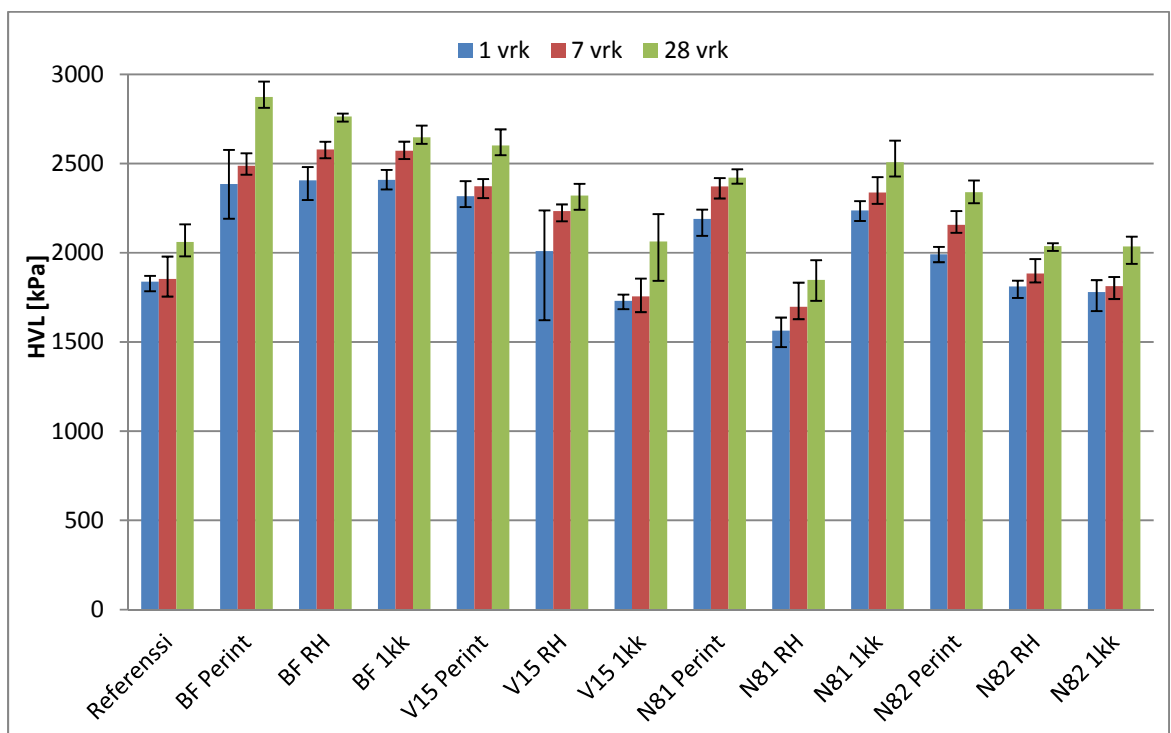
Kuva 40. AB8 RC40 -koekappaleiden tyhjätilan suhteen korjatut epäsuorat jäykkyyshuomiot 10 °C:ssa.

Koska eri sekoitustapojen tulokset eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi, voidaan sanoa, että myös perinteisellä sekoitustavalla tapahtuu hyvä sekoittuminen sideaineen eri komponenttien välillä. Epäsuoran jäykkyyshuomion kehitys 1–28 vuorokauden välillä antaa kuitenkin viitteitä koostetun sekoitustavan koekappaleiden tasaisemmasta käyttäytymisestä. Käyttäytymisen seuranta pidemmällä aikavälillä toisi arvokasta lisätietoa. Epäsuorassa jäykkyyshuomiossa tapahtuneet muutokset eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkittäviä. Perinteisen sekoitustavan koekappaleiden tuloksissa esiintynyt epätasaisuus voi johtua myös rinnakkaisnäytteiden vähäisestä määrästä, joka heikentää tulosten luotettavuutta. Tämän koeosuuden testausasetelmaan olisi kannattanut ottaa mukaan myös sekoitustapa, jossa elvytettiin lisätään rouheen joukkoon ennen uusiomassan sekoittamista. Näin olisi saatu lisätietoa näiden kahden vertailtavan sekoitustavan mahdollisista eroista.

6.3.3 Elvyttimien ja sekoitustapojen vaikutus uusiomassan ja -päällysteen ominaisuuksiin

AB16 RC40 -massojen avulla vertailtiin eri elvyttimien ja sekoitustapojen vaikutuksia uusiomassojen ja niistä tiivistettyjen koekappaleiden ominaisuuksiin. Asfalttimassat olivat käytettyä elvytintä lukuun ottamatta koostumukseltaan samanlaisia. Koekappaleita tiivistettäessä havaittiin sama ilmiö kuin AB8 RC40 -massojen tiivistyksessä: Massat, joissa elvytettiin lisätään suoraan rouheen joukkoon, tiivistyivät paremmin kuin perinteisen sekoitustavan massat. Koekappaleiden ultraäänen läpikulku-aika tutkittiin vuorokausi tiivistyksen jälkeen. Ultraäänimenetelmällä ei havaittu eroavaisuuksia eri elvyttimien välillä.

Koekappaleiden tyhjätilojen hajonta oli pientä lukuun ottamatta perinteisen sekoitustavan massoja. Tutkimustuloksille tehtiin tarvittavat tyhjätilakorjaukset (liite O). Koekappaleiden halkaisuvetolujuudet määritettiin 20 °C lämpötilassa. Tulokset korjattiin vastamaan 10 °C lämpötilaa käyttäen koekohteen massojen tuloksista määritettyä korjauskerrointa 1,9 (liite N). Koekappaleiden halkaisuvetolujuuskokeiden tyhjätilan ja lämpötilan suhteen korjatut tulokset on esitetty kuvassa 41. Koekappaleiden halkaisuvetolujuuskokeiden tulokset olivat verrattain tasaisia. Biofluksilla elvytettyjen massojen lujuudet olivat muita massoja hieman suuremmat. Tuloksista erottuvat V15 1kk ja N81 RH -massat, joiden pienemmät lujuudet selittyvät hieman suuremmilla sideainepitoisuuksilla verrattuina muihin samalla elvyttimellä valmistettuihin massoihin. Referenssimassan lujuus oli odotettua alhaisempi. Referenssimassa valmistettiin käyttäen yhtä pehmeämpää lisäsideainetta (tunkeuma noin 150). Asfalttiasemalla valmistettu koekohteen referenssimassa valmistettiin käyttäen 70/100 -bitumin lisäksi elvyttimenä pehmeämpää bitumilaatua. Sideaineiden seoksen tunkeuman pitäisi kuitenkin olla samanlainen, joten referenssimassan pehmeydelle ei löydetty suoraa selitystä. On mahdollista, että laboratoriossa sekoitetussa referenssimassassa ei jostain syystä ole tapahtunut yhtä hyvää sekoittumista vanhan ja uuden sideaineen välillä kuin asfalttiasemalla.



Kuva 41. AB16 RC40 -koekappaleiden tyhjätilakorjatut halkaisuvetolujuudet 10 °C:ssa.

Koekappaleiden lujuudet kasvoivat 1–28 vuorokauden aikana keskimäärin 10–20 %. Neljällä massalla kehitys ei ollut tilastollisesti merkitsevää: Referenssi, V15 RH, V15 1kk ja N81 RH. Lujuuskehitys on suunnilleen samansuuruista kuin Pasasen (2009)

tutkimuksessa pienemmällä biofluksipitoisuudella. Elvyttimen lisääminen suoraan asfalttirouheeseen alensi koekappaleiden keskimääräistä halkaisuvetolujuutta 4–13 %. Esivaikutusajan pidentämisellä ei ollut merkittävää lisävaikutusta. Vertailu suoritettiin 28 vuorokauden ikäisille koekappaleille, ja tulokset on esitetty taulukossa 39.

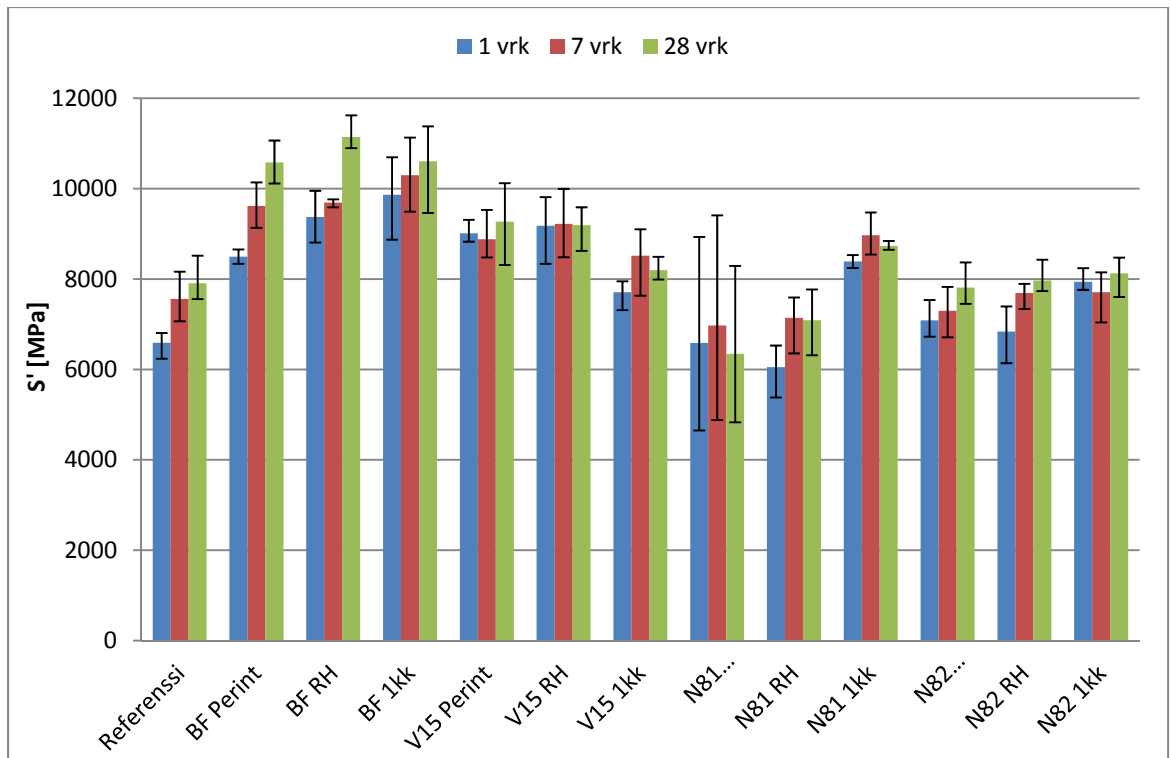
Taulukko 39. Eri sekoitustapojen väliset erot halkaisuvetolujuuksissa 28 vuorokauden ikäisillä koekappaleilla.

Elvytin	Ero sekoitustapojen välillä [%]		
	Perint vs RH	Perint vs 1 kk	RH vs 1kk
Biofluksi	-3,8	-7,9	-4,2
V1500	-10,7	-20,7*	-11,1
Nytex 810	-23,7*	+3,5	+35,6*
Nytex 820	-12,9	-13,0	-0,1

*Suuri ero johtuu sideainepitoisuuksien vaihtelusta.

Koekappaleiden epäsuoran jäykkyysmoduulin tyhjätilan suhteen korjatut tulokset on esitetty kuvassa 42. Epäsuoran jäykkyysmoduulin arvot olivat hyvin tasaisia ja samansuuntaisia kuin halkaisuvetolujuudet. Biofluksilla elvytettyjen massojen jäykkyydet olivat suurimmat. Jäykkyysmoduulin kehitys ajan myötä on tilastollisesti merkittävää massoilla BF Perint, BF RH ja referenssi. Sekoitustavalla tai esivaikutusajalla ei ollut tilastollisesti merkittävää vaikutusta koekappaleiden jäykkyyteen.

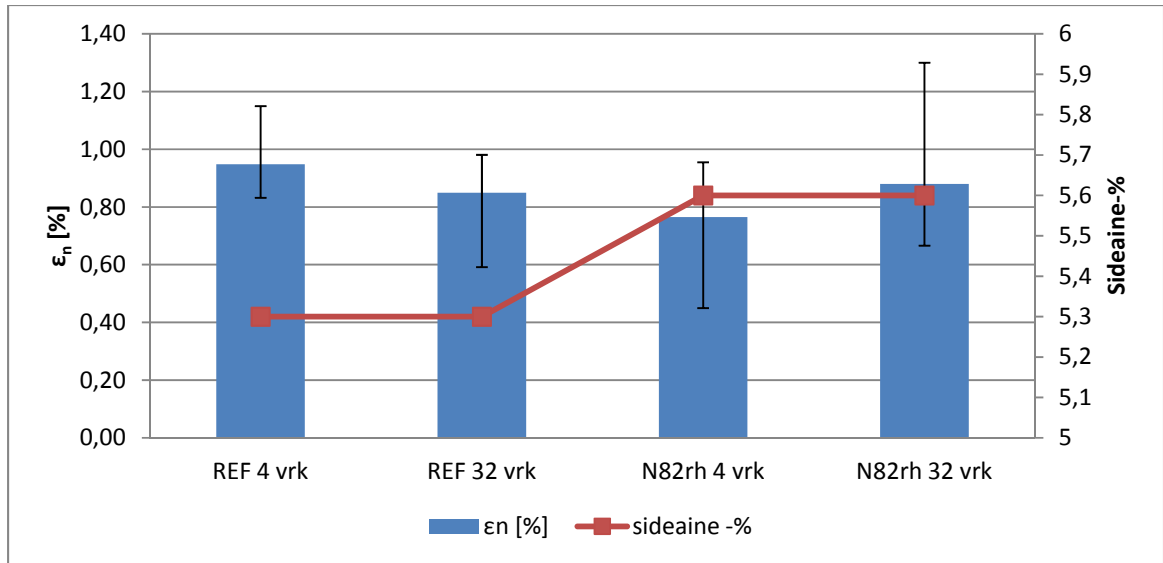
Epäsuoran jäykkyysmoduulin kehityksen epätasaisuus ajan suhteen sekä tulosten vaihteleva hajonta voivat johtua menetelmästä ja koekappaleen asennon vaihtelusta. Koesarja koostui kolmesta rinnakkaisnäytteestä, joiden jäykkyysmoduulit määritettiin 1, 7 ja 28 vuorokautta massan tiivistyksen jälkeen. Yksittäisen koekappaleen tulos lasketaan keskiarvona kahdesta rinnakkaismäärityksestä, joiden välissä koekappaleita käännetään 90°. Koekappaleisiin piirrettiin toisiansa vasten kohtisuorat halkaisijaviivat osoittamaan koestusasentoa. Näistä apuviivoista huolimatta koekappale on voinut koesarjan eri vaiheissa olla kehikossa hieman eri asennossa. Tällä voi olla vaikutusta tuloksiin. N81 Perint -massan huomattavan suuri hajonta johtui siitä, että rinnakkaisnäytteet olivat keskenään hyvin erilaisia. Rinnakkaisnäytteiden vaihtelevat ominaisuudet voivat johtua esimerkiksi kiviaineksen lajittumisesta koekappaleita valmistettaessa.



Kuva 42. AB16 RC40 -koekappaleiden tyhjätilakorjatut epäsuorat jäykkyyssmoduulit 10 °C:ssa.

Koekappaleiden lujuus siis kasvoi, mutta jäykkyys pysyi samalla tasolla 1 - 28 vuorokauden tutkimusten aikana. Tämä voi olla merkki päällysteen väsymiskestävyydestä. Koesarjassa käytettiin vain kolmea rinnakkaisnäytettä, joten tilastollisesti vahvoja päätelmiä ei voida tehdä. Elvyttämisen on arvioitu parantavan päällysteen väsymiskestävyyttä pelkällä pehmeämmällä lisäsideaineella valmistettuun uusiopäällysteeseen verrattuna (Tyllgren 2010).

Referenssimassan ja N82 RH -massan deformaatiokestävyyttä tutkittiin jaksollisella virumiskokeella 40 °C lämpötilassa. Kolmen rinnakkaismäärityksen keskiarvot ja massojen sideainepitoisuudet on esitetty kuvassa 43. Tutkimuksissa käytettiin halkaisijaltaan 150 mm kiertotiivistettyjä koekappaleita. Kokeet suoritettiin 4 ja 32 vuorokautta tiivistyksen jälkeen. Koekappaleiden tyhjätilojen keskihajonta oli vain 0,28, joten tuloksille ei tarvinnut tehdä tyhjätilakorjausta. Molemmat massat kuuluivat asfalttinormien asettamaan parhaaseen deformaatioluokkaan $\epsilon_{n2,0}$. Massan N82 RH sideainepitoisuus oli 0,3 % -yksikköä korkeampi, joten elvytetyn massan deformaatioherkkyys oli suurempi kuin referenssimassan. Sideainepitoisuuksia enemmän tuloksiin vaikutti kuitenkin tiivistystapa. Tiivistystavan vaikutuksesta massan deformaatiokestävyyteen keskustellaan enemmän luvussa 6.4.1.



Kuva 43. Jaksollisella virumiskokeella määritetty AB16 RC40 -referenssimassan ja N82 RH -massan deformaatiokestävyys 40 °C:ssa. Koekappaleet oli valmistettu kiertotiivistimellä.

Erot eri elvyttimien välillä olivat tehtyjen kokeiden perusteella pieniä. Nytex 810 -massojen epätasainen käyttäytyminen ja suuret hajonnat voivat johtua massan sekoituksessa tai koekappaleiden valmistuksessa tapahtuneista virheistä. Elvyttimenä V1500 toimi vastaavalla tavalla kuin öljymäiset elvyttimet, vaikka onkin luonteeltaan hyvin erilainen. Sekoitustapojen välillä ei havaittu suuria eroja, mutta elvyttimen lisääminen suoraan asfalttiruohon joukkoon paransi massojen työstettävyyttä ja alensi lujuutta.

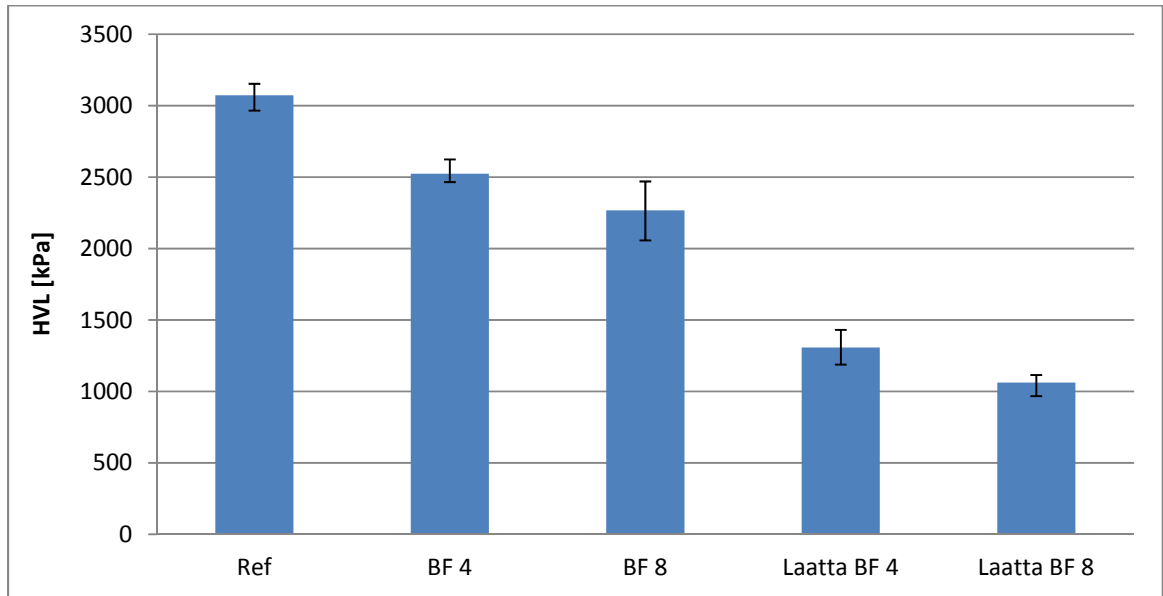
6.4 Kenttäkokeet

6.4.1 Koekohteen uusiomassojen tutkimukset

Koekohteen AB 16 RC40 uusiomassojen HVL -kokeissa jouduttiin käyttämään kahta eri lämpötilaa. Pienemmän biofluksipitoisuuden BF4 -massasta tiivistettyjä koekappaleita testattiin sekä 10 että 20 °C lämpötilassa, joten näiden tulosten perusteella muodostettiin lämpötilakorjauskerroin (liite N), jolla korjattiin kaikki koetulokset vastaamaan 10 °C koelämpötilaa. Lämpötilan suhteen korjatut tulokset on esitetty kuvassa 44. HVL -kokeiden tuloksille ei tehty tyhjätilakorjausta. Tyhjätilojen keskihajonnat samalla tiivistystavalla valmistetuilla koekappaleilla olivat niin pieniä, ettei tyhjätilakorjauksella olisi ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin. Laboratoriossa kiertotiivistetyt koekappaleet koestettiin 7 vuorokautta tiivistyksen jälkeen. Laatasta poratut näytteet koestettiin 10 viikkoa tiivistyksen jälkeen, joten lujuudella oli aikaa kehittyä.

Koekohteen massoista valmistettiin koekappaleita kiertotiivistimellä laboratoriossa sekä jyrätiivistetyistä laatoista poraamalla. Kiertotiivistettyjen koekappaleiden tyhjätilat olivat pienemmät kuin laatoista poratuilla näytteillä. Suurempi tyhjätila kasvattaa massan

deformaatioherkkyyttä. Tyhjätiloista huomattiin myös ero massojen välisessä tiivistettävyydessä: elvytetyt massat tiivistyivät referenssimassaa paremmin, ja BF8 tiivistyi paremmin kuin BF4.

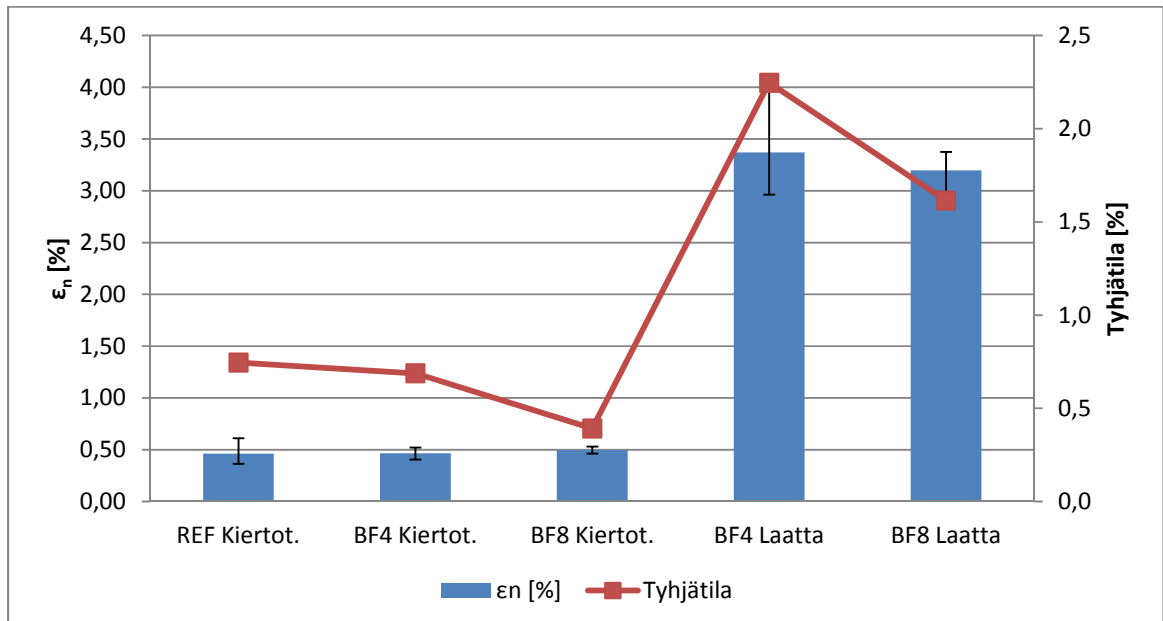


Kuva 44. Koekohteen AB16 RC40 -koekappaleiden halkaisuvetolujuudet 10 °C:ssa. ”Laatta” -koekappaleet on valmistettu jyrällä tiivistetystä asfalttilaatasta, muut koekappaleet on valmistettu kiertotiivistimellä.

Kiertotiivistettyjen BF4 -koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvo oli 18 % pienempi kuin referenssimassan. BF8- ja referenssimassan välinen vastaava ero oli 26 %. Biofluksin määrän kaksinkertaistamisen vaikutus halkaisuvetolujuuteen oli verrattain pieni: BF8 -koekappaleiden HVL oli vain 10 % pienempi kuin BF4 -koekappaleiden. Tiivistystapojen välinen ero näkyi halkaisuvetolujuuksissa, ja laatoista porattujen koekappaleiden lujuudet olivat odotetusti alhaisemmat. Laatoista porattujen koekappaleiden tyhjätilat olivat suuremmat. Porattujen BF8 koekappaleiden HVL oli 18 % pienempi kuin BF4 -koekappaleiden.

Massojen deformaatiokestävyyttä arvioitiin jaksollisella virumiskokeella. Elvytinpitoisuuden nostamisella ei tulosten perusteella ollut merkittävää vaikutusta massan deformaatiokestävyyteen. Tiivistystapojen välinen ero oli deformaatiokestävyyden osalta huomattava: Kiertotiivistetyt koekappaleet antoivat erittäin hyviä tuloksia, ja kaikki massat täyttivät asfalttinormien vaatimuksen parhaasta deformaatiokestävyytsluokasta. Jyrätiivistetyistä laatoista porattujen koekappaleiden perusteella massat kuuluvat deformaatiokestävyyden 2. luokkaan ($\epsilon_n \leq 3,5 \%$). Tulokset on esitetty kuvassa 45. Kiertotiivistettyjen koekappaleiden tuloksista ei kuitenkaan voi tehdä luotettavia päätelmiä. Hiertävän liikkeen ansiosta kiviainesrakeet sulloutuvat kiertotiivistyksessä paremmin toistensa lomaan, jolloin syntyy paremmin deformaatiota vastustava rakenne. Tiivistystapoja vertailtaessa todettiin, että jyrätiivistys on lähempänä kentällä tapahtuvaa

tiivistymistä. Tulosten kannalta arvokasta lisäarvoa olisi tuonut referenssimassasta tiivistetty laatta ja siitä porattujen koekappaleiden koestaminen. Kyseisten tulosten avulla olisi voitu arvioida luotettavammin, onko elvyttämällä vaikutusta massan deformaatiokestävyyteen.



Kuva 45. Koekohteen AB16 RC40 koekappaleiden pysyvä muodonmuutos 40 °C:ssa. ”Laatta” -koekappaleet on valmistettu jyrällä tiivistetystä asfalttilaatasta.

6.4.2 Asfalttirouheen ulkosäilytys

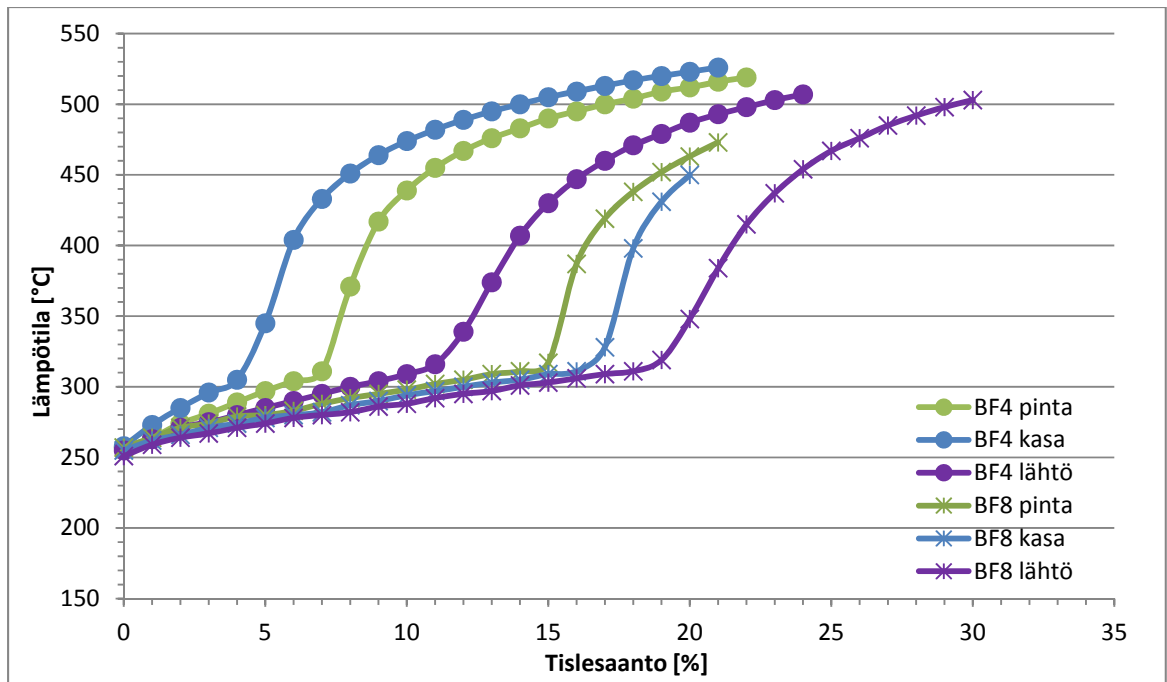
Viiden viikon ulkosäilytyksen aikana kasojen pinnat olivat silmämääräisesti tarkasteltuna kuivuneet ja vaalenneet, jolloin ne muistuttivat ulkonäöltään tavallista elvyttämätöntä rouhetta. Kasojen sisällä rouhe oli kostea ja varsinkin pienemmän fluksipitoisuuden kasassa oli nähtävillä kerrosraja muutaman senttimetrin syvyydessä kasan pinnasta. Kasojen säilytyspaikkojen havaittiin olleen olosuhteiltaan hieman epätasaiset: suuremmalla fluksimäärällä valmistettu rouhekasa oli osan päivästä varjossa, kun taas pienemmän fluksimäärän kasaan aurinko pääsi paistamaan koko päivän (kuva 46). Tämä on saattanut nopeuttaa biofluksin haihtumista kasan pinnalta.



Kuva 46. Eri biofluksipitoisuuksilla elvytettyjen varastokasojen säilytysolot olivat epätasaiset: BF8 -kasa oli osan päivästä varjossa.

Näytteiden oton yhteydessä havaittiin, että biofluksilla elvytetyn rouheen käsiteltävyys pysyi hyvänä varastoinnin aikana: varastokasoissa ei havaittu paakkuuntumista tai huomattavaa tiivistymistä tarkkailuajana. Tutkimuksissa ei myöskään havaittu öljyn erottumista, vaan elvytint oli imeytynyt asfalttirouheeseen. Tyllgren (2010) teki tutkiessaan vastaavat havainnot Nytex 820:lla elvytetystä asfalttirouheesta.

Elvyttimen poistumista varastokasoista tutkittiin varastokasoista otettujen näytteiden avulla. Simuloidulla jakotislauksella tutkittiin elvytintmäärän muutosta 5 viikon ulkosäilytyksen aikana. Tuloksista poistettiin virheellisenä pidetty alle 250 °C lämpötilassa tislautunut fraktio, jonka arveltiin johtuvan rouheeseen lämmityksen yhteydessä tarttuneesta raskaan polttoöljyn jäämistä. Lämmitysrummun öljypolttimeet oli sammutettu juuri ennen rouheen ajamista sen lävitse. Kuvassa 47 esitetyistä korjatuista tislauskäyristä nähdään rouhenäytteiden biofluksipitoisuuksien suhteelliset erot. Biofluksin osuus tislesaannosta voidaan lukea käyrän taitepisteestä hieman 300 °C lämpötilan yläpuolelta.

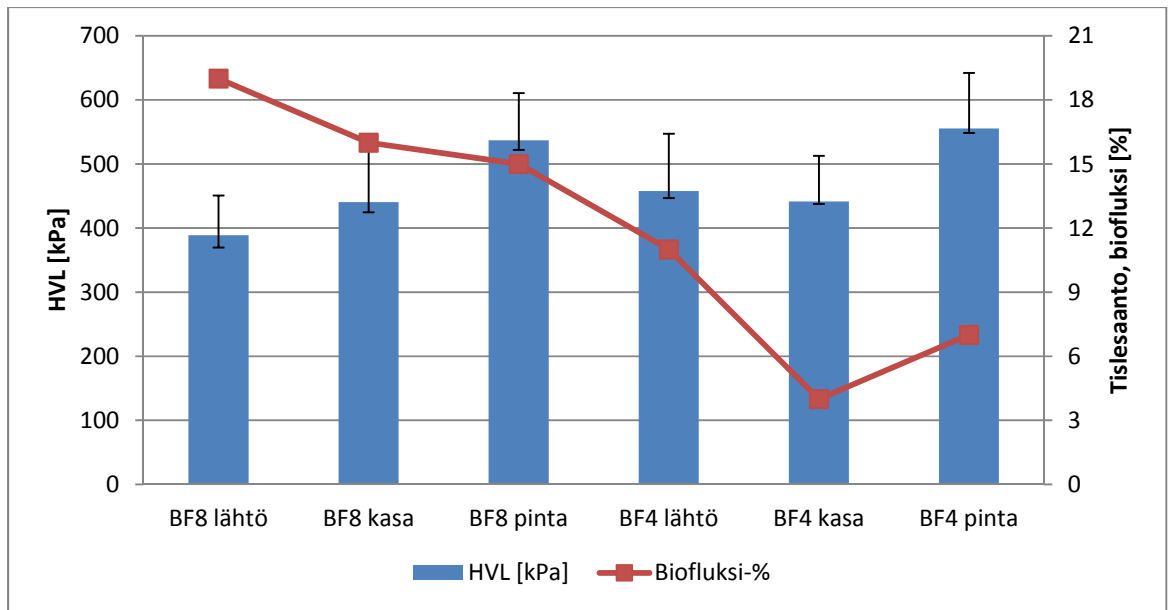


Kuva 47. RC100+elvytin seosten simuloidun jakotislauksen tulokset.

BF8 -varastokasan pinnasta haihtui vähemmän elvytintä verrattuna BF4 -kasan pintaan. Tämä todennäköisesti johtuu aiemmin mainituista epätasaisista säilytysoloista. BF8 -kasan pinnasta otetussa näytteessä oli 21 % ja kasan sisältä otetussa näytteessä 11 % vähemmän biofluksia kuin lähtötilanteessa. BF4 -kasan pinnasta biofluksia oli poistunut yhteensä 36 % lähtötilanteeseen verrattuna.

BF4 -kasan sisältä otetun näytteen tulos oli kuitenkin poikkeava, ja osoitti huomattavasti odotettua alemmaa biofluksipitoisuutta. Tämä tarkoittaisi, että kasan sisältä olisi poistunut enemmän biofluksia kuin kasan pinnalta, joten tulos arvioitiin virheelliseksi. Simuloituun jakotislaukseen käytettävän näytteen koko on erittäin pieni, jolloin näytteen epäedustavuuden mahdollisuus kasvaa.

Rouheista tiivistetyistä koekappaleista tutkittiin halkaisuvetolujuus 7 vuorokautta tiivistyksen jälkeen 20 °C lämpötilassa. Tulokset on esitetty kuvassa 48. Saman kuvaajan oikeanpuoleiselle y-akselille on piirretty simuloidulla jakotislauksella arvioitu suuntaa antava biofluksipitoisuus. BF4 kasa -näytteen tulosten epäloogisuus havaitaan myös halkaisuvetolujuuksissa: BF4 kasa -koekappaleiden lujuus poikkeaa HVL-tulosten yleisestä trendistä. Syynä odotettua alhaisempaan halkaisuvetolujuuteen voi olla näytteen lajittuneisuus. Koska molemmat kokeet antavat poikkeavan tuloksen, voidaan BF4 kasa -näyte arvioida epäedustavaksi. BF8 -rouheen tulos puolestaan oli odotettu: Kasan pinnalta otetusta rouheesta haihtui ja liukeni enemmän biofluksia kuin kasan sisältä, joten myös tiivistettyjen koekappaleiden lujuus kasvoi. Tuloksista voidaan nähdä, että ulkosäilytyksen myötä BF8 -pintänäyte lähestyy ominaisuuksiltaan BF4 -lähtötilannetta.



Kuva 48. Varastokasan RC100 koekappaleiden halkaisuvetolujuudet 20 °C:ssa.

Tutkimusten perusteella voidaan sanoa, että elvytetyn asfalttirouheen varastoiminen ulkotiloissa on mahdollista. Pitkää varastointia varten elvytintä kannattaa lisätä rouheeseen hieman enemmän, jotta haihtumisen ja liukenemisen myötä muuttuva elvytinpitoisuus olisi uusiomassaa valmistettaessa riittävä. Lisättävän elvyttimen määrä on arvioitava tapauskohtaisesti säilytysolojen ja -ajan mukaan.

7 Yhteenveto, päätelmät ja suositukset

Suomi on asfalttirouheen kierrättämisen edelläkävijä. Uusiopäällysteiden käyttö on viime vuosina lisääntynyt, ja kasvun ennustetaan jatkuvan voimakkaana taloudellisten ja ympäristöllisten syiden siivittämänä. Uusiopäällysteet on tyypillisesti valmistettu käyttäen pehmeämpää lisäsideainetta korjaamaan asfalttirouheen vanhentuneen sideaineen kovuutta. Asfalttirouheen kovettuneen sideaineen pehmittämiseen voidaan käyttää myös öljymäisiä elvyttimiä, joiden tavoitteena on palauttaa vanhentuneen sideaineen ominaisuudet entiselle tai lähes entiselle tasolle.

Tämän työn ensisijaisena tavoitteena oli selvittää tutkimukseen valittujen neljän tuotteen käyttömahdollisuuksia asfalttirouheen elvyttiminä. Tuotteet olivat uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biofluksi, korkeajalosteiset prosessiöljyt Nytex 810 ja Nytex 820 sekä viskositeettiluokiteltu bitumi V1500. Tuotteiden soveltuvuutta elvyttimiksi selvitettiin tutkimalla niiden vaikutuksia RAP-sideaineen sekä uusiopäällysteen (RC 40) ominaisuuksiin. Tämän tutkimuksen toisena tavoitteena oli selvittää, onko eduksi lisätä elvytin suoraan asfalttirouheen joukkoon, jotta elvytin pääsee vaikuttamaan suoraan kovettuneeseen sideaineeseen ennen uusiomassan sekoittamista. Lisäksi tällä menettelyllä voidaan yksinkertaistaa sideaineiden käsittelyä asfalttiasemilla. Tavanomaisella sekoitustavalla elvytin on lisätty uusiomassaan lisäsideaineen joukossa, mutta tämän menettelyn vaarana on sideainesekoitteen epähomogeenisuus lyhyen sekoitusajan vuoksi.

Elvytettyjen uusiopäällysteiden valmistuksessa huolen aiheena ovat olleet elvyttimien sisältämät karsinogeeniset polyaromaattiset hiilivedyt sekä lisääntyneet haihtuvien hiilivetyjen päästöt. Uusiopäällysteiden yleistymisen ja ympäristöarvojen korostuminen ovatkin kannustaneet uusien ympäristöystävällisempien elvyttimien tutkimista. Biofluksin etuja ovat sen raaka-aineiden uusiutuvuus ja yksinkertainen hiilivetyrakenne, joten se ei sisällä PAH-yhdisteitä. Nytex -öljyt ovat korkeasti jalostettuja nafteenisiä prosessiöljyjä, jotka on hydraamalla puhdistettu PAH-yhdisteistä.

Kirjallisuusselvityksen perusteella öljymäisten elvyttimien käytöstä on vain vähän puolueetonta, hyvin dokumentoitua tutkimustietoa. Elvyttimien vaikutuksia sideaineiden ominaisuuksiin on tutkittu laajemmin kuin vaikutuksia uusiopäällysteiden ominaisuuksiin. Kirjallisuuden perusteella elvyttimen tärkeimmät ominaisuudet ovat: riittävän alhainen viskositeetti, hyvä sekoittumiskyky vanhan sideaineen kanssa, sopiva kemiallinen koostumus stabiiliin seoksen luomiseksi sekä turvallisuuteen liittyvät seikat: ei haihtuvia ainesosia ja korkea leimahduspiste.

Lisäaineiden vaikutuksia vanhan sideaineen ominaisuuksiin tutkittiin valmistamalla elvytetyt sideainenäytteet asfalttirouheesta eristetystä vanhasta bitumista. Sideainenäytteistä tutkittiin perinteisten empiiristen suureiden lisäksi reologia ominaisuuksia. Elvyttimien vaikutuksia uusiopäällysteiden ominaisuuksiin tutkittiin

sekoittamalla laboratoriossa uusiomassoja 40 % asfalttirouhepitoisuudella käyttäen erilaisia sekoitustapoja ja esivaikutusaikoja. Uusiomassoista tiivistettiin koekappaleita, joiden avulla tutkittiin elvytetyn uusiomassan lujuutta, jäykkyyttä ja deformaatiokestävyyttä. Lisäksi tutkittiin uusiomassassa tapahtuvaa sideaineiden välistä sekoittumista. Tarvittavat lisäainemäärät laskettiin viskositeettien perusteella siten, että lopputuotteen sideaineen tunkeumatavoite oli 85 l/10 mm.

Laboratorio-osuudessa käytettyjen sideainekokeiden tulosten perusteella tutkimukseen mukaan otettujen tuotteiden voidaan todeta toimivan elvyttiminä: tuotteet palauttivat RAP-sideaineen ominaisuudet tavoitellulle tasolle tai jopa paransivat niitä. Elvytetyt sideaineseokset olivat tutkimustulosten perusteella kylmäominaisuuksiltaan selvästi parempia kuin referenssideaine 70/100. Lisäksi biofluksi, Nytex 810 ja 820 paransivat sideaineen kykyä vastustaa deformaatiota verrattuna tuoreeseen 70/100 -bitumiin. V1500:lla elvytetty sideaine osoitti hieman heikompaa deformaatiokestävyyttä kuin 70/100.

Elvytettyjen sideaineiden deformaatiokestävyyden ja kylmäominaisuuksien parantuminen voidaan selittää pienemmällä lämpötilaherkkyydellä. Asfalttirouheen sisältämä vanhentunut sideaine on vanhentuessaan menettänyt kevyimpiä komponenttejaan, jolloin sen herkkyys lämpötilan muutoksille on vähentynyt. Vaikka elvyttämisen myötä tapahtuva kevyiden komponenttien määrän lisääntyminen kasvattaa sideaineen lämpötilaherkkyyttä, laboratoriokokeiden tulosten perusteella viskositeetiltaan alhaisilla öljymäisillä lisäaineilla elvytetty sideaine oli epäherkempää lämpötilan muutoksille kuin tuore 70/100 bitumi. Tästä syystä sideaineilla saavutettiin hyvä viskoelastinen käyttäytyminen korkeammissa lämpötiloissa. Elvyttimet alensivat RAP-sideaineen jäykkyyttä jolloin sideaineen ominaisuudet palautuivat myös kylmissä lämpötiloissa. Jähmettymispisteeltään alhaiset öljymäiset elvyttimet pitivät yllä sideaineen joustavuutta, joten kokeissa oli mahdollista saavuttaa kylmempää lämpötiloja ilman sideaineen murtumista.

Kaikki suoritettujen deformaatiokestävyyden ja kylmäominaisuuksien tutkimukset antoivat saman keskinäisen järjestyksen elvyttimille. Biofluksilla elvyttäminen paransi sideaineen ominaisuuksia eniten ja osoitti samalla pienintä lämpötilaherkkyuden kasvua. Biofluksi oli myös elvyttimistä ohuinta ja sitä lisättiin suhteessa sideaineeseen vähiten. Nytex -öljyillä saavutetut sideaineen ominaisuudet asettuivat myös paremmuusjärjestykseen suhteessa lisättyyn elvytinmäärään. Tämä herätti jatkotutkimusten kannalta mielenkiintoisen kysymyksen, kumpi on määräävä tekijä: elvyttimen laatu vai määrä? RAP-sideaine on erittäin jäykkää ja sen lämpötilaherkkyys on pieni. Siksi se on myös deformaatiota vastustavaa. Kirjallisuusselvityksen perusteella näiden ominaisuuksien voidaan olettaa osittain ”periytyvän” elvytetyille sideaineille. Tämän väitteen perusteella on mahdollista, että lisättävän elvyttimen määrän ollessa mahdollisimman pieni suhteessa vanhan sideaineen määrään saavutetaan parempia tuloksia. Tämä tarkoittaisi myös sitä, että elvyttimien kannattaisi olla viskositeetiltaan mahdollisimman alhaisia. Päinvastoin yleisesti

on kehoitettu välttämään viskositeetiltaan huomattavan alhaisia elvyttimiä, koska niiden sekoittumisen sideaineen kanssa on arvioitu olevan huono. Tähän kysymykseen vastaaminen vaatii lisätutkimuksia.

Ohutlevykromatografiaan perustuvalla SARA-fraktioiden määrittämisellä havaittiin tyypillinen sideaineen koostumuksessa vanhenemisen myötä tapahtuva muutos: RAP-sideaineen aromaattisten hiilivetyjen osuus oli huomattavasti pienempi ja hartsien osuus suurempi kuin tuoreella 70/100 -bitumilla. Luonteeltaan aromaattisella V1500:lla elvytetyn sideaineen koostumuksessa oli havaittavissa selkeä nousu aromaattisten hiilivetyjen osuudessa. Öljymäiset elvyttimet koostuivat pääasiassa tyydyttyneistä hiilivedyistä ja SARA-fraktioissa esiintyikin pientä nousua tyydyttyneiden hiilivetyjen fraktiossa. Jotta elvytin varsinaisesti korjaisi sideaineen kemiallisessa koostumuksessa vanhentumisen myötä tapahtuneita muutoksia, elvyttimen tulisi sisältää sopivassa suhteessa kaikkia bitumiin kuuluvia hiilivetyjä. Toisaalta SARA-fraktioita tarkasteltaessa on muistettava, että kyse on keinotekoisesta luokittelusta. Bitumi on koostumukseltaan erittäin kompleksinen, eikä sen sisältämiä hiilivetyjä ole mahdollista luokitella yksiselitteisesti. Fraktiot ovat osittain päällekkäisiä. Prosessoitujen öljyjen käyttäytyminen SARA-fraktioiden määrittämisessä on epävarmaa, eivätkä tulokset välttämättä anna todellista kuvaa elvytetyn sideaineen hiilivetyjen koostumuksesta. Näiden tietojen perusteella ei voida sanoa, että elvyttimet palauttaisivat vanhan sideaineen kemiallista koostumusta. Elvyttimien toiminta perustuu ennemminkin niiden ohentavaan vaikutukseen. Kemiallisen vaikutuksen selvittämiseen on etsittävä uusia luotettavampia menetelmiä.

Elvyttimien käyttäytymistä asfalttirouheessa tutkittiin valmistamalla koekappaleita lämmitetystä asfalttirouheesta, johon lisättiin elvytintä. Elvyttimet alensivat koekappaleiden jäykkyyttä ja lujuutta verrattuina ilman elvytintä valmistettuihin koekappaleisiin. Elvyttimet vaikuttivat siis toimivan ja imeytyvän asfalttirouheen vanhaan sideaineeseen nopeasti sekoittamisen jälkeen. Myös uusiomassan sideaineiden komponenttien välillä todettiin tapahtuvan hyvä sekoittuminen.

Elvyttämisen todettiin parantavan uusiomassojen työstettävyyttä ja alentavan päällysteen lujuutta pelkällä lisäsideaineella valmistettuun uusiopäällysteeseen verrattuna. Eri elvyttimillä valmistettujen uusiomassojen ja niistä tiivistettyjen koekappaleiden tutkimuksissa ominaisuuksissa ei ollut suuria eroja. Tutkimusten perusteella elvyttimillä ei todettu olevan negatiivista vaikutusta päällysteen ominaisuuksiin. Koekappaleiden lujuudessa tapahtui merkittävää kehitystä kuukauden tutkimusjakson aikana. Koekappaleiden jäykkyys sen sijaan ei osoittanut selvää kasvua. Laboratoriossa sekoitettujen massojen deformaatiokestävyyden tutkimukset suoritettiin kiertotiivistimellä valmistetuille koekappaleille. Kiertotiivistyksen todettiin sullovan kiviainesrakeet paremmin toistensa lomaan, ja siksi tulokset antoivat epärealistisen kuvan massojen deformaatiokestävyydestä. Koekohteen biofluksilla elvytetyistä massoista valmistettiin koekappaleita myös jyrällä tiivistetyistä laatoista, joiden ominaisuudet vastaavat paremmin kenttäolosuhteissa

tiivistettyjä päällysteitä. Koekohteen uusiomassat kuuluivat asfalttinormien asettamaan toiseksi parhaaseen $\epsilon_{n3,5}$ -deformaatioluokkaan.

Eri sekoitustapoja vertailtaessa todettiin, että elvyttimen lisääminen suoraan asfalttirouheeseen joukkoon parantaa massojen tiivistyvyyttä ja alentaa hieman enemmän päällysteen lujuuutta ja jäykkyyttä verrattuna perinteisellä sekoitustavalla valmistettuihin elvytettyihin uusiomassoihin. Esisäilytysajan kasvattamisella ei kuitenkaan saavutettu merkittävää lisäetua.

Pidemmän esisäilytysajan järjestämisen mahdollisuuksia tutkittiin kokeilemalla elvytetyn asfalttirouheen ulkovarastointia. Elvytetyn asfalttirouheen ulkosäilytyksen todettiin näiden tutkimustulosten valossa olevan mahdollista. Elvytin olisi mahdollista lisätä rouheeseen etukäteen esimerkiksi murskauksen yhteydessä. Halutun elvyttävän vaikutuksen saavuttamiseksi rouheeseen tulisi lisätä elvytintä hieman laskennallista määrää enemmän, sillä elvytintä haihtuu ja liukenee erityisesti varastokasan pinnalta. Tarvittava elvyttimen määrän lisäys riippuu säilytysoloista, varastoitavan rouheen kiertoajasta ja kasan koosta. Vaikka elvytetyn rouheen säilyttäminen asfalttiasemalla vaikuttaisi olevan mahdollista, on säilytyksen käytännöllisyys ja saavutettava hyöty arvioitava erikseen.

Loppuyhteenvedon voidaan todeta, että tutkimusten perusteella kaikki neljä tutkimukseen valittua lisäainetta ovat käyttökelpoisia asfalttirouheen elvyttimiä. Elvyttimet palauttivat vanhentuneen sideaineen ominaisuudet 70/100-bitumin tasolle, ja öljymäiset elvyttimet jopa parantavat sideaineen deformaatiokestävyyttä ja kylmäominaisuuksia. Elvyttäminen alentaa uusiopäällysteen liiallista lujuuutta ja jäykkyyttä palauttamalla asfalttirouheen kovettuneen sideaineen ominaisuudet. Elvyttimen lisääminen suoraan asfalttirouheeseen parantaa massan työstettävyyttä ja helpottaa sideaineiden käsittelyä asfalttiasemalla.

Tässä diplomityössä suoritettu laaja-alainen laboratorio-osuus selvitti elvyttimien vaikutuksista sideaineen ja uusiopäällysteiden ominaisuuksiin. Laaja-alaisuuden vuoksi tutkimuksessa ei päästy syventymään yksityiskohtiin, vaan tutkimustulokset tarjoavat ennemminkin laajan yleiskuvan ja hyvän pohja-aineiston jatkotutkimuksia varten. Laajan tutkimusohjelman vuoksi myös rinnakkaisnäytteiden määrä jäi vähäiseksi, mikä aiheutti epävarmuutta tutkimustulosten tulkinnassa.

Tutkimuksia olisi suositeltavaa jatkaa pidemmällä aikavälillä elvytetyn uusiopäällysteen ominaisuuksien kehittymisen seuraamiseksi. Tielaboratorioon jääneillä koekappaleilla on mahdollista jatkaa esimerkiksi halkaisuvetolujuuksien koesarjaa valitun tekeytymisajan kuluttua. Myös toteutettu koekohde tarjoaa pitkäaikaisen seurantamahdollisuuden. Tosin kadun vähäinen liikennemäärä rajoittaa koekohteen tarjoamaa tietoa päällysteen käyttäytymisestä. Siksi olisikin suositeltavaa toteuttaa toinen koekohde vilkkaammin liikennöidylle osuudelle elvytetyn uusiopäällysteen todellisten toiminnallisten ominaisuuksien selvittämiseksi. Elvytettyjen uusiomassojen tutkittuja ominaisuuksia olisi ollut mielenkiintoista vertailla vastaavaan uusista materiaaleista sekoitettuun

asfalttimassaan. Suositeltavaa olisi myös testata elvyttimien vaikutus uusiomassojen vedenkestävyyteen.

Laboratoriossa sekoitettuihin uusiomassoihin lisätyn elvyttimen määrä oli laskennallinen. Viskositeetilaskelmien lähtökohtana oli saavuttaa kaikilla sideaineyhdistelmillä sama lopputuotteen tunkeuma. Koekohteen uusiomassojen perusteella todettiin, että elvytinpitoisuuden kaksinkertaistaminen ei heikennä päällysteen ominaisuuksia kriittisesti. Haluttujen ominaisuuksien kannalta optimaalisen elvytinmäärän etsimistä on mahdollista jatkaa esimerkiksi tutkimalla eri elvytinpitoisuuksilla valmistettuja asfalttirouhekoekappaleita

Sideainekokeiden jatkotutkimusten osalta erityisen kiinnostavia ja tärkeitä ovat vanhentamistutkimukset, jotka rajautuivat ulos tästä työstä. Öljymäisillä lisäaineilla elvytettyjen sideaineiden ominaisuuksien muutokset vanhenemisen myötä vaikuttavat merkittävästi päällysteen käyttöikäen. Jos elvyttimillä on pitkäkestoisia vaikutuksia sideaineen ominaisuuksiin ja erityisesti sideaineen vanhenemiseen, miten ne vaikuttavat päällysteen elinkaareen? Uusiopäällysteiden käytön lisääntyessä on otettava huomioon myös uudelleenkierrättämisen mahdollisuus. Tämä nostaakin esiin kysymyksen, miten elvytetty uusiopäällyste käyttäytyy, kun se kierrätetään uudelleen asfalttirouheena? Jatkotutkimusten yhteydessä on syytä tutkia tarkemmin myös jo tässä tutkimuksessa esiin nousseita hyviä ominaisuuksia kuten hyvää käyttäytymistä kylmissä lämpötiloissa.

Lähteet

- BELL, C.A., 1989. Summary Report on Aging of Asphalt-Aggregate Systems. Washington DC: Strategic Highway Research Program.
- BLOMBERG, T., 1990. Bitumit. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. ISBN 951-676-488-6.
- BLOMBERG, T., ESKOLA, K., FORSTÉN, L., JÄMSÄ, H., TUOMINEN, J. & VALTONEN, J. 2011. Återvinning. NVF 33 Huvudämne 2011: Finlands Statusrapport. Helsinki: Pohjoismaiden tie- ja liikennefoorumi.
- BRANTHAVER, J.F., PETERSEN, J.C., ROBERTSON, R.E., DUVALL, J.J., KIM, S.S., HARNSBERGER, P.M., MILL, T., ENSLEY, E.K., BARBOUR, F.A. & SCHARBON, J.F. 1993. Binder Characterization and evaluation. Volume 2: Chemistry. Washington DC, USA: Strategic Highway Research Program. ISBN 0-309-05620-9.
- CELAURO, C., CELAURO, B. & BOSCAINO, G. 2010. Production of Innovative, Recycled and High-Performance Asphalt for Road Pavements. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 54:6. S. 337-347. ISSN 0921-3449. DOI 10.1016.
- CHAFFIN, J.M., LIU, M., DAVISON, R.R., GLOVER, C.J. & BULLIN, J.A. 1997. Supercritical Fractions as Asphalt Recycling Agents and Preliminary Aging Studies on Recycled Asphalts. Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol. 36:3. S. 656-666. ISSN 0888-5885. DOI 10.1021.
- CHEN, J., HUANG, C., CHU, P. & LIN, K., 2007. Engineering Characterization of Recycled Asphalt Concrete and Aged Bitumen Mixed Recycling Agent. Journal of Materials Science. Vol. 42:23. S. 9867-9876. ISSN 0022-2461.
- CHRISTENSEN JR, D.W., PELLINEN, T. & BONAQUIST, R.F. 2003. Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 72. S. 97-121. ISSN 0270-2932.
- DENEUVILLERS, C., 2008. Vegeflux: Bio Products on Roads. Esitelmä. San Jose de Cabo, Mexico: Annual Meeting of Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), February 19–23, 2008.
- DRAGON, I., MALCHEREK, T. & BLASL, A. 2011. Einfluss des Recyclingasphaltanteils sowie des verwendeten Zugabebindemittels auf die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltbefestigungen. Staße und Autobahn. Vol. 62:4. S. 229-237. ISSN: 0039-2162.
- DUNN, L. & CROSS, S. 2001. Basic Asphalt Recycling Manual. USA: Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA).

- HARRIGAN, T., LEAHY, R.B. & YOUTCHEFF, J.S. 1994. The Superpave Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices. Washington DC, USA: Strategic Highway Research Program. ISBN 0-309-05764-7.
- HEIKKILÄ, J. 1989. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma, ASTO 1987-1992. Päällysteen plastiset deformaatiot. Väliraportti TR4/1. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, julkaisu no 713. Espoo. 24 s.
- HRDLICKA, G.M., TANDON, V., PROZZI J., SMIT, A. & YILDRIM, Y. 2007. Evaluation of Binder Tests for Identifying Rutting and Cracking Potential of Modified Asphalt Binders. El Paso, Texas: Center for Transportation Infrastructure Systems, University of Texas.
- HUANG, Y.H. 2011. Pavement Analysis and Design. 2.th ed. USA: Pearson Education Inc. ISBN 0-13-272610-6.
- KANDHAL, P.S. & MALLICK, R.B. 1997. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments, Participant's Reference Book. Washington DC, USA: Federal Highway Administration.
- KANDHAL, P.S., SHRINDHAR, S.R., WATSON, D.E. & YOUNG, B. 1995. Performance of Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures. Auburn University, Birmingham, USA: National Center for Asphalt Technology.
- KARLSSON, R. & ISACSSON, U. 2006. Material-Related Aspects of Asphalt Recycling--State-of-the-Art. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 18:1. S. 81-92. DOI 10.1061.
- KARLSSON, R. & ISACSSON, U. 2003a. Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 15: 2. S. 157-165. DOI 10.1061.
- KARLSSON, R. & ISACSSON, U. 2003b. Investigations on Bitumen Rejuvenator Diffusion and Structural Stability. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 72. S. 463-501. ISSN 0270-2932.
- KUANG, D., FENG, Z., YU, J., CHEN, X. & ZHOU, B. 2011. A New Approach for Evaluating Rejuvenator Diffusing into Aged Bitumen. Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition. vol. 26:1. S. 43-46. ISSN 1000-2413.
- LAHTINEN, T. 1984. Sideaineen Ominaisuuksien Parantaminen Vanhan Asfaltin Uudelleenkäytössä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosa. Espoo. 44 s.

- LÄMSÄ, V. 2005. *Asfaltin Uusiokäyttö Tierakentamisessa*. Helsinki: Tiehallinto, Oulun tiepiiri. ISBN 1458-1561.
- LE GUERN, M., CHAILLEUX, E., FRANCAS, F., DREESSEN, S. & MABILLE, I. 2010. Physico-Chemical Analysis of Five Hard Bitumens: Identification of Chemical Species and Molecular Organization before and After Artificial Aging. *Fuel*. vol. 89:11. S. 3330-3339. ISSN 0016-2361. DOI 10.1016.
- LESUEUR, D. 2009. The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. *Advances in Colloid and Interface Science*. Vol. 145:1-2. S. 42-82. ISSN 0001-8686. DOI 10.1016.
- LIANG, Y., FENG, Z. & YU, J. 2010. Effect of Chemical Compositions on Temperature Susceptibility of Bitumens. *Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition*. Vol. 25:4. S. 669-673. ISSN 1000-2413. DOI 10.1007.
- LU, X. & ISACSSON, U. 2002. Effect of Ageing on Bitumen Chemistry and Rheology. *Construction and Building Materials*. Vol. 16:1. S. 15-22. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016.
- MARASTEANU, M. & ANDERSON, D. 2001. Techniques for Determining Errors in Asphalt Binder Rheological Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 1766:1. S. 32-39.
- MASSON, J. & POLOMARK, G.M. 2001. Bitumen Microstructure by Modulated Differential Scanning Calorimetry. *Thermochimica Acta*. Vol. 374:2. S. 105-114. ISSN 0040-6031. DOI 10.1016.
- MC DANIEL, R., SOLEYMANI, H. & SHAH, A. 2002. *Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Superpave Specifications: A Regional Pooled Fund Project*. Indiana, USA: Purdue University DOI 10.5703.
- MEZGER, T.G. 2002. *The Rheology Handbook*. Hannover, Germany: Curt R. Vincentz Verlag. ISBN 3-87870-745-2.
- NÖLTING, M., G. RIEBESEHL & C. DENCK. 2011. Construction of a high quality asphalt wearing course with more than 90 % reclaimed asphalt pavement (RA); a case study. CAPSA 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa September 11-14th. Kwazulu-Natal, South Africa.
- OLIVER, J.W.H. 1974. Diffusion of Oils in Asphalts. *Industrial & Engineering Chemistry, Product Research and Development*. Vol. 13:1. S. 65-70. DOI 10.1021.
- OLIVER, J.W.H. 2001. The Influence of the Binder in RAP on Recycled Asphalt Properties. *Road Materials and Pavement Design*. Vol. 2:3. S. 311-325. ISSN 1468-0629. DOI 10.1080.

- OSCARSSON, E. 2007. Prediction of Permanent Deformations in Asphalt Concrete using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. Lisensiaatintutkimus. Lundin teknillinen korkeakoulu. Lund, Ruotsi. ISBN 1653-1930.
- PANK ry. 2011. Asfalttinormit 2011. Vantaa: Päälystealan neuvottelukunta PANK ry. ISBN 978-952-99985-1-7.
- PASANEN, J. 2009. Biofluksin käyttö asfaltin elvyttimenä. Kandidaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 28 s.
- PATOSALMI, S. 1996. Vanhan asfalttipäällysteen sideaineen elvyttimet. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Espoo. 46 s.
- PETERSEN, J.C., ROBERTSON, R.E., BRANTHAVER, J.F., HARNSBERGER, P.M., DUVALL, J.J., KIM, S.S., ANDERSIN, D.A., CHRISTIANSEN, D.W. & BAHIA, H.U. 1994a. Binder Characterization and Evaluation. Volume 1. Washington DC, USA: Strategic Highway Research Program. ISBN 0-309-05809-0.
- PETERSEN, J.C., ROBERTSON, R.E., BRANTHAVER, J.F., HARNSBERGER, P.M., DUVALL, J.J., KIM, S.S., ANDERSIN, D.A., CHRISTIANSEN, D.W. & BAHIA, H.U. 1994b. Binder Characterization and evaluation. Volume 4: Test Methods. Washington DC, USA: Strategic Highway Research Program. ISBN 0-309-05806-6.
- REDELIUS, P.G. 2000. Solubility Parameters and Bitumen. Fuel. Vol. 79:1. S. 27-35. ISSN 00162361.
- REDELIUS, P.G. 2004. Bitumen Solubility Model Using Hansen Solubility Parameter. Energy & Fuels. Vol. 18:4. S. 1087-1092. DOI 10.1021/ef0400058.
- REERINK, H. 1973. Size and Shape of Asphaltene Particles in Relationship to High-Temperature Viscosity. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. vol. 12:1. S. 82-88. DOI 10.1021.
- REKOLA, M. 2008. Uusioasfaltti katupäällysteenä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 99 s.
- ROMERA, R., SANTAMARIA, A., PENA, J., MUNOZ, M, BARRAL, M., GARCIA, E. & JANEZ, V. 2006. Rheological Aspects of the Rejuvenation of Aged Bitumen. Rheologica Acta. Vol. 45:4. S. 474-478. ISSN 0035-4511.
- ROWE, G.M., BAUMGARDNER, G. & SHARROCK, M.J. 2008. A Generalized Logistic Function to describe the Master Curve Stiffness Properties of Binder Mastics and Mixtures. Presentation at 45th Petersen Asphalt Research Conference, July 14-16 2008. University of Wyoming, Laramie, USA.

- SANDERS, P. 2005. Review of Recycling and Rejuvenation Procedures. SILVIA Project Report. Belgia: FEHRL, National Road Research Centres in Partnership.
- SFS-EN 12697-23. 2003. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 23: Determination of the Indirect Tensile Strength of Bituminous Specimens. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- SFS-EN 12697-25. 2005. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 25: Cyclic Compression Test. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- SFS-EN 12697-26. 2004. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 26: Stiffness. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- Shell Bitumen U.K. 1990. The Shell Bitumen Handbook. UK, Chertsey: Shell Bitumen. ISBN 0-9516625-0-3.
- SHENOY, A. 2008. Nonrecovered Compliance from Dynamic Oscillatory Test Vis-Ä -Vis Nonrecovered Compliance from Multiple Stress Creep Recovery Test in the Dynamic Shear Rheometer. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 9:5. S. 329-341. DOI 10.1080.
- SIMONEN, M. 2011. Biofluksattujen bitumien ominaisuudet ja käyttö varastoitavissa pehmeissä asfalttikonkrettimassoissa. Diplomityö. Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 106 s.
- SIMPSON, W.C., GRIFFIN, R.L. & MILES, T.K. 1961. Relationship of Asphalt Properties to Chemical Constitution. Journal of Chemical & Engineering Data. Vol. 6:3. S. 426-429. DOI 10.1021.
- TYLLGREN, P. 2010. Föryngning av returafalt med miljöanpassade tillsatsmedel. Stockholm / Malmö: SBUF / Skanska. 39 s.
- WASTIMO, E. 1993. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO 1987-1992: Asfalttirouheen varastointi ja käyttö. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- WIDYATMOKO, I. 2008. Mechanistic-Empirical Mixture Design for Hot Mix Asphalt Pavement Recycling. Construction and Building Materials. Vol. 22:2. S. 77-87. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016.

Liitteet

- Liite A. Hienoaineksen ominaispinta-alan määrittäminen
- Liite B. Kompleksisen leikkausmoduulin ja vaihekulman määrittäminen ja tulokset
- Liite C. SARA-fraktioiden määrittäminen
- Liite D. Sideaineen deformaatiokestävyys: Multiple Stress Creep Compliance
- Liite E. Ultraäänen läpikulkuajan määrittäminen
- Liite F. RC100 -koekappaleiden tiedot ja halkaisuvetolujuudet
- Liite G. RC100 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyysmoduulit
- Liite H. AB8 RC40 -koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet
- Liite I. AB8 RC40 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyysmoduulit
- Liite J. AB16 RC40 -koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet
- Liite K. AB16 RC40 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyysmoduulit
- Liite L. Jaksollisen virumiskokeen tulokset ja koekappaleiden tilavuussuhteet
- Liite M. Koekohteen 100 mm koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet
- Liite N. Lämpötilakorjauskertoimen määrittäminen
- Liite O. Tyhjätilakorjausten periaate
- Liite P. Uusioasfalttimassojen suunnittelu
- Liite Q. Uusioasfalttimassojen sideainepitoisuudet ja maksimitiheydet

Liite A: Hienoaineksen ominaispinta-alan määrittäminen

Mittaukset suoritettiin Flowsorb II 2300 ominaispinta-alamittauslaitteistolla yksipistemenetelmällä käyttäen typpi-helium -seosta (30/70) ja jäähdytinaineena nestetyypeä. Laitteisto kalibroitiin höyrystyneellä nestetyypellä ja referenssimateriaalina ominaispinta-alan $0,49 \pm 0,02$ omaavaa standardia. Standardin arvot mitattaessa $0,4898 \text{ m}^2/\text{g}$ ja $0,5115 \text{ m}^2/\text{g}$. Sallittu virheraja $\pm 3\%$.

Laitteisto toiminta perustuu jauhettujen materiaalien pinta-alan mittaamiseen molekyyllitasolla. Pinta-ala määritetään mittaamalla sen kaasun määrä, joka kiinnittyy yhden molekyylin paksuiseksi kerrokseksi. Tämä sorptio tehdään adsorptoituvan kaasun kiehumispisteessä tai lähellä sitä. Typen ja heliumin seoksella (30/70) nämä olot ovat normaali ilmanpaine ja nestetyypen lämpötila.

Mittaukset suoritettiin 24.8.2011 Turun yliopiston geologian osastolla. Mittaustulokset on esitetty taulukossa A.1.

Taulukko A.1. Hienoaineksen ominaispinta-alan määrittämisen tulokset.

Näyte	Näytteen paino	Adsorptio	Desorptio	Ominaispinta-ala
	<i>g</i>			<i>m²/g</i>
Hienoaines	0,3870	0,6	0,64	1,653746770
RC-hienoaines	0,6187	1,1	1,16	1,874898982
Lenhotuhka	0,6048	1,83	1,92	3,174603175

Liite B: Kompleksisen leikkausmoduulin ja vaihekulman määrittäminen ja tulokset

Sideaineiden kompleksiset leikkausmoduulit ja vaihekulmat määritettiin dynaamisella leikkausreometrillä käyttäen erilaisia kuormitusaikoja ja lämpötiloja. DSR -mittaukset suoritettiin muodonmuutosohjatulla kuormituksella Neste Oilin tutkimuslaboratoriossa Porvoossa (taulukko B.1.).

Taulukko B.1. DSR-mittausten tietoja.

Laite:	Anton Paar Physica MCR 301
Mittapään geometria:	25 mm levy-levy
Mittarako:	1 mm
Taajuusalue:	0,01 – 10 Hz (4 kuormitustaajuutta / dekadit)
Kuormitusmuodonmuutos:	0,1 – 0,001
Lämpötila-alue:	10 – 100 °C (RAP-sideaine 30 – 100 °C)

Koska mittaustulokset suoritettiin käyttäen laajoja lämpötila- ja kuormitustaajuusalueita, tuloksia ei voida esittää täydessä laajuudessa tässä diplomityössä. Sideaineiden kompleksiset leikkausmoduulit, vaihe-erot ja kompleksiset viskositeetit 1,78 Hz kuormitustaajuudella 10 – 100 °C lämpötiloissa on esitetty taulukoissa B.2 - B.7. Kyseisellä kuormitustaajuudella saatuja tuloksia on käytetty tässä työssä urautumistekijän $|G^*|/\sin\delta$ laskemiseen. Taajuus 1,78 Hz on lähimpänä Superpaven PG-luokituksessa käytettyä 10 rad/s taajuutta, joka vastaa noin 70 km/h nopeudella etenevää liikennettä.

Taulukko B.2. RAP-sideaineen kompleksiset leikkausmoduulit, vaihe-erot ja kompleksiset viskositeetit kuormitustaajuudella 1,78 Hz.

Lämpötila	 G* 	δ	η^*
$^{\circ}\text{C}$	<i>Pa</i>	$^{\circ}$	<i>Pa·s</i>
10	-	-	-
20	-	-	-
30	1660000	51,7	149000
40	364000	61	32500
50	81500	68,7	7300
60	19700	75,5	1760
70	5030	81,3	451
80	1420	85,2	127
90	456	87,6	40,8
100	165	88,8	14,8

Taulukko B.3. RAP+BF -sideaineen kompleksiset leikkausmoduulit, vaihe-erot ja kompleksiset viskositeetit kuormitustaajuudella 1,78 Hz.

Lämpötila	 G* 	δ	η^*
$^{\circ}\text{C}$	<i>Pa</i>	$^{\circ}$	<i>Pa·s</i>
10	3050000	43,6	273000
20	762000	52,8	68200
30	162000	61,5	14500
40	35100	69,6	3140
50	8480	76,8	759
60	2260	82,3	203
70	672	85,9	60,2
80	229	88,2	20,5
90	89,9	89,4	8,05
100	40	90	3,58

Taulukko B.4. RAP+N81 -sideaineen kompleksiset leikkausmoduulit, vaihe-erot ja kompleksiset viskositeetit kuormitustaajuudella 1,78 Hz.

Lämpötila	 G* 	δ	η^*
$^{\circ}\text{C}$	<i>Pa</i>	$^{\circ}$	<i>Pa·s</i>
10	3030000	46	271000
20	693000	55,4	62000
30	135000	64,3	12100
40	27400	72,3	2450
50	6350	79,1	568
60	1640	84	147
70	486	87,1	43,5
80	165	88,7	14,8
90	64,5	89,6	5,78
100	28,5	88,7	2,55

Taulukko B.5. RAP+N82 -sideaineen kompleksiset leikkausmoduulit, vaihe-erot ja kompleksiset viskositeetit kuormitustaajuudella 1,78 Hz.

Lämpötila	 G* 	δ	η^*
$^{\circ}\text{C}$	<i>Pa</i>	$^{\circ}$	<i>Pa·s</i>
10	2730000	46,5	244000
20	616000	55,9	55200
30	120000	64,5	10700
40	24100	72,3	2160
50	5600	79,1	501
60	1450	84	130
70	427	86,9	38,3
80	145	88,4	13
90	56,7	88,6	5,07
100	25,2	86,6	2,25

Taulukko B.6. RAP+V15 -sideaineen kompleksiset leikkausmoduulit, vaihe-erot ja kompleksiset viskositeetit kuormitustaajuudella 1,78 Hz.

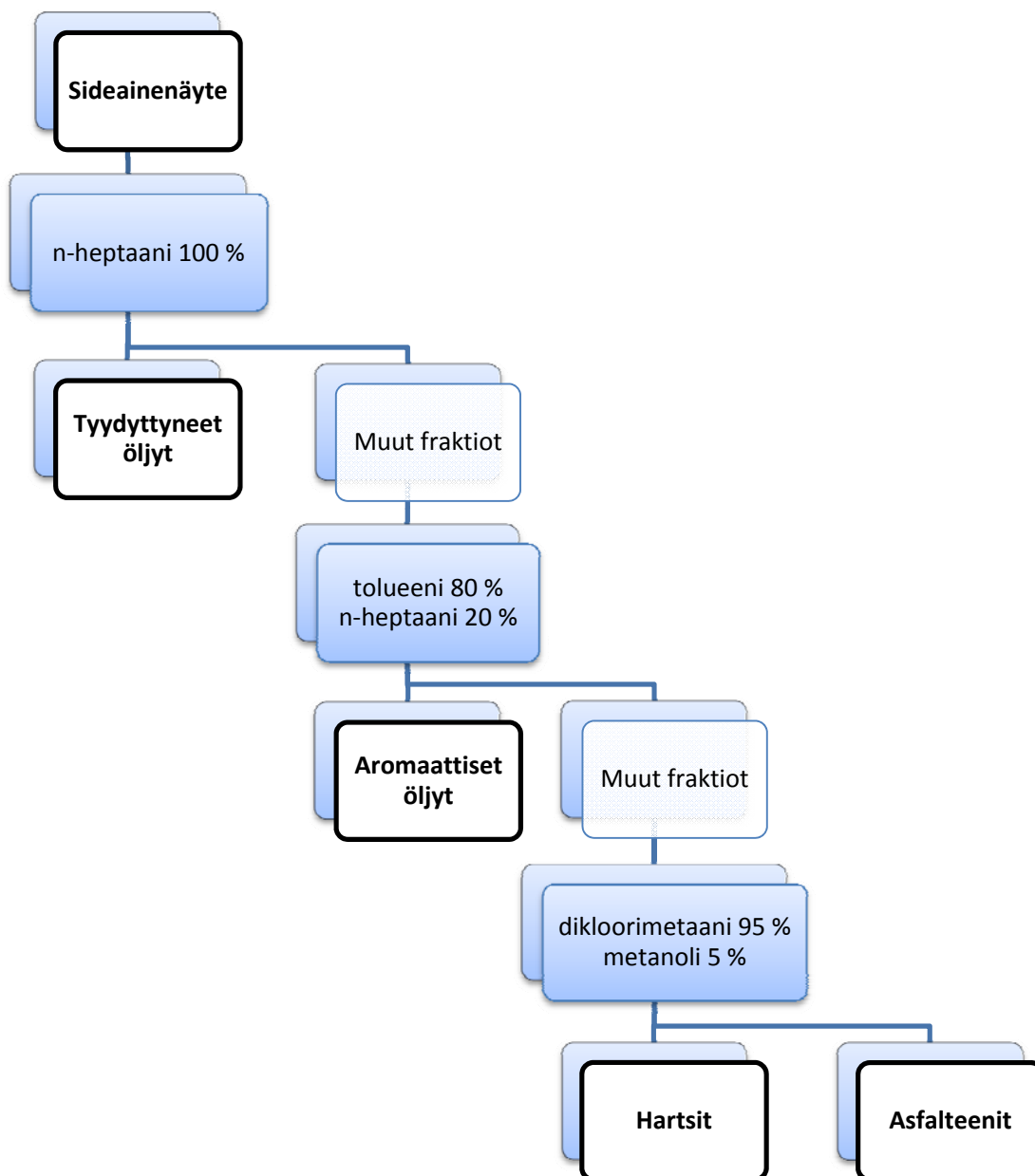
Lämpötila	 G* 	δ	η^*
<i>°C</i>	<i>Pa</i>	<i>°</i>	<i>Pa·s</i>
10	4670000	47,6	418000
20	904000	59,2	80900
30	142000	68,6	12700
40	22900	76,2	2050
50	4550	82	407
60	1160	85,7	104
70	351	88,1	31,4
80	125	89,4	11,2
90	50,6	90	4,53
100	23,1	90	2,06

Taulukko B.7. 70/100 -bitumin kompleksiset leikkausmoduulit, vaihe-erot ja kompleksiset viskositeetit kuormitustaajuudella 1,78 Hz.

Lämpötila	 G* 	δ	η^*
<i>°C</i>	<i>Pa</i>	<i>°</i>	<i>Pa·s</i>
10	9450000	42,8	846000
20	1760000	58,1	158000
30	255000	69,4	22900
40	38000	77,3	3400
50	6850	82,7	613
60	1480	86,1	133
70	389	88,3	34,8
80	131	88,8	11,8
90	52,8	87,9	4,72
100	24,3	86,4	2,17

Liite C: SARA-fraktioiden määrittäminen

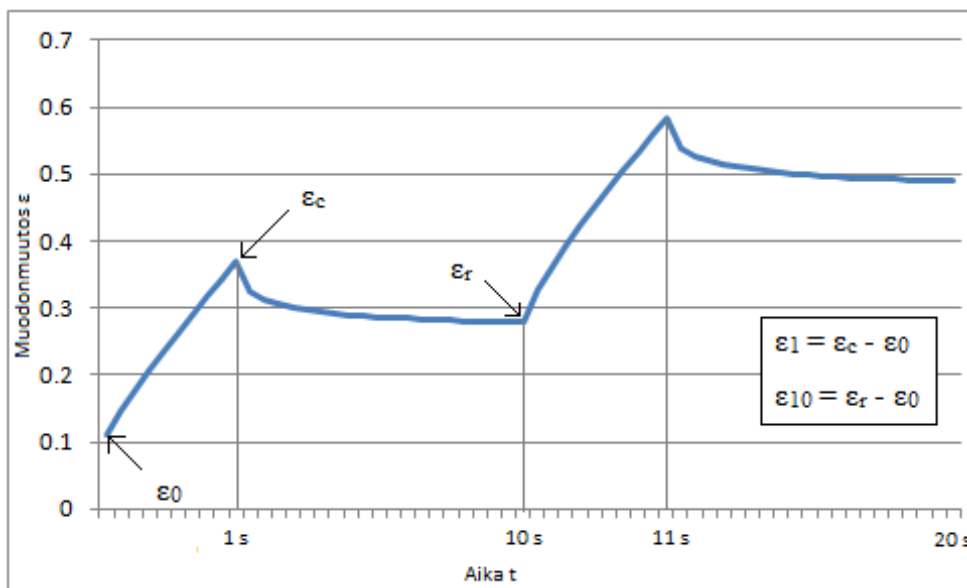
Sideaineiden kemiallista koostumusta eli SARA-fraktioiden osuuksia tutkittiin ohutlevykromatografiaan perustuvalla IATROSCAN -laitteella. Jokaisen fraktion liukoisuus on erilainen, joten fraktioiden erottamiseen käytetään kolmea erilaista eluointiliuosta. Näytteen fraktiointi on esitetty kuvassa C.1. SARA-fraktiot määritettiin Neste Oilin tutkimuslaboratoriossa Porvoossa. Määrittämisessä käytettiin Neste Oilin sisäistä menetelmää NM 228-2005, joka perustuu laitevalmistajan ja kansainvälisen tutkimuksen kehittämään menetelmään.



Kuva C.1. SARA-fraktiointi IATROSCAN-laitteella. Muokattu lähteestä Simonen (2011).

Liite D: Sideaineen deformaatiokestävyys: Multiple Stress Creep Compliance

MSCR-mittaukset suoritettiin 64 °C:n lämpötilassa Aalto-yliopiston tielaboratoriossa ja 50 °C:n lämpötilassa Neste Oilin tutkimuslaboratoriossa Porvoossa. Otaniemessä testaukseen käytettiin Reologica StressTech -reometria ja Porvoossa samaa reometria kuin kompleksimoduulin määrittämisessä (liite B). Kokeen ensimmäisessä vaiheessa näytettä kuormitetaan 1 sekunnin ajan siten, että näytteeseen syntyy 100 Pa jännitys. Kuormitusjaksoa seuraa 9 sekunnin palautumisjakso. Kuormitus-palautusjakso toistetaan 10 kertaa. Vastaavat 10 jaksoa toistetaan siten, että näytteeseen syntyy 3200 Pa jännitys. Muodonmuutoksen suhdetta aikaan on havainnollistettu kuvassa D.1.



Kuva D.1. MSCR-kokeen muodonmuutoskuvaaja kahden kuormitus-palautusjakson (syklin) osalta. Aikajanalla on enemmän mittauspisteitä 0-1 s kuin 1-10 s välillä.

Kokeen tuloksena saadaan keskimääräinen palautumaton myötääminen J_{nr} sekä suhteellisen muodonmuutoksen (ϵ) keskimääräinen palautumaprosentti R kullekin jännitykselle. Taulukoissa D.1. ja D.2. esitettyjen tulosten laskennassa on käytetty kaavoja D.1 - D.6. Kaavoissa S tarkoittaa jännitystä (100 tai 3200 Pa) ja N syklin numeroa (1–10). $J_{nr}(S, N)$ ja $\epsilon_r(S, N)$ lasketaan jokaiselle syklille erikseen, $J_{nr}(S)$ ja $R(S)$ ovat 10 syklin keskiarvoja. Diff -arvot kertovat jännitysten välisen prosentuaalisen eron.

$$J_{nr}(S, N) = \frac{\epsilon_{10}}{S} \quad (D.1)$$

$$\epsilon_r(S, N) = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_{10}) \cdot 100}{\epsilon_1} \quad (D.4)$$

$$J_{nr}(S) = \frac{\sum J_{nr}(S, N)}{10} \quad (D.2)$$

$$R(S) = \frac{\sum \epsilon_r(S, N)}{10} \quad (D.5)$$

$$J_{nr \text{ diff}} = \frac{(J_{nr100} - J_{nr3200}) \cdot 100}{J_{nr100}} \quad (D.3)$$

$$R_{diff} = \frac{(R_{100} - R_{3200}) \cdot 100}{R_{100}} \quad (D.6)$$

Taulukko D.1. MSCR-kokeen tulokset 50 °C:n lämpötilassa.

MSCR	Yks.	RAP	RAP+BF	RAP+N81	RAP+N82	RAP+V15	70/100
J _{nr} (100,1)	kPa ⁻¹	0,0494	0,977	1,39	1,57	2,22	1,96
J _{nr} (100,2)	kPa ⁻¹	0,0654	0,985	1,41	1,58	2,22	1,95
J _{nr} (100,3)	kPa ⁻¹	0,0650	0,984	1,40	1,58	2,22	1,95
J _{nr} (100,4)	kPa ⁻¹	0,0645	0,983	1,41	1,57	2,22	1,96
J _{nr} (100,5)	kPa ⁻¹	0,0638	0,982	1,41	1,57	2,22	1,96
J _{nr} (100,6)	kPa ⁻¹	0,0638	0,982	1,40	1,58	2,22	1,96
J _{nr} (100,7)	kPa ⁻¹	0,0632	0,981	1,40	1,57	2,22	1,96
J _{nr} (100,8)	kPa ⁻¹	0,0635	0,980	1,40	1,58	2,21	1,96
J _{nr} (100,9)	kPa ⁻¹	0,0633	0,980	1,40	1,57	2,22	1,96
J _{nr} (100,10)	kPa ⁻¹	0,0631	0,980	1,40	1,57	2,21	1,97
J _{nr} (3200,1)	kPa ⁻¹	0,0675	1,10	1,58	1,78	2,44	2,14
J _{nr} (3200,2)	kPa ⁻¹	0,0657	1,11	1,58	1,79	2,45	2,14
J _{nr} (3200,3)	kPa ⁻¹	0,0651	1,12	1,58	1,79	2,45	2,15
J _{nr} (3200,4)	kPa ⁻¹	0,0647	1,13	1,59	1,80	2,46	2,15
J _{nr} (3200,5)	kPa ⁻¹	0,0647	1,13	1,59	1,80	2,46	2,15
J _{nr} (3200,6)	kPa ⁻¹	0,0644	1,14	1,59	1,80	2,46	2,15
J _{nr} (3200,7)	kPa ⁻¹	0,0644	1,14	1,59	1,80	2,46	2,15
J _{nr} (3200,8)	kPa ⁻¹	0,0644	1,15	1,60	1,80	2,46	2,15
J _{nr} (3200,9)	kPa ⁻¹	0,0644	1,15	1,60	1,81	2,47	2,15
J _{nr} (3200,10)	kPa ⁻¹	0,0641	1,16	1,60	1,81	2,47	2,15
J_{nr}100	kPa⁻¹	0,0625	0,981	1,40	1,57	2,22	1,96
J_{nr}3200	kPa⁻¹	0,0646	1,14	1,59	1,80	2,46	2,15
J_{nr} diff	%	3,4	15,8	13,6	14,4	10,9	9,7
ε _r (100,1)	%	37,2	12,2	9,0	8,9	5,3	5,3
ε _r (100,2)	%	32,0	12,4	8,9	9,0	5,4	5,6
ε _r (100,3)	%	32,5	12,5	9,1	9,1	5,4	5,6
ε _r (100,4)	%	32,8	12,6	9,0	9,2	5,4	5,5
ε _r (100,5)	%	33,5	12,6	9,1	9,3	5,5	5,4
ε _r (100,6)	%	33,5	12,6	9,1	9,2	5,1	5,3
ε _r (100,7)	%	33,8	12,6	9,1	9,2	5,1	5,3
ε _r (100,8)	%	33,9	12,7	9,1	9,2	5,6	5,3
ε _r (100,9)	%	34,0	12,7	9,1	9,2	5,5	5,3
ε _r (100,10)	%	34,1	12,7	9,1	9,2	5,6	4,8
ε _r (3200,1)	%	29,7	5,2	2,9	2,6	1,0	0,8
ε _r (3200,2)	%	31,3	5,1	2,9	2,5	1,0	0,7
ε _r (3200,3)	%	32,0	5,0	2,9	2,5	1,0	0,7
ε _r (3200,4)	%	32,4	5,0	2,7	2,5	1,0	0,7
ε _r (3200,5)	%	32,4	5,0	2,9	2,4	1,0	0,7
ε _r (3200,6)	%	32,5	5,0	2,9	2,5	1,1	0,7
ε _r (3200,7)	%	32,5	4,9	2,9	2,5	1,1	0,9
ε _r (3200,8)	%	32,7	4,9	2,9	2,5	1,1	0,7
ε _r (3200,9)	%	32,5	4,9	2,8	2,5	1,0	0,7
ε _r (3200,10)	%	32,8	4,9	2,8	2,5	1,0	0,7
R100	%	33,7	12,6	9,0	9,2	5,4	5,3
R3200	%	32,1	5,0	2,8	2,5	1,0	0,7
R_{diff}	%	4,9	60,3	68,6	72,5	80,6	86,1

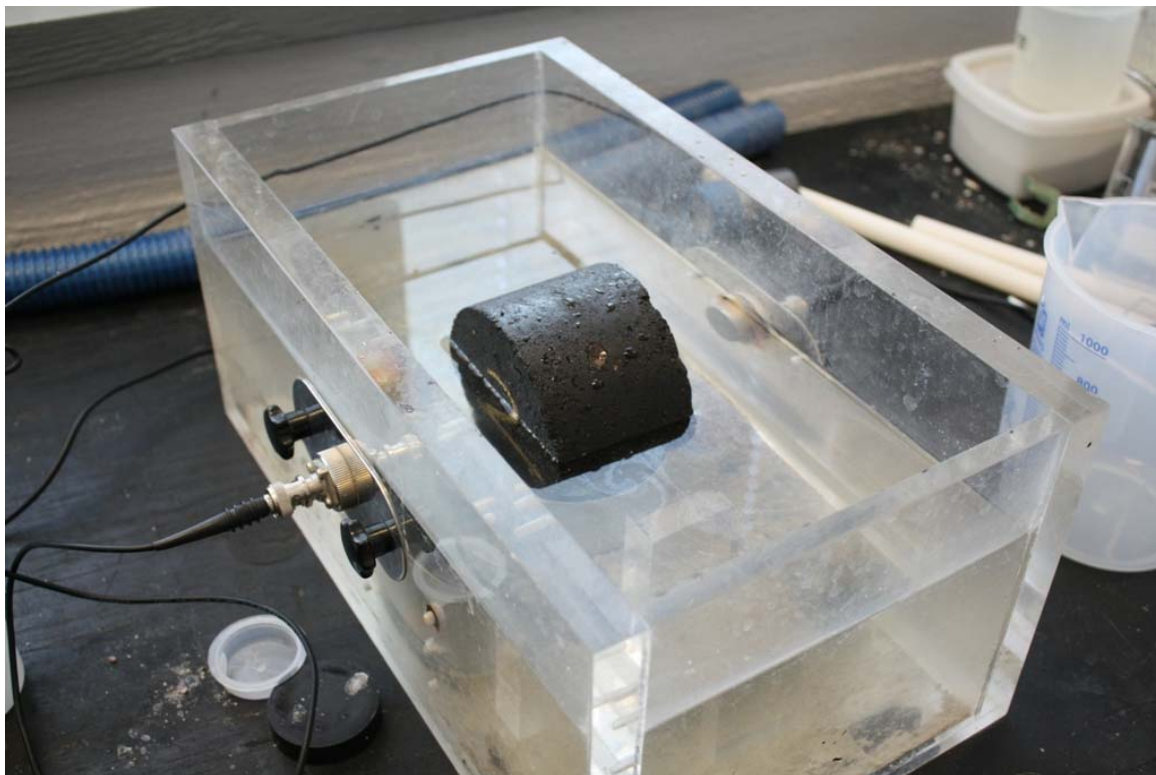
Taulukko D.2. MSCR-kokeen tulokset 64 °C:n lämpötilassa.

MSCR	Yks.	RAP	RAP+BF	RAP+N81	RAP+N82	RAP+V15	70/100
J _{nr} (100,1)	kPa ⁻¹	0,575	10,6	13,5	15,1	19,2	17,6
J _{nr} (100,2)	kPa ⁻¹	0,576	10,6	13,6	15,2	19,4	17,7
J _{nr} (100,3)	kPa ⁻¹	0,577	10,6	13,6	15,2	19,3	17,7
J _{nr} (100,4)	kPa ⁻¹	0,574	10,5	13,6	15,2	19,4	17,6
J _{nr} (100,5)	kPa ⁻¹	0,569	10,6	13,5	15,2	19,3	17,6
J _{nr} (100,6)	kPa ⁻¹	0,565	10,6	13,5	15,2	19,0	17,5
J _{nr} (100,7)	kPa ⁻¹	0,564	10,6	13,5	15,1	19,3	17,5
J _{nr} (100,8)	kPa ⁻¹	0,564	10,5	13,5	15,1	19,2	17,6
J _{nr} (100,9)	kPa ⁻¹	0,564	10,6	13,5	15,2	19,2	17,5
J _{nr} (100,10)	kPa ⁻¹	0,569	10,6	13,5	15,2	19,2	17,5
J _{nr} (3200,1)	kPa ⁻¹	0,675	14,0	16,7	19,2	23,7	20,4
J _{nr} (3200,2)	kPa ⁻¹	0,680	14,4	16,9	19,5	23,2	20,7
J _{nr} (3200,3)	kPa ⁻¹	0,679	14,3	16,9	19,4	23,7	20,5
J _{nr} (3200,4)	kPa ⁻¹	0,680	14,4	17,0	19,2	23,6	20,6
J _{nr} (3200,5)	kPa ⁻¹	0,679	14,2	17,0	19,2	23,7	20,6
J _{nr} (3200,6)	kPa ⁻¹	0,679	14,2	17,0	19,2	23,6	20,8
J _{nr} (3200,7)	kPa ⁻¹	0,679	14,3	17,0	19,2	23,4	20,6
J _{nr} (3200,8)	kPa ⁻¹	0,678	14,3	17,1	19,2	24,0	20,5
J _{nr} (3200,9)	kPa ⁻¹	0,678	14,2	17,0	19,1	23,8	20,5
J _{nr} (3200,10)	kPa ⁻¹	0,679	14,0	17,1	19,1	23,4	20,5
J_{nr}100	kPa⁻¹	0,570	10,6	13,5	15,2	19,3	17,6
J_{nr}3200	kPa⁻¹	0,679	14,2	17,0	19,2	23,6	20,6
J_{nr} diff	%	19,2	34,3	24,5	26,9	22,6	17,0
ε _r (100,1)	%	8,8	-0,4	-1,5	-1,7	-2,3	-2,6
ε _r (100,2)	%	8,8	-0,4	-1,7	-1,6	-2,4	-2,6
ε _r (100,3)	%	9,0	-0,4	-1,6	-1,7	-2,3	-2,6
ε _r (100,4)	%	9,0	-0,6	-1,6	-1,7	-2,5	-2,5
ε _r (100,5)	%	9,0	-0,5	-1,5	-1,7	-2,4	-2,5
ε _r (100,6)	%	9,1	-0,5	-1,5	-1,7	-2,5	-2,4
ε _r (100,7)	%	9,0	-0,5	-1,4	-1,6	-2,6	-2,5
ε _r (100,8)	%	9,2	-0,4	-1,5	-1,6	-2,3	-2,5
ε _r (100,9)	%	9,3	-0,5	-1,4	-1,8	-2,4	-2,6
ε _r (100,10)	%	9,2	-0,4	-1,6	-1,9	-2,3	-2,6
ε _r (3200,1)	%	1,2	-3,9	-4,2	-4,7	-4,6	-4,3
ε _r (3200,2)	%	1,0	-4,0	-4,1	-4,6	-4,7	-4,8
ε _r (3200,3)	%	1,1	-3,8	-4,1	-4,5	-4,5	-4,4
ε _r (3200,4)	%	1,0	-3,9	-4,2	-4,2	-4,4	-4,3
ε _r (3200,5)	%	1,0	-3,9	-4,1	-4,1	-4,4	-4,5
ε _r (3200,6)	%	1,0	-3,9	-4,1	-4,2	-4,6	-4,7
ε _r (3200,7)	%	1,1	-4,0	-4,0	-4,1	-4,6	-4,5
ε _r (3200,8)	%	1,1	-3,8	-4,1	-4,0	-4,4	-4,4
ε _r (3200,9)	%	1,0	-3,8	-4,0	-4,1	-4,5	-4,3
ε _r (3200,10)	%	1,0	-4,2	-4,3	-4,3	-4,5	-4,3
R100	%	9,0	-0,5	-1,5	-1,7	-2,4	-2,5
R3200	%	1,1	-3,9	-4,1	-4,3	-4,5	-4,5
R_{diff}	%	88,3	-750,3	-169,0	-151,9	-87,9	-75,8

Liite E: Ultraäänen läpikulkuajan määrittäminen

Ultraäänen kulkeutumisaika koekappaleen läpi mitattiin 54 kHz taajuudella. Mittaukset suoritettiin Aalto-yliopiston betoniteknikan laboratoriossa. Tutkimuksessa käytettiin vesihaudetta mittausolojen vakioimiseksi. Alkulukema eli ultraäänen kulku-aika lähetinanturista vastakappaleeseen kirjattiin ylös. Näyte asetettiin kuvan osoittamalla tavalla vesihautteen pohjalla olevan kehikon päälle ja mittaustulos kirjattiin ylös. Mittaus toistettiin kääntämällä koekappale 90° vastapäivään. Ultraäänen läpikulku-aika näytteen läpi laskettiin alkulukeman ja mittaustuloksen perusteella kahden määrittämisen keskiarvona. Koska koekappaleiden korkeus ei ollut vakio, tulokset muutettiin vastaamaan tasan 60 mm koekappaleita vertailun helpottamiseksi.

RC100 -koekappaleiden mittaukset suoritettiin 1, 7, 14 ja 28 vuorokautta tiivistyksen jälkeen. Tarkoituksena oli seurata ajan suhteen tapahtuvia muutoksia. Mittausasennon vakioimiseksi koekappaleisiin piirrettiin merkinnät, joiden avulla näyte asetettiin oikeaan asentoon. AB16 RC40 -koekappaleiden mittauksissa tämä ei ollut tarpeen, sillä mittauksen suoritettiin vain yhtenä päivänä.



Kuva E.1. Ultraäänen läpikulkuajan määrittämisessä käytetty vesihaudelaatikko, jonka sivuille on kiinnitetty ultraäänen lähetin- ja vastaanotinkappaleet.

Liite F: RC100 -koekappaleiden tiedot ja halkaisuvetolujuudet

Taulukko F.1. Ilman elvytintä valmistettujen RC100 -koekappaleiden tiheydet, tyhjätilat ja halkaisuvetolujuudet. Rouheen tiheys kahden määrittelyn keskiarvona 2513 kg/m³ (määrittely 1: 2511 kg/m³ ja määrittely 2: 2515 kg/m³).

Rinnakkaisnäyte	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	HVL 20 °C
	kg/m ³	%	kPa
1	2413	4,0	1397
2	2420	3,7	-
3	2416	3,9	1595
4	2407	4,2	1451
5	2392	4,8	1550
Keskiarvo	2410	4,1	1498
Keskihajonta	11	0,4	91

Taulukko F.2. RC100+BF -koekappaleiden tiheydet, tyhjätilat ja halkaisuvetolujuudet. Rouheen tiheys kahden määrittelyn keskiarvona 2522 kg/m³ (määrittely 1: 2523 kg/m³ ja määrittely 2: 2520 kg/m³).

Rinnakkaisnäyte	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	HVL 20 °C
	kg/m ³	%	kPa
1	2415	4,2	1162
2	2409	4,5	-
3	2422	4,0	1185
4	2420	4,1	-
5	2406	4,6	1251
Keskiarvo	2414	4,3	1199
Keskihajonta	7	0,3	46

Taulukko F.3. RC100+N81 -koekappaleiden tiheydet, tyhjätilat ja halkaisuvetolujuudet. Rouheen tiheys kahden määrittelyn keskiarvona 2488 kg/m³ (määrittely 1: 2489 kg/m³ ja määrittely 2: 2486 kg/m³).

Rinnakkaisnäyte	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	HVL 20 °C
	<i>kg/m³</i>	<i>%</i>	<i>kPa</i>
1	2450	1,5	1115
2	2432	2,2	1128
3	2443	1,8	1162
4	2445	1,7	1220
5	2437	2,0	1095
Keskiarvo	2441	1,9	1144
Keskihajonta	7	0,3	49

Taulukko F.4. RC100+N82 -koekappaleiden tiheydet, tyhjätilat ja halkaisuvetolujuudet. Rouheen tiheys kahden määrittelyn keskiarvona 2486 kg/m³ (määrittely 1: 2477 kg/m³ ja määrittely 2: 2495 kg/m³).

Rinnakkaisnäyte	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	HVL 20 °C
	<i>kg/m³</i>	<i>%</i>	<i>kPa</i>
1	2444	1,7	-
2	2454	1,3	905
3	2452	1,4	1002
4	2454	1,3	975
5	2448	1,5	-
Keskiarvo	2450	1,4	960
Keskihajonta	4	0,2	50

Taulukko F.5. RC100+V15 -koekappaleiden tiheydet, tyhjätilat ja halkaisuvetolujuudet. Rouheen tiheys kahden määrittelyn keskiarvona 2483 kg/m³ (määrittely 1: 2475 kg/m³ ja määrittely 2: 2490 kg/m³).

Rinnakkaisnäyte	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	HVL 20 °C
	<i>kg/m³</i>	<i>%</i>	<i>kPa</i>
1	2453	1,2	974
2	2453	1,2	947
3	2446	1,5	-
4	2471	0,5	1078
5	2455	1,1	1029
Keskiarvo	2456	1,1	1007
Keskihajonta	9	0,4	59

Liite G. RC100 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyysmoduulit

Jokainen epäsuoran jäykkyysmoduulin määrittäminen toistetaan kääntämällä koekappale 90° vaaka-akselin ympäri. Määrittäminen on tässä nimetty siten, että ensimmäinen on ”S’ pysty” ja toinen ”S’ vaaka”. Koekappaleen jäykkyysmoduuli lasketaan näiden kahden määrittäksen keskiarvona, jos toisen määrittäksen jäykkyysmoduulin on rajoissa -20 – +10 % ensimmäisen määrittäksen arvosta. Taulukoissa G.1 - G.5 on esitetty RC100 -koekappaleista määritetyt S’ pysty ja S’ vaaka -jäykkyysmoduulit ja niiden välinen prosentuaalinen ero. Poissonin lukuna käytettiin arvoa 0,35.

Taulukko G.1. RC100 referenssikoekappaleiden (ei elvytintä) epäsuorat jäykkyysmoduulit 20 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.				
			1	2	3	4	5
<i>vrk</i>							
1	S’ pysty	MPa	5872	5811	5692	6058	5563
	S’ vaaka	MPa	5238	5441	5149	5873	5199
	Ero	%	-10,8	-6,4	-9,5	-3,1	-6,5
7	S’ pysty	MPa	5773	5816	5689	6382	5582
	S’ vaaka	MPa	5621	5452	5546	5200	5337
	Ero	%	-2,6	-6,3	-2,5	-18,5	-4,4
14	S’ pysty	MPa	5974	5902	5796	6314	5403
	S’ vaaka	MPa	5808	5711	5551	5479	5415
	Ero	%	-2,8	-3,2	-4,2	-13,2	0,2
28	S’ pysty	MPa	2501	-	5661	6645	5394
	S’ vaaka	MPa	2203	-	5574	5778	5479
	Ero	%	-11,9	-	-1,5	-13,1	1,6

Taulukko G.2. Biofluksilla elvytettyjen RC100 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyyshmoduulit 20 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.				
			1	2	3	4	5
vrk							
1	S' pysty	MPa	3222	2808	3893	4313	4537
	S' vaaka	MPa	3118	2640	3606	4364	4321
	Ero	%	-3,2	-6,0	-7,4	1,2	-4,6
7	S' pysty	MPa	3275	-	3874	4363	4516
	S' vaaka	MPa	2784	-	3583	4057	4140
	Ero	%	-15,0	-	-7,5	-7,0	-8,3
14	S' pysty	MPa	3686	-	4035	-	4666
	S' vaaka	MPa	3315	-	3741	-	4390
	Ero	%	-10,1	-	-7,3	-	-5,9
28	S' pysty	MPa	3747	-	4061	-	4712
	S' vaaka	MPa	3451	-	3714	-	4601
	Ero	%	-7,9	-	-8,5	-	-2,4

Taulukko G.3. Nytex 810:llä elvytettyjen RC100 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyyshmoduulit 20 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.				
			1	2	3	4	5
vrk							
1	S' pysty	MPa	3116	2853	3199	3432	3436
	S' vaaka	MPa	2811	2829	2915	3506	3132
	Ero	%	-9,8	-0,8	-8,9	2,2	-8,8
7	S' pysty	MPa	3149	2860	3328	3473	3620
	S' vaaka	MPa	2898	2858	3194	3297	3520
	Ero	%	-8,0	-0,1	-4,0	-5,1	-2,8
14	S' pysty	MPa	3061	2846	3437	3423	3546
	S' vaaka	MPa	2804	2907	3241	3406	2954
	Ero	%	-8,4	2,1	-5,7	-0,5	-16,7
28	S' pysty	MPa	3566	3029	3815	3720	3800
	S' vaaka	MPa	3161	2886	3344	3682	3843
	Ero	%	-11,4	-4,7	-12,3	-1,0	1,1

Taulukko G.4. Nytex 820:llä elvytettyjen RC100 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyyssmoduulit 20 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.				
			1	2	3	4	5
<i>vrk</i>							
1	S' pysty	MPa	1723	1507	2362	2306	2253
	S' vaaka	MPa	-	1649	1802	2011	2109
	Ero	%	-	9,4	-23,7*	-12,8	-6,4
7	S' pysty	MPa	-	1772	2250	2457	-
	S' vaaka	MPa	-	1532	1939	2222	-
	Ero	%	-	-13,5	-13,8	-9,6	-
14	S' pysty	MPa	-	1761	2181	2427	-
	S' vaaka	MPa	-	1586	2124	2282	-
	Ero	%	-	-9,9	-2,6	-6,0	-
28	S' pysty	MPa	-	1893	2462	2627	-
	S' vaaka	MPa	-	1798	2252	2506	-
	Ero	%	-	-5,0	-8,5	-4,6	-

Taulukko G.5. V1500:lla elvytettyjen RC100 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyyssmoduulit 20 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.				
			1	2	3	4	5
<i>vrk</i>							
1	S' pysty	MPa	1981	1918	1946	2335	2285
	S' vaaka	MPa	1816	1747	1717	2253	2248
	Ero	%	-8,3	-8,9	-11,8	-3,5	-1,6
7	S' pysty	MPa	1878	1764	-	2180	2119
	S' vaaka	MPa	1640	1697	-	2313	1883
	Ero	%	-12,7	-3,8	-	6,1	-11,1
14	S' pysty	MPa	2184	1809	-	2524	2202
	S' vaaka	MPa	2115	1814	-	2501	1857
	Ero	%	-3,2	0,3	-	-0,9	-15,7
28	S' pysty	MPa	1894	1756	-	2398	2329
	S' vaaka	MPa	1708	1742	-	2380	2094
	Ero	%	-9,8	-0,8	-	-0,8	-10,1

Liite H: AB8 RC40 -koekappaleiden tiedot ja halkaisuvetolujuudet

Taulukko H.1. AB8 RC40 BF Perint ja BF Koost -massojen kiertotiivistimellä valmistettujen koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet.

BF Perint	Koekappaleen tilavuussuhteet				Halkaisuvetolujuus		
	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2381	2,7	17,0	83,9	1	10	1938
2	2379	2,8	17,0	83,4	1	10	2101
3	2379	2,8	17,0	83,5	1	10	2177
4	2383	2,7	16,9	84,3	7	10	2369
5	2377	2,9	17,1	83,0	7	10	2344
6	2377	2,9	17,1	83,1	7	10	2161
7	2385	2,6	16,8	84,7	28	20	1303
8	2384	2,6	16,9	84,6	28	20	1304
9	2383	2,7	16,9	84,3	28	20	1298
10	2392	2,3	16,6	86,2	-	-	-
11	2388	2,5	16,7	85,3	-	-	-
12	2388	2,5	16,7	85,3	-	-	-
Keskiarvo	2383	2,7	16,9	84,3			
Keskihajonta	5	0,2	0,2	0,9			
BF Koost	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2396	1,9	16,2	88,2	1	10	2092
2	2392	2,1	16,4	87,2	1	10	2056
3	2398	1,8	16,2	88,6	1	10	2047
4	2396	1,9	16,3	88,2	7	10	2184
5	2403	1,6	16,0	89,7	7	10	2260
6	2402	1,7	16,1	89,4	7	10	2230
7	2403	1,6	16,0	89,7	28	20	1271
8	2401	1,7	16,1	89,2	28	20	1288
9	2403	1,6	16,0	89,8	28	20	1377
10	2408	1,4	15,8	91,0	-	-	-
11	2405	1,6	15,9	90,2	-	-	-
12	2411	1,3	15,7	91,8	-	-	-
Keskiarvo	2401	1,7	16,1	89,4			
Keskihajonta	5	0,2	0,2	1,2			

Taulukko H.2. AB8 RC40 N82 Perint ja N82 Koost -massojen kiertotiivistimellä valmistettujen koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet.

N82 Perint	Koekappaleen tilavuussuhteet				Halkaisuvetolujuus		
	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2368	3,9	17,9	78,0	1	10	2006
2	2369	3,9	17,8	78,1	1	10	1980
3	2368	3,9	17,9	78,0	1	10	2071
4	2377	3,6	17,5	79,7	7	10	2347
5	2373	3,7	17,7	79,0	7	10	2272
6	2359	4,3	18,2	76,4	7	10	2345
7	2379	3,5	17,5	80,0	28	20	1230
8	2376	3,6	17,6	79,4	28	20	1211
9	2384	3,3	17,3	81,0	28	20	1267
10	2380	3,5	17,5	80,2	-	-	-
11	2389	3,1	17,1	81,9	-	-	-
12	2385	3,3	17,3	81,1	-	-	-
Keskiarvo	2375	3,6	17,6	79,4			
Keskihajonta	8	0,3	0,3	1,5			
N82 Koost	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2391	2,3	16,1	85,7	1	10	1990
2	2409	1,6	15,5	89,9	1	10	2184
3	2397	2,0	15,9	87,2	1	10	2210
4	2409	1,5	15,5	90,1	7	10	2369
5	2410	1,5	15,5	90,1	7	10	2318
6	2414	1,3	15,3	91,3	7	10	2385
7	2407	1,6	15,6	89,4	28	20	1188
8	2410	1,5	15,4	90,3	28	20	1249
9	2416	1,3	15,2	91,8	28	20	1288
10	2413	1,4	15,3	91,0	-	-	-
11	2417	1,2	15,2	91,8	-	-	-
12	2408	1,6	15,5	89,8	-	-	-
Keskiarvo	2408	1,6	15,5	89,9			
Keskihajonta	7	0,3	0,3	1,7			

Liite I: AB8 RC40 -massojen epäsuorat jäykkyysmoduulit

Jokainen epäsuoran jäykkyysmoduulin määrittäminen toistetaan kääntämällä koekappale 90° vaaka-akselin ympäri. Määrittäminen on tässä nimetty siten, että ensimmäinen on ”S’ pysty” ja toinen ”S’ vaaka”. Koekappaleen jäykkyysmoduuli lasketaan näiden kahden määrittäksen keskiarvona, jos toisen määrittäksen jäykkyysmoduulin on rajoissa -20 – +10 % ensimmäisen määrittäksen arvosta. Taulukoissa I.1 - I.4 on esitetty AB8 RC40 -koekappaleista määritetyt S’ pysty ja S’ vaaka -jäykkyysmoduulit ja niiden välinen prosentuaalinen ero. Poissonin lukuna käytettiin arvoa 0,35.

Taulukko I.1. BF Perint -koekappaleiden epäsuorat jäykkyysmoduulit 10 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
			1	2	3
<i>vrk</i>			1	2	3
1	S’ pysty	MPa	7585	8168	9102
	S’ vaaka	MPa	7057	7629	8308
	Ero	%	-7,0	-6,6	-8,7
7	S’ pysty	MPa	8476	9042	8864
	S’ vaaka	MPa	7981	8197	8247
	Ero	%	-5,8	-9,3	-7,0
28	S’ pysty	MPa	7432	7942	8519
	S’ vaaka	MPa	6897	7660	7938
	Ero	%	-7,2	-3,6	-6,8

Taulukko I.2. BF Koost -koekappaleiden epäsuorat jäykkyysmoduulit 10 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
			1	2	3
<i>vrk</i>			1	2	3
1	S’ pysty	MPa	7773	8047	8174
	S’ vaaka	MPa	7306	7689	8127
	Ero	%	-6,0	-4,4	-0,6
7	S’ pysty	MPa	8047	8420	9090
	S’ vaaka	MPa	7126	7249	8618
	Ero	%	-11,4	-13,9	-5,2
28	S’ pysty	MPa	8137	8182	9676
	S’ vaaka	MPa	7331	8093	8839
	Ero	%	-9,9	-1,1	-8,7

Taulukko I.3. N82 Perint -koekappaleiden epäsuorat jäykkäysmoduulit 10 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
			1	2	3
<i>vrk</i>			1	2	3
1	S' pysty	MPa	6333	7575	7533
	S' vaaka	MPa	5832	7316	7437
	Ero	%	-7,9	-3,4	-1,3
7	S' pysty	MPa	6293	7562	7688
	S' vaaka	MPa	5918	7323	7048
	Ero	%	-6,0	-3,2	-8,3
28	S' pysty	MPa	6833	8176	8268
	S' vaaka	MPa	6465	7688	8171
	Ero	%	-5,4	-6,0	-1,2

Taulukko I.4. N82 Koost -koekappaleiden epäsuorat jäykkäysmoduulit 10 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
			1	2	3
<i>vrk</i>			1	2	3
1	S' pysty	MPa	7822	7889	7676
	S' vaaka	MPa	7261	7338	6972
	Ero	%	-7,2	-7,0	-9,2
7	S' pysty	MPa	7919	8548	8458
	S' vaaka	MPa	7590	7863	7442
	Ero	%	-4,2	-8,0	-12,0
28	S' pysty	MPa	8509	8537	7968
	S' vaaka	MPa	8298	8019	5896
	Ero	%	-2,5	-6,1	-26,0*

Liite J: AB16 RC40 -massojen tiedot ja halkaisuvetolujuudet

Taulukko J.1. AB16 RC40 Referenssimassan tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet.

REF	Koekappaleen tilavuussuhteet				Halkaisuvetolujuus		
	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2428	0,8	15	89	1	20	1006
2	2444	0,2	14	91	1	20	1046
3	2461	-0,5	14	92	1	20	1112
4	2441	0,3	14	91	7	20	1049
5	2449	0,0	14	95	7	20	1058
6	2443	0,3	14	94	7	20	1142
7	2441	0,3	14	93	28	20	1224
8	2450	0,0	14	95	28	20	1181
9	2450	-0,1	14	92	28	20	1209
10	2443	0,2	14	91	-	-	-
11	2437	0,5	14	92	-	-	-
12	2441	0,3	15	90	-	-	-
Keskiarvo	2444	0,2	14	92			
Keskihajonta	8	0,3	0	2			

Taulukko J.2. AB16 RC40 BF Perint, RH ja Ikk -massojen tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet.

Koekappaleen tilavuussuhteet					Halkaisuvetolujuus		
BF Perint	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2430	1,8	15	84	1	20	1075
2	2447	1,1	15	87	1	20	1128
3	2434	1,7	15	84	1	20	1205
4	2440	1,4	15	84	7	20	1192
5	2437	1,5	15	84	7	20	1177
6	2437	1,6	15	85	7	20	1221
7	2435	1,6	16	80	28	20	1360
8	2439	1,5	16	81	28	20	1373
9	2446	1,2	15	83	28	20	1519
10	2433	1,7	16	80	-	-	-
11	2436	1,6	16	79	-	-	-
12	2441	1,4	16	81	-	-	-
Keskiarvo	2438	1,5	15	83			
Keskihajonta	5	0,2	0	2			
BF RH	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2448	1,2	15	85	1	20	1208
2	2447	1,3	15	83	1	20	1284
3	2442	1,5	15	84	1	20	1305
4	2440	1,6	15	83	7	20	1360
5	2443	1,5	15	81	7	20	1332
6	2445	1,4	15	82	7	20	1380
7	2442	1,5	15	82	28	20	1461
8	2444	1,4	16	78	28	20	1463
9	2437	1,7	15	82	28	20	1440
10	2442	1,5	16	80	-	-	-
11	2439	1,6	16	79	-	-	-
12	2446	1,3	16	80	-	-	-
Keskiarvo	2443	1,5	15	82			
Keskihajonta	3	0,1	0	2			
BF Ikk	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2442	1,3	16	83	1	20	1275
2	2435	1,6	16	83	1	20	1228
3	2444	1,3	15	86	1	20	1223
4	2442	1,3	16	82	7	20	1360
5	2446	1,2	16	84	7	20	1340
6	2448	1,1	15	84	7	20	1323
7	2454	0,8	16	82	28	20	1390
8	2435	1,6	15	84	28	20	1388
9	2436	1,6	16	81	28	20	1338
10	2445	1,2	16	82	-	-	-
11	2448	1,1	16	82	-	-	-
12	2442	1,3	16	80	-	-	-
Keskiarvo	2443	1,3	16	83			
Keskihajonta	6	0,2	0	2			

Taulukko J.3. AB16 RC40 N81 Perint, RH ja Ikk -massojen tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet.

Koekappaleen tilavuussuhteet					Halkaisuvetolujuus		
N81 Perint	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2436	2,0	15	81	1	20	1068
2	2432	2,1	16	78	1	20	1133
3	2446	1,6	16	79	1	20	1159
4	2447	1,5	15	82	7	20	1194
5	2442	1,7	15	82	7	20	1248
6	2439	1,8	15	81	7	20	1229
7	2441	1,8	16	76	28	20	1229
8	2437	1,9	16	81	28	20	1266
9	2429	2,3	16	75	28	20	1223
10	2420	2,6	16	78	-	-	-
11	2429	2,2	16	80	-	-	-
12	2442	1,7	16	80	-	-	-
Keskiarvo	2437	1,9	16	79			
Keskihajonta	8	0,3	0	2			
N81 RH	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2402	2,3	16	84	1	20	678
2	2452	0,3	14	95	1	20	874
3	2448	0,4	15	91	1	20	911
4	2444	0,6	15	91	7	20	912
5	2437	0,9	15	88	7	20	876
6	2437	0,9	15	87	7	20	977
7	2451	0,3	15	92	28	20	1004
8	2446	0,5	15	90	28	20	1045
9	2442	0,7	15	85	28	20	1075
10	2447	0,5	15	89	-	-	-
11	2446	0,5	15	90	-	-	-
12	2444	0,6	15	88	-	-	-
Keskiarvo	2441	0,7	15	89			
Keskihajonta	13	0,5	0	3			
N81 Ikk	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2438	1,1	15	87	1	20	1143
2	2441	0,8	14	90	1	20	1191
3	2440	1,0	14	90	1	20	1204
4	2454	0,3	14	91	7	20	1252
5	2448	1,1	15	88	7	20	1192
6	2444	1,4	15	86	7	20	1258
7	2442	0,4	14	93	28	20	1306
8	2443	1,0	15	87	28	20	1383
9	2445	0,8	15	86	28	20	1306
10	2444	0,3	14	91	-	-	-
11	2436	0,5	15	87	-	-	-
12	2442	0,8	14	88	-	-	-
Keskiarvo	2443	0,8	14	89			
Keskihajonta	5	0,3	0	2			

Taulukko J.4. AB16 RC40 N82 Perint, RH ja Ikk -massojen tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet.

Koekappaleen tilavuussuhteet					Halkaisuvetolujuus		
N82 Perint	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2456	0,1	15	92	1	20	1025
2	2455	0,1	15	89	1	20	1070
3	2439	0,8	15	86	1	20	1049
4	2440	0,7	15	88	7	20	1111
5	2446	0,5	16	84	7	20	1117
6	2446	0,5	15	88	7	20	1176
7	2443	0,6	15	89	28	20	1199
8	2440	0,7	15	88	28	20	1266
9	2438	0,8	15	90	28	20	1229
10	2445	0,5	15	88	-	-	-
11	2438	0,8	15	88	-	-	-
12	2442	0,6	15	87	-	-	-
Keskiarvo	2444	0,6	15	88			
Keskihajonta	6	0,2	0	2			
N82 RH	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2444	0,6	14	90	1	20	1029
2	2438	0,8	15	87	1	20	1019
3	2450	0,3	14	88	1	20	1140
4	2449	0,4	14	89	7	20	1125
5	2440	0,7	15	87	7	20	1098
6	2455	0,1	14	89	7	20	1200
7	2443	0,6	15	86	28	20	1174
8	2449	0,4	15	87	28	20	1240
9	2452	0,3	14	89	28	20	1244
10	2454	0,2	14	90	-	-	-
11	2446	0,5	15	86	-	-	-
12	2450	0,3	14	89	-	-	-
Keskiarvo	2448	0,4	14	88			
Keskihajonta	5	0,2	0	1			
N82 Ikk	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2438	0,8	15	90	1	20	907
2	2445	0,5	14	93	1	20	1034
3	2439	0,7	14	93	1	20	990
4	2455	0,1	14	94	7	20	1035
5	2437	0,8	15	90	7	20	989
6	2430	1,1	15	89	7	20	971
7	2454	0,1	14	96	28	20	1128
8	2439	0,7	15	90	28	20	1129
9	2444	0,5	15	89	28	20	1158
10	2456	0,0	14	94	-	-	-
11	2452	0,2	15	90	-	-	-
12	2446	0,5	15	91	-	-	-
Keskiarvo	2444	0,5	15	91			
Keskihajonta	8	0,3	0	2			

Taulukko J.5. AB16 RC40 V15 Perint, RH ja Ikk -massojen tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet.

Koekappaleen tilavuussuhteet					Halkaisuvetolujuus		
V15 Perint	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2425	2,1	15	83	1	20	1081
2	2436	1,6	15	83	1	20	1118
3	2430	1,8	16	79	1	20	1050
4	2447	1,2	15	85	7	20	1219
5	2438	1,5	15	83	7	20	1198
6	2443	1,3	16	80	7	20	1232
7	2443	1,3	15	85	28	20	1320
8	2433	1,7	16	77	28	20	1297
9	2438	1,5	16	80	28	20	1266
10	2429	1,9	16	80	-	-	-
11	2439	1,5	16	81	-	-	-
12	2442	1,4	16	79	-	-	-
Keskiarvo	2437	1,6	16	81			
Keskihajonta	7	0,3	0	3			
V15 RH	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2440	1,0	15	86	1	20	1177
2	2411	2,2	16	80	1	20	815
3	2448	0,7	15	86	1	20	1242
4	2439	1,1	15	87	7	20	1219
5	2435	1,2	15	85	7	20	1166
6	2443	0,9	15	86	7	20	1243
7	2449	0,7	15	87	28	20	1326
8	2440	1,1	15	84	28	20	1214
9	2441	1,0	15	84	28	20	1270
10	2438	1,1	15	83	-	-	-
11	2438	1,1	16	77	-	-	-
12	2450	0,7	15	85	-	-	-
Keskiarvo	2439	1,1	15	84			
Keskihajonta	10	0,4	0	3			
V15 Ikk	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
<i>Rinnakkaisnäyte</i>	<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	2419	1,2	16	85	1	20	902
2	2430	0,8	16	88	1	20	1013
3	2445	0,2	16	88	1	20	1157
4	2443	0,3	15	89	7	20	1171
5	2441	0,3	15	91	7	20	1100
6	2430	0,8	15	88	7	20	1070
7	2447	0,1	15	93	28	20	1282
8	2438	0,5	16	87	28	20	1322
9	2438	0,5	16	86	28	20	1374
10	2437	0,5	15	89	-	-	-
11	2450	0,0	15	92	-	-	-
12	2431	0,7	16	87	-	-	-
Keskiarvo	2437	0,5	15	89			
Keskihajonta	9	0,4	0	2			

Liite K: AB16 RC40 -koekappaleiden epäsuorat jäykkyysmoduulit

Jokainen epäsuoran jäykkyysmoduulin määrittäminen toistetaan kääntämällä koekappale 90° vaaka-akselin ympäri. Määrittäminen on tässä nimetty siten, että ensimmäinen on ”S’ pysty” ja toinen ”S’ vaaka”. Koekappaleen jäykkyysmoduuli lasketaan näiden kahden määrittäksen keskiarvona, jos toisen määrittäksen jäykkyysmoduulin on rajoissa -20 – +10 % ensimmäisen määrittäksen arvosta. Taulukoissa K.1 - K.5 on esitetty AB16 RC40 -koekappaleista määritetyt S’ pysty ja S’ vaaka -jäykkyysmoduulit ja niiden välinen prosentuaalinen ero. Poissonin lukuna käytettiin arvoa 0,35.

Taulukko K.1. Referenssimassan (lisäsideaine B148) koekappaleiden epäsuorat jäykkyysmoduulit 10 °C:ssa.

Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
			1	2	3
<i>vrk</i>			1	2	3
1	S’ pysty	MPa	6513	7140	7193
	S’ vaaka	MPa	5752	6266	6047
	Ero	%	-11,7	-12,2	-15,9
7	S’ pysty	MPa	7809	7349	8590
	S’ vaaka	MPa	6869	6571	7527
	Ero	%	-12,0	-10,6	-12,4
28	S’ pysty	MPa	7927	7878	8860
	S’ vaaka	MPa	7157	7025	7966
	Ero	%	-9,7	-10,8	-10,1

Taulukko K.2. Biofluksilla elvytetystä massoista valmistettujen koekappaleiden epäsuorat jäykkyyshuomiot 10 °C:ssa sekoitustavoittain.

Sekoitustapa	Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
				1	2	3
	<i>vrk</i>					
Perinteinen	1	S' pysty	MPa	8611	9822	8996
		S' vaaka	MPa	7851	7408	8106
		Ero	%	-8,8	-24,6*	-9,9
Perinteinen	7	S' pysty	MPa	9782	9887	10436
		S' vaaka	MPa	8276	9068	9634
		Ero	%	-15,4	-8,3	-7,7
Perinteinen	28	S' pysty	MPa	10205	10749	11222
		S' vaaka	MPa	9811	10167	10698
		Ero	%	-3,9	-5,4	-4,7
Rouhe heti	1	S' pysty	MPa	9325	9056	10333
		S' vaaka	MPa	9184	8351	9364
		Ero	%	-1,5	-7,8	-9,4
Rouhe heti	7	S' pysty	MPa	9906	10021	10447
		S' vaaka	MPa	9411	9236	8515
		Ero	%	-5,0	-7,8	-18,5
Rouhe heti	28	S' pysty	MPa	11085	10523	11958
		S' vaaka	MPa	10512	11064	11076
		Ero	%	-5,2	5,1	-7,4
Rouhe 1 kk	1	S' pysty	MPa	9252	10214	11222
		S' vaaka	MPa	8279	9625	9960
		Ero	%	-10,5	-5,8	-11,2
Rouhe 1 kk	7	S' pysty	MPa	9775	10320	11431
		S' vaaka	MPa	8996	10005	10623
		Ero	%	-8,0	-3,1	-7,1
Rouhe 1 kk	28	S' pysty	MPa	9966	10835	11887
		S' vaaka	MPa	8747	10917	10662
		Ero	%	-12,2	0,8	-10,3

Taulukko K.3. Nytex 810:llä elvytetystä massoista valmistettujen koekappaleiden epäsuorat jäykkyyshmoduulit 10 °C:ssa sekoitustavoittain.

Sekoitustapa	Ikä <i>vrk</i>	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
				1	2	3
Perinteinen	1	S' pysty	<i>MPa</i>	4885	6573	9256
		S' vaaka	<i>MPa</i>	4203	5578	8399
		Ero	%	-14,0	-15,1	-9,3
Perinteinen	7	S' pysty	<i>MPa</i>	4950	6923	9802
		S' vaaka	<i>MPa</i>	4599	6117	8809
		Ero	%	-7,1	-11,6	-10,1
Perinteinen	28	S' pysty	<i>MPa</i>	5091	6229	8423
		S' vaaka	<i>MPa</i>	4362	5392	7951
		Ero	%	-14,3	-13,4	-5,6
Rouhe heti	1	S' pysty	<i>MPa</i>	5648	6575	6955
		S' vaaka	<i>MPa</i>	4904	5685	5893
		Ero	%	-13,2	-13,5	-15,3
Rouhe heti	7	S' pysty	<i>MPa</i>	6666	7810	7777
		S' vaaka	<i>MPa</i>	5835	6937	7197
		Ero	%	-12,5	-11,2	-7,5
Rouhe heti	28	S' pysty	<i>MPa</i>	6477	7503	7920
		S' vaaka	<i>MPa</i>	5943	6647	7413
		Ero	%	-8,2	-11,4	-6,4
Rouhe 1 kk	1	S' pysty	<i>MPa</i>	8686	8282	8614
		S' vaaka	<i>MPa</i>	8166	7999	6307
		Ero	%	-6,0	-3,4	-26,8*
Rouhe 1 kk	7	S' pysty	<i>MPa</i>	9689	9015	8705
		S' vaaka	<i>MPa</i>	9048	8559	8172
		Ero	%	-6,6	-5,1	-6,1
Rouhe 1 kk	28	S' pysty	<i>MPa</i>	8954	8970	8925
		S' vaaka	<i>MPa</i>	8521	8242	8160
		Ero	%	-4,8	-8,1	-8,6

Taulukko K.4. Nytex 820:llä elvytetystä massoista valmistettujen koekappaleiden epäsuorat jäykkyyshmoduulit 10 °C:ssa sekoitustavoittain.

Sekoitustapa	Ikä <i>vrk</i>	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
				1	2	3
Perinteinen	1	S' pysty	<i>MPa</i>	6505	7893	7141
		S' vaaka	<i>MPa</i>	5564	6685	6603
		Ero	%	-14,5	-15,3	-7,5
Perinteinen	7	S' pysty	<i>MPa</i>	8109	8029	7502
		S' vaaka	<i>MPa</i>	7471	7453	6963
		Ero	%	-7,9	-7,2	-7,2
Perinteinen	28	S' pysty	<i>MPa</i>	7963	8809	8090
		S' vaaka	<i>MPa</i>	7308	7836	7172
		Ero	%	-8,2	-11,0	-11,3
Rouhe heti	1	S' pysty	<i>MPa</i>	6925	7213	7972
		S' vaaka	<i>MPa</i>	6318	6557	6891
		Ero	%	-8,8	-9,1	-13,6
Rouhe heti	7	S' pysty	<i>MPa</i>	6888	7667	8132
		S' vaaka	<i>MPa</i>	6323	6835	7309
		Ero	%	-8,2	-10,9	-10,1
Rouhe heti	28	S' pysty	<i>MPa</i>	7736	8002	8879
		S' vaaka	<i>MPa</i>	6954	7033	7646
		Ero	%	-10,1	-12,1	-13,9
Rouhe 1 kk	1	S' pysty	<i>MPa</i>	8052	8143	7990
		S' vaaka	<i>MPa</i>	7369	8128	7322
		Ero	%	-8,5	-0,2	-8,4
Rouhe 1 kk	7	S' pysty	<i>MPa</i>	7379	8137	8475
		S' vaaka	<i>MPa</i>	6493	7526	7612
		Ero	%	-12,0	-7,5	-10,2
Rouhe 1 kk	28	S' pysty	<i>MPa</i>	7917	8569	8926
		S' vaaka	<i>MPa</i>	7082	7825	7813
		Ero	%	-10,5	-8,7	-12,5

Taulukko K.5. VI500:lla elvytetystä massoista valmistettujen koekappaleiden epäsuorat jäykkyyshäviöt 10 °C:ssa sekoitustavoittain.

Sekoitustapa	Ikä	Suure	Yks.	Rinnakkaisnäyte nro.		
				1	2	3
	<i>vrk</i>					
Perinteinen	1	S' pysty	MPa	8988	9262	9677
		S' vaaka	MPa	8456	8312	8736
		Ero	%	-5,9	-10,3	-9,7
Perinteinen	7	S' pysty	MPa	8882	9952	8840
		S' vaaka	MPa	8166	8901	7907
		Ero	%	-8,1	-10,6	-10,6
Perinteinen	28	S' pysty	MPa	8661	9993	10253
		S' vaaka	MPa	7754	8538	9783
		Ero	%	-10,5	-14,6	-4,6
Rouhe heti	1	S' pysty	MPa	8703	9788	10028
		S' vaaka	MPa	7759	8758	9387
		Ero	%	-10,8	-10,5	-6,4
Rouhe heti	7	S' pysty	MPa	9004	9503	10344
		S' vaaka	MPa	7752	8658	9438
		Ero	%	-13,9	-8,9	-8,8
Rouhe heti	28	S' pysty	MPa	9098	9910	9738
		S' vaaka	MPa	7942	8606	9229
		Ero	%	-12,7	-13,2	-5,2
Rouhe 1 kk	1	S' pysty	MPa	8196	8252	7761
		S' vaaka	MPa	7315	7442	6656
		Ero	%	-10,7	-9,8	-14,2
Rouhe 1 kk	7	S' pysty	MPa	7590	9499	9108
		S' vaaka	MPa	7465	8492	8309
		Ero	%	-1,6	-10,6	-8,8
Rouhe 1 kk	28	S' pysty	MPa	8299	8589	8296
		S' vaaka	MPa	7723	8184	7474
		Ero	%	-6,9	-4,7	-9,9

Liite L: Jaksollisen virumiskokeen tulokset ja koekappaleiden tiedot

Taulukko L.1. Laboratoriossa sekoitetun AB16 RC40 REF -massan kiertotiivistettyjen 150 mm koekappaleiden tiedot ja jaksollisen virumiskokeen tulokset 40 °C:ssa. Kulmakerroin kuvaa deformaationopeutta koekappaleessa tapahtuvan esitiivistymisen jälkeen.

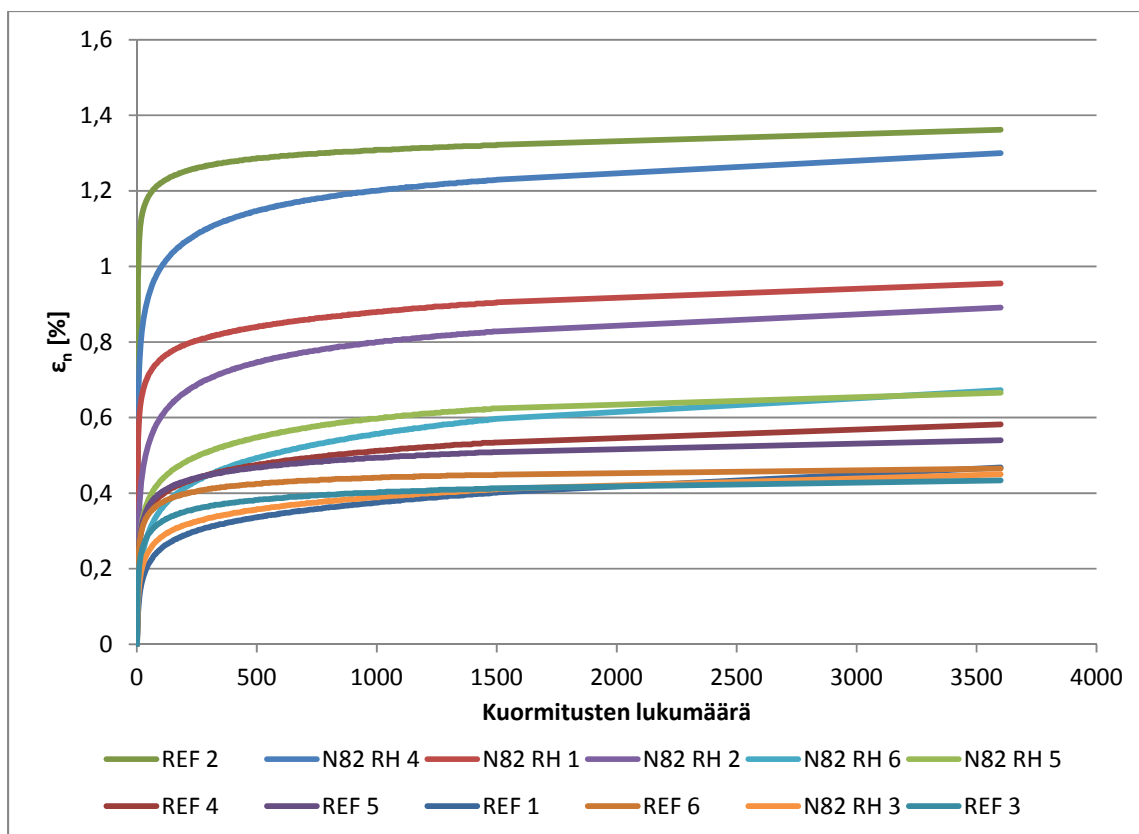
REF 150 mm	Koekappaleiden tilavuussuhteet				Jaksollisen virumiskokeen tulokset		
	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	ϵ_n	Kulmakerroin*
Rinnakkaisnäyte	kg/m ³	til.-%	til.-%	til.-%	vrk	%	
1	2449	1,1	14	90	4	0,468	3,14E-05
2	2456	0,8	14	90	4	1,362	1,91E-05
3	2456	0,9	14	90	4	0,434	1,00E-05
4	2453	1,0	14	90	32	0,582	2,29E-05
5	2453	1,0	14	90	32	0,540	1,48E-05
6	2462	0,6	15	89	32	0,465	7,62E-06
Keskiarvo	2455	0,9	14	90			
Keskihajonta	5	0,2	0	0			

*Kulmakerroin on laskettu syklien nro 1500 ja 3600 välille

Taulukko L.2. Laboratoriossa sekoitetun AB16 RC40 N82 RH -massan 150 mm, kiertotiivistettyjen koekappaleiden tiedot ja jaksollisen virumiskokeen tulokset 40 °C:ssa. Kulmakerroin kuvaa deformaationopeutta koekappaleessa tapahtuvan esitiivistymisen jälkeen.

N82 RH 150 mm	Koekappaleiden tilavuussuhteet				Jaksollisen virumiskokeen tulokset		
	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	ϵ_n	Kulmakerroin*
Rinnakkaisnäyte	kg/m ³	til.-%	til.-%	til.-%	vrk	%	
1	2457	0,2	14	91	4	0,955	2,38E-05
2	2451	0,4	15	94	4	0,891	3,00E-05
3	2447	0,6	15	92	4	0,450	1,86E-05
4	2446	0,7	15	91	32	1,300	3,33E-05
5	2448	0,6	14	90	32	0,666	2,00E-05
6	2447	0,6	15	92	32	0,673	3,62E-05
Keskiarvo	2449	0,5	15	92			
Keskihajonta	4	0,2	0	1			

*Kulmakerroin on laskettu syklien nro 1500 ja 3600 välille



Kuva L.1. Laboratoriossa sekoitetuista AB16 RC40 REF ja N82 RH -massoista kiertotiivistimellä valmistettujen koekappaleiden jaksollisen virumiskokeen muodonmuutoskuvaajat.

Taulukko L.3. Koekohteen AB16 RC40 -referenssimassasta kiertotiivistimellä valmistettujen 150 mm koekappaleiden tiedot ja jaksollisen virumiskokeen tulokset 40 °C:ssa. Kulmakerroin kuvaa deformaationopeutta koekappaleessa tapahtuvan esitiivistymisen jälkeen.

REF 150 mm	Koekappaleiden tilavuussuhteet				Jaksollisen virumiskokeen tulokset		
	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	VMA	VFA	Ikä	ϵ_n	Kulmakerroin*
Rinnakkaisnäyte	kg/m ³	til.-%	til.-%	til.-%	vrk	%	
1	2476	0,7	15	91	4	0,415	1,52E-05
2	2472	0,8	15	89	4	0,611	2,67E-05
3	2475	0,7	15	89	4	0,364	2,72E-05
Keskiarvo	2474	0,7	15	90		0,463	2,30E-05
Keskihajonta	2	0,1	0	1		0,130	6,79E-06

*Kulmakerroin on laskettu syklien nro 1500 ja 3600 välille

Taulukko L.4. Koekohteen AB16 RC40 BF4 -massasta valmistettujen 150 mm koekappaleiden tiedot ja jaksollisen virumiskokeen tulokset 40 °C:ssa. Kulmakerroin kuvaa deformaationopeutta koekappaleessa tapahtuvan esitiivistymisen jälkeen.

		Tiivistystapa				Koekappaleiden tilavuussuhteet			Jaksollisen virumiskokeen tulokset		
BF 4 150 mm		Päälysteen tiheys		Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	ϵ_n	Kulmakerroin*		
<i>Rinnakkaisnäyte</i>		<i>kg/m³</i>		<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>%</i>			
1	Kierto	2484	0,3	14	92	4	0,406	1,38E-05			
2	Kierto	2470	0,8	14	89	4	0,521	1,48E-05			
3	Kierto	2467	0,9	14	88	4	0,472	1,81E-05			
Keskiarvo		2474	0,7	14	89		0,466	1,56E-05			
Keskihajonta		9	0,3	0	2		0,058	2,25E-06			
4	Jyrä	2427	2,6	15	83	70	2,963	2,23E-04			
5	Jyrä	2445	1,8	15	87	70	3,125	1,61E-04			
6	Jyrä	2434	2,3	15	85	70	4,026	2,48E-04			
Keskiarvo		2435	2,2	15	85		3,371	2,11E-04			
Keskihajonta		9	0,4	0	2		0,573	4,48E-05			

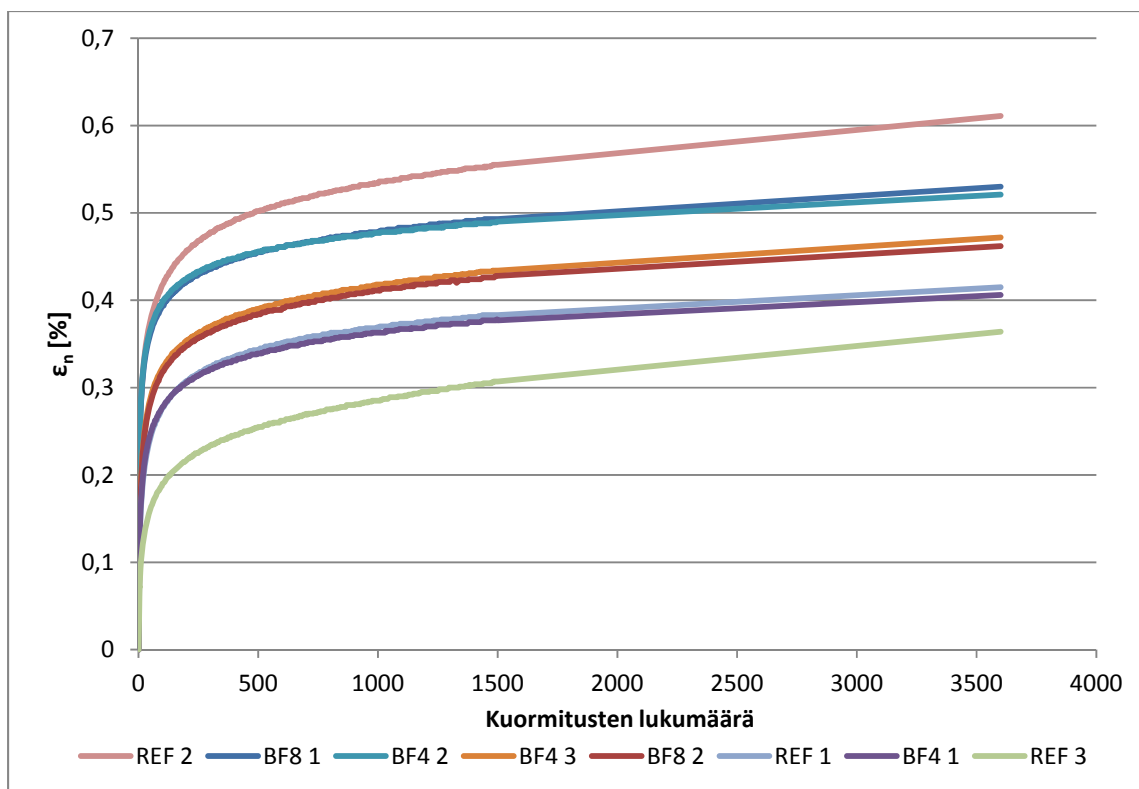
*Kulmakerroin on laskettu syklien nro 1500 ja 3600 välille

Taulukko L.5. Koekohteen AB16 RC40 BF8 -massasta valmistettujen 150 mm koekappaleiden tiedot ja jaksollisen virumiskokeen tulokset 40 °C:ssa. Kulmakerroin kuvaa deformaationopeutta koekappaleessa tapahtuvan esitiivistymisen jälkeen.

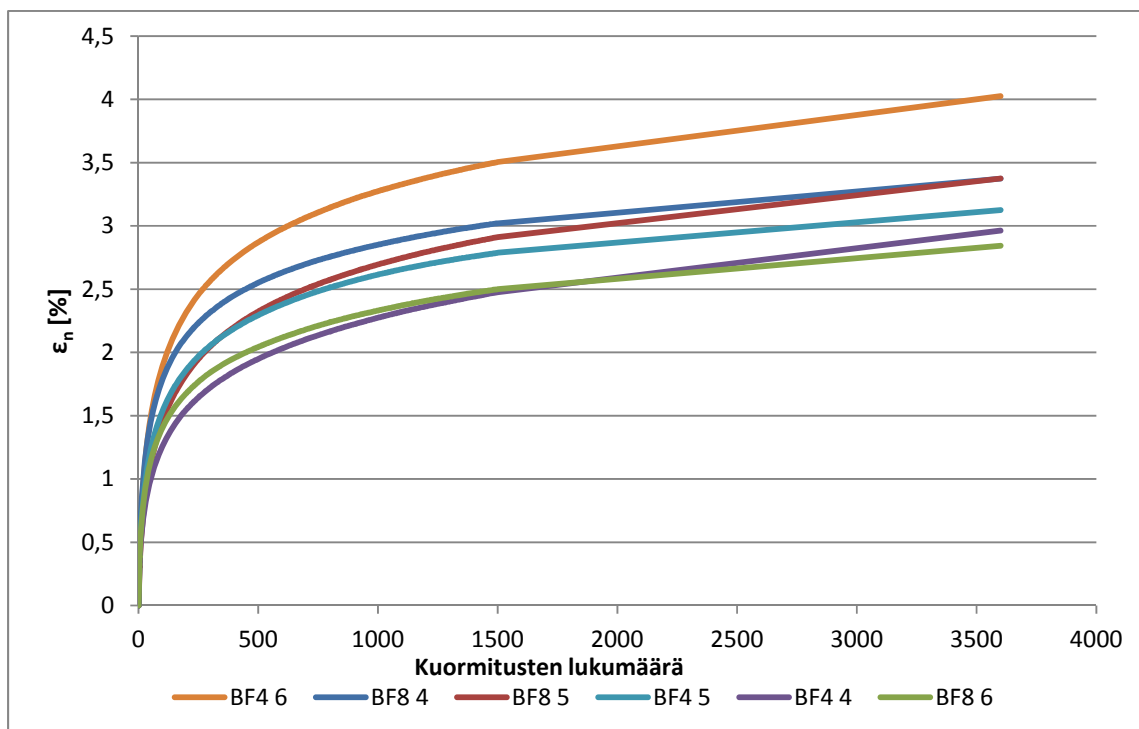
		Tiivistystapa				Koekappaleiden tilavuussuhteet			Jaksollisen virumiskokeen tulokset		
BF 8 150 mm		Päälysteen tiheys		Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	ϵ_n	Kulmakerroin*		
<i>Rinnakkaisnäyte</i>		<i>kg/m³</i>		<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>%</i>			
1	Kierto	2470	0,4	14	89	4	0,530	1,76E-05			
2	Kierto	2474	0,3	14	92	4	0,462	1,62E-05			
3	Kierto	2470	0,5	14	92	4	..**	..**			
Keskiarvo		2471	0,4	14	91		0,496	1,69E-05			
Keskihajonta		2	0,1	0	1		0,048	9,89E-07			
4	Jyrä	2443	1,5	14	89	70	3,374	1,68E-04			
5	Jyrä	2442	1,6	14	89	70	3,375	2,21E-04			
6	Jyrä	2437	1,8	14	88	70	2,844	1,64E-04			
Keskiarvo		2441	1,6	14	89		3,198	1,84E-04			
Keskihajonta		3	0,1	0	1		0,306	3,18E-05			

*Kulmakerroin on laskettu syklien nro 1500 ja 3600 välille

**Testi keskeytyi teknisten ongelmien takia



Kuva L.2. Koekohteen AB16 RC40 -massojen kiertotiivistettyjen koekappaleiden jaksollisen virumiskokeen muodonmuutoskuvaajat.



Kuva L.3. Koekohteen AB16 RC40 -massoista jyrällä tiivistetyistä laatoista porattujen koekappaleiden jaksollisen virumiskokeen muodonmuutoskuvaajat.

Liite M: Koekohteen AB16 RC 40 -koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet

Taulukko M.1. Koekohteen AB16 RC40 referenssimassasta kiertotiivistimellä valmistettujen koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet 10 ja 20 °C:ssa.

Koekohde REF	Koekappaleen tilavuussuhteet				Halkaisuvetolujuus			
	Rinnakkaisnäyte	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
		kg/m ³	til.-%	til.-%	til.-%	vrk	°C	kPa
1		2478	0,6	16	86	7	10	>2500
2		2474	0,8	16	85	7	10	>2500
3		2478	0,6	15	88	7	10	>2500
4		2471	0,9	16	86	7	20	1561
5		2475	0,7	16	82	7	20	1631
6		2477	0,6	15	87	7	20	1660
Keskiarvo		2475	0,7	16	86			1617
Keskihajonta		3	0,1	0	2			51

Taulukko M.2. Koekohteen AB16 RC40 BF4 -massasta valmistettujen koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet 10 ja 20 °C:ssa.

Koekohde BF4		Koekappaleen tilavuussuhteet				Halkaisuvetolujuus		
Rinnakkaisnäyte	Tiivistystapa	Päällysteen tiheys	Tyhjätila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
		kg/m ³	til.-%	til.-%	til.-%	vrk	°C	kPa
1	Kierto	2464	1,1	15	85	7	10	2552
2	Kierto	2468	0,9	15	85	7	10	2466
3	Kierto	2469	0,9	14	89	7	10	2516
4	Kierto	2460	1,2	16	80	7	20	1301
5	Kierto	2456	1,4	16	81	7	20	1381
6	Kierto	2468	0,9	15	83	7	20	1321
Keskiarvo		2464	1,1	15	84			1334*
Keskihajonta		5	0,2	1	3			42*
1	Jyrä	2445	1,8	15	87	70	20	701
2	Jyrä	2441	2,0	15	86	70	20	691
3	Jyrä	2442	2,0	15	86	70	20	625
4	Jyrä	2438	2,1	15	86	70	20	670
5	Jyrä	2443	1,9	15	87	70	20	753
Keskiarvo		2036	1,7	12	73			681
Keskihajonta		995	0,7	6	34			45

*20 °C:ssa halkaistut koekappaleet. 10 °C:ssa halkaistujen koekappaleiden hvl:n keskiarvo oli 2511 kPa ja keskihajonta 43 kPa.

Taulukko M.3. Koekohteen AB16 RC40 BF8 -massasta valmistettujen koekappaleiden tilavuussuhteet ja halkaisuvetolujuudet 10 ja 20 °C:ssa.

Koekohte BF8		Koekappaleen tilavuussuhteet				Halkaisuvetolujuus		
Rinnakkaisnäyte	Tiivistystapa	Päällysteen tiheys	Tyhjättila	VMA	VFA	Ikä	Lämpötila	HVL
		<i>kg/m³</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>til.-%</i>	<i>vrk</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>
1	Kierto	2462	0,7	15	86	7	20	2058
2	Kierto	2463	0,7	15	86	7	20	2113
3	Kierto	2470	0,5	14	88	7	20	2401
4	Kierto	2478	0,1	14	94	7	20	-*
5	Kierto	2460	0,9	14	89	7	20	2292
6	Kierto	2463	0,7	14	88	7	20	2470
Keskiarvo		2466	0,6	14	88			2267
Keskihajonta		7	0,3	0	3			179
1	Jyrä	2444	1,5	14	89	70	20	580
2	Jyrä	2444	1,5	14	89	70	20	509
3	Jyrä	2450	1,2	14	91	70	20	538
4	Jyrä	2453	1,1	14	92	70	20	581
5	Jyrä	2441	1,6	14	89	70	20	587
Keskiarvo		2040	1,2	12	76			559
Keskihajonta		996	0,5	6	36			34

*Määrittäminen epäonnistui

Liite N: Lämpötilakorjauskertoimen määrittäminen

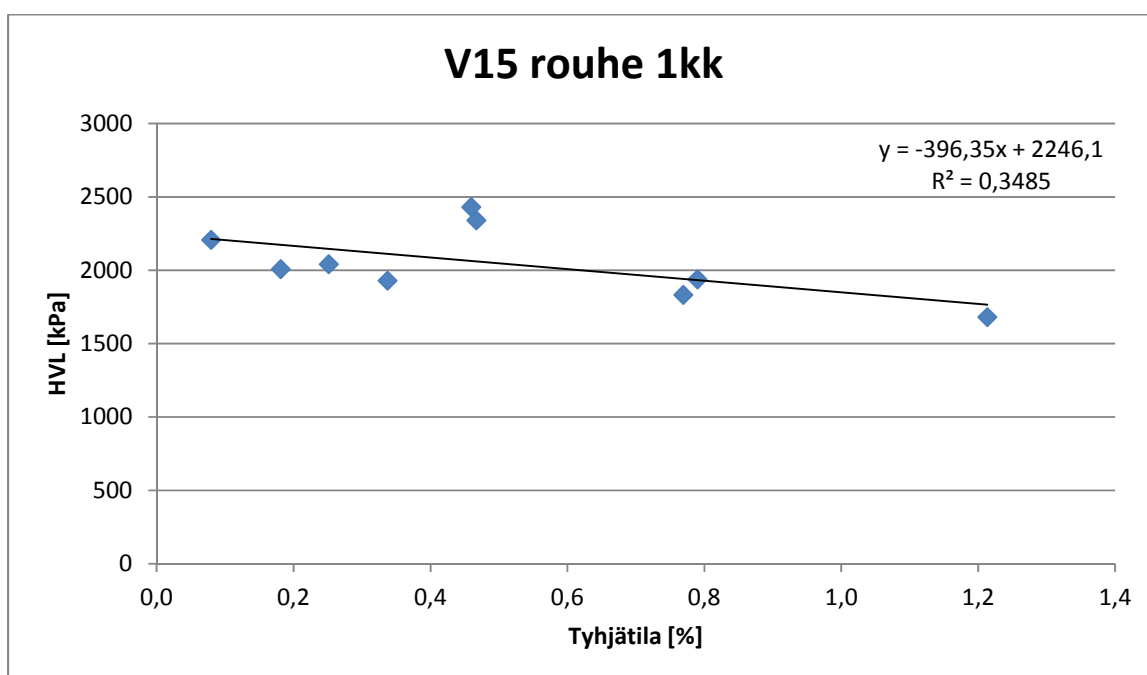
Halkaisuvetolujuuskokeiden tuloksille määritettiin lämpötilakorjauskerroin, jolla 20 °C:ssa saadut tulokset voitiin muuttaa vastaamaan lujuuksia 10 °C:n lämpötilassa. Määrittämisessä käytettiin koekohteen AB16 RC40 BF4 -koekappaleiden halkaisuvetolujuuksia. Kuudesta rinnakkaiskappaleesta 3 halkaistiin 10 °C:n ja loput 3 20 °C:n lämpötilassa. Korjauskerroin laskettiin näiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvojen suhteena (taulukko N.1).

Taulukko N.1. Lämpötilakorjauskertoimen määrittämiseen käytetyt halkaisuvetolujuudet.

BF4	10 °C	20 °C	Keskiarvojen suhde
	<i>kPa</i>	<i>kPa</i>	
	2552	1301	
	2466	1381	
	2516	1321	
Keskiarvo	2511	1334	= 1,9

Liite O: Tyhjätilakorjausten periaate

Koekappaleiden halkaisuvetolujuuksille ja epäsuorille jäykkyysmoduuleille tehtiin tyhjätilakorjaus, jos massasta valmistettujen koekappaleiden tyhjätila poikkesi kaikkien koekappaleiden keskiarvosta enemmän kuin 0,5 % -yksikköä. Halkaisuvetolujuustuloksien tyhjätilakorjaukseen käytettiin yksinkertaista lineaarista regressiota, jossa koekappaleiden halkaisuvetolujuuksien ja tyhjätilojen välistä suhdetta kuvattiin lineaarisen mallin avulla. Tyhjätilakorjauskertoimenä käytettiin suoran kulmakerrointa. AB16 RC40 -massoille tyhjätilakorjauskerroin määritettiin massakohtaisesti (esimerkkinä kuva O.1). AB8 RC40 -massoille muodostettiin yksi yhteinen korjauskerroin.



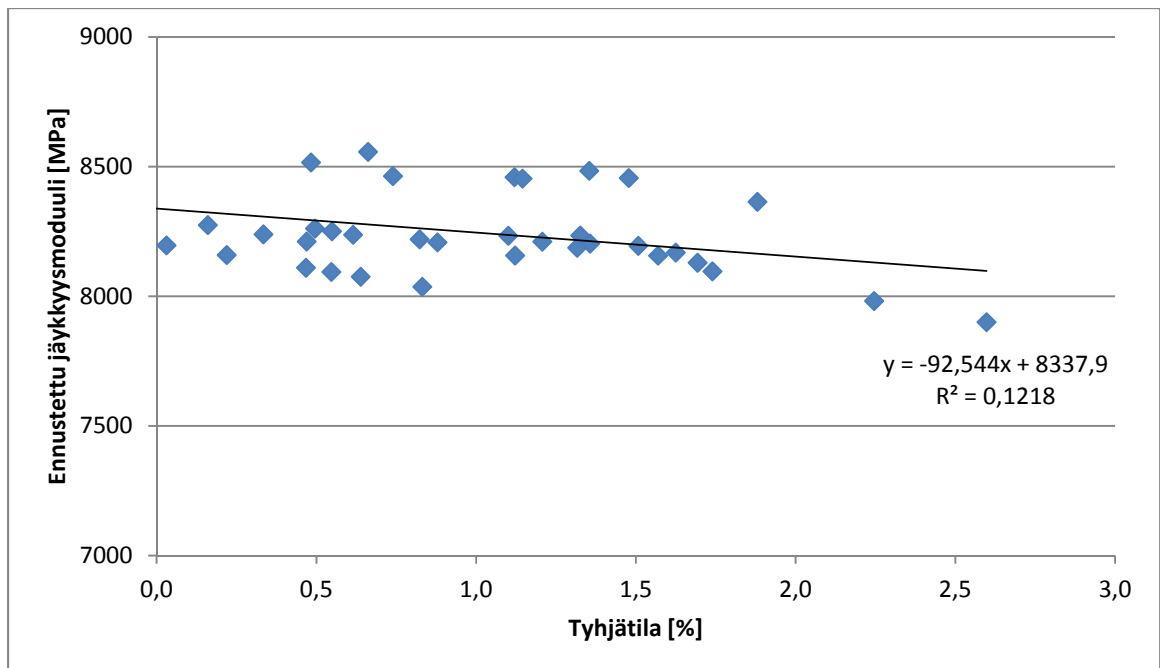
Kuva O.1. Tyhjätilakorjauskertoimen muodostaminen V15 rouhe 1kk -koekappaleiden halkaisuvetolujuuksille.

Epäsuoran jäykkyysmoduulin tulosten tyhjätilakorjauskertoimen määrittämisessä käytettiin apuna kaavojen (O.1) ja (O.2) mukaista Hirschin mallia (Christensen ym. 2003). Malliin syötettiin koekappaleiden tilavuussuhteet ja sideaineen jäykkyys, joka saatiin sideaineiden DSR-mittausten tuloksista. Mallin antamien tulosten pohjalta piirrettiin tyhjätilan vaikutusta jäykkyysmoduulin arvoon ilmentävät kuvaajat. Koko aineisto on esitetty kuvassa O.2. Aineisto jaettiin massa- tai elvytinkohtaisiin osiin, siten että tyhjätilan ja jäykkyysmoduulin välille löydettiin hyvä selitysaste. Tyhjätilan korjauskertoimenä käytettiin lineaarisen regressiosuoran kulmakerrointa.

$$|E^*|_{mix} = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{binder} \left(\frac{VFA \times VMA}{10000} \right) \right] + (1 - P_c) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{3VFA|G^*|_{binder}} \right]^{-1} \quad (O.1)$$

jossa: $|E^*|_{mix}$ on dynaaminen moduuli [psi]
 P_c kiviainesrakeiden välinen kontakti, osana tilavuudesta
 VMA kiviaineksen tyhjätila [%]
 $|G^*|_{binder}$ sideaineen kompleksinen leikkausmoduuli [psi]
 VFA tyhjätilan täyttöaste [%]

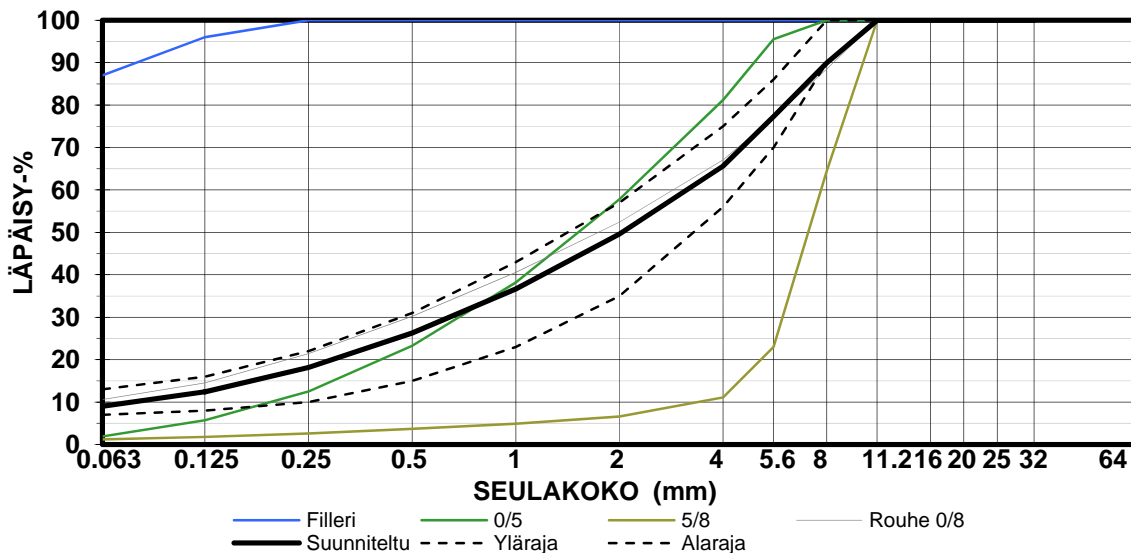
$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA \times 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \times 3|G^*|_{binder}}{VMA} \right)^{0.58}} \quad (O.2)$$



Kuva O.2. Tyhjättilakorjauskertoimen muodostaminen jäykkysmoduulin arvoille Hirschin mallin avulla

Liite P: Uusioasfalttimassojen suunnittelu

AB8 RC40 massojen suunnittelu:



Seula	AB 8 Alaraja	Seossuhteet:		100,0 %	2,0 %	2 %	40 %	16 %	40 %
		AB 8 Yläraja	Suunniteltu	Filleri	< 0,063	0/5	5/8	Rouhe 0/8	
0,063	5	10	9,0	87,0	100,0	1,9	1,2	10,6	
0,125	6	15	12	96	100	6	2	15	
0,25	8	20	18	100	100	13	3	21	
0,5	11	27	26	100	100	23	4	30	
1	16	34	37	100	100	38	5	41	
2	24	46	50	100	100	58	7	52	
4	36	59	66	100	100	81	11	67	
5,6	44	66	77	100	100	96	23	77	
8	56	75	90	100	100	100	64	89	
11,2	70	85	100	100	100	100	100	100	
16	90	100	100	100	100	100	100	100	
20	100	100	100	100	100	100	100	100	
25	100	100	100	100	100	100	100	100	

Taulukko P.1. Esimerkkisuunnittelu: Nytex 820:lla elytetty AB8 RC40 -massa, 20 kg

Lähtötiedot:

- Sideainepitoisuus	5,9 massa- %
- RC-%	40 massa- %
- Rouheen sideainepitoisuus	4,5 massa- %

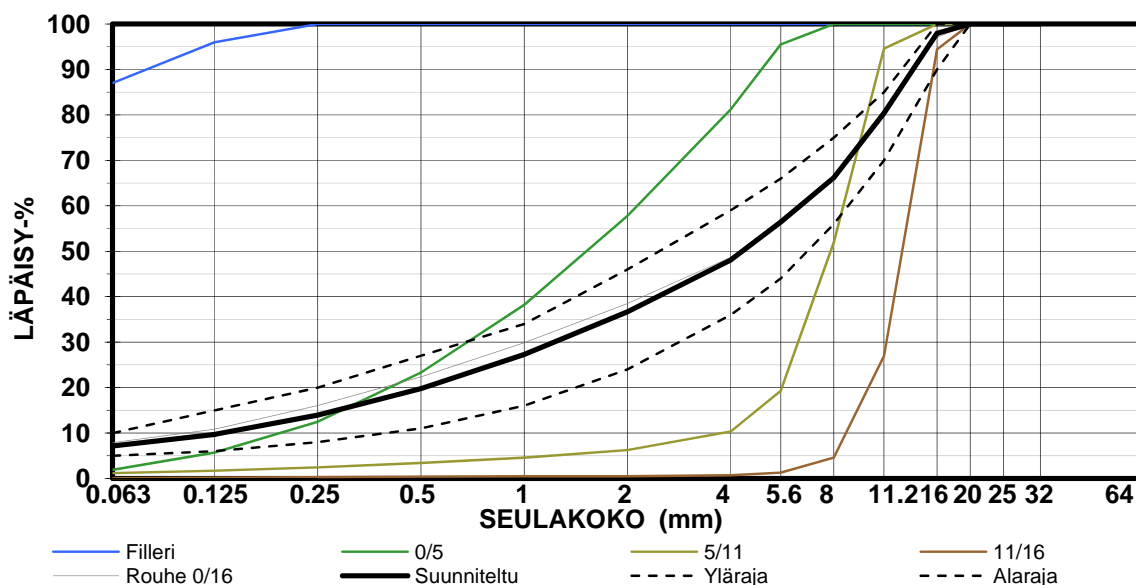
Kiviaines

- rouheen kiviaines	7,6 kg
- lisäkiviaines	11,2 kg
Yhteensä	18,8 kg

Sideaine

- rouheen sideaine	0,36 kg
- elvytin Nytex 820	61 g
- lisäsideaine 70/100	0,759 kg
Yhteensä	1,18 kg = 5,9 massa- %

AB16 RC40 -massan suunnittelu:



Seula	Seossuhteet:		100,0 %	2 %	2 %	28 %	12 %	16 %	40 %
	AB 16 Alaraja	AB 16 Yläraja	Suunniteltu	Filleri	< 0,063	0/5	5/11	11/16	Rouhe 0/16
0,063	5	10	7,1	87,0	100,0	1,9	1,2	0,1	7,9
0,125	6	15	10	96	100	6	2	0	11
0,25	8	20	14	100	100	13	2	0	16
0,5	11	27	20	100	100	23	3	0	22
1	16	34	27	100	100	38	5	1	30
2	24	46	37	100	100	58	6	1	38
4	36	59	48	100	100	81	10	1	49
5,6	44	66	56	100	100	96	19	1	56
8	56	75	66	100	100	100	52	5	67
11,2	70	85	80	100	100	100	95	27	81
16	90	100	98	100	100	100	100	94	97
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Taulukko P.2. Esimerkkisuunnittelu: Nytex 820:lla elytetty AB16 RC40 -massa, 30 kg

Lähtötiedot:

- Sideainepitoisuus	5,5 massa-%
- RC-%	40 massa-%
- Rouheen sideainepitoisuus	4,0 massa-%

Kiviaines

- rouheen kiviaines	11,5 kg
- lisäkiviaines	16,9 kg
Yhteensä	28,4 kg

Sideaine

- rouheen sideaine	0,48 kg
- elvytin Nytex 820	81 g
- lisäsideaine 70/100	1,09 kg
Yhteensä	1,65 kg = 5,5 massa-%

Liite Q: Uusioasfalttimassojen sideainepitoisuudet ja maksimitiheydet

Taulukko Q. 1. Uusiomassojen massan tiheydet ja sideainepitoisuudet.

		Massan tiheys			Sideainepitoisuus		
		Määritys 1	Määritys 2	Keskiarvo	Määritys 1	Määritys 2	Keskiarvo
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	massa- %	massa- %	massa- %
AB8 RC40 laboratoriossa sekoitetut	BF Perint	2449	2446	2448	6,1	6,1	6,1
	BF Koost	2445	2442	2443	6,1	6,2	6,1
	N82 Perint	2461	2469	2465	6,0	6,1	6,0
	N82 Koost	2450	2444	2447	5,9	6,0	5,9
AB16 RC40 Laboratoriossa sekoitetut	REF*	2449	2449	2449	5,3	5,6	5,5
	REF 150 mm*	2480	2474	2477	5,3	5,4	5,4
	BF Perint	2479	2470	2475	5,4	5,3	5,4
	BF RH	2487	2471	2479	5,3	5,3	5,3
	BF 1kk	2488	2464	2475	5,4	5,6	5,5
	N81 Perint	2480	2490	2485	5,2	5,3	5,3
	N81 RH	2445	2474	2459	5,6	5,5	5,6
	N81 1kk	2466	2462	2464	5,5	5,2	5,4
	N82 Perint	2453	2463	2458	5,4	5,8	5,6
	N82 RH	2459	2457	2458	5,3	5,4	5,4
	N82 RH 150 mm	2446	2479	2462	5,6	5,6	5,6
	N82 1kk	2452	2462	2457	5,8	5,4	5,6
	V15 Perint	2489	2462	2476	5,2	5,6	5,4
	V15 RH	2474	2457	2466	5,4	5,4	5,4
	V15 1kk	2453	2445	2449	5,7	5,8	5,8
AB16 RC40 koekohde, asemalla sekoitetut	REF*	2492	2494	2493			5,6**
	BF4	2489	2493	2491			5,3**
	BF8	2480	2482	2481			5,3**

*Valmistettu käyttämällä elvyttimenä pehmeämpää bitumilaatua

**Tiedot saatu NCC Roadsilta