

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ravnikar Turk, M., 2016. Vpliv laboratorijsko simuliranega staranja bitumnov na njihove lastnosti pri nizkih temperaturah. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Tušar, M.): 71 str.

Datum arhiviranja: 27-07-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ravnikar Turk, M., 2016. Vpliv laboratorijsko simuliranega staranja bitumnov na njihove lastnosti pri nizkih temperaturah. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Tušar, M.): 71 pp.

Archiving Date: 27-07-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**PODIPLOMSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
PROMETNA SMER**

Kandidatka:

MOJCA RAVNIKAR TURK

**VPLIV LABORATORIJSKO SIMULIRANEGA
STARANJA BITUMNOV NA NJIHOVE LASTNOSTI PRI
NIZKIH TEMPERATURAH**

Magistrsko delo št.: 259

**THE IMPACT OF LABORATORY SIMULATED AGING
ON BITUMEN PROPERTIES AT LOW
TEMPERATURES**

Graduation – Master Thesis No.: 259

Mentor:
doc. dr. Marjan Tušar

Predsednik komisije:
prof. dr. Goran Turk

Somentor:
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 12. 07. 2016

Popravki

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Spodaj podpisana študentka **Mojca Ravnikar Turk**, vpisna številka **26106312**, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Vpliv laboratorijsko simuliranega staranja bitumnov na njihove lastnosti pri nizkih temperaturah**

IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobila vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označila
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnala v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobila soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, 2. 7. 2016

Podpis: _____

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	001.891.53:622.337(497.4)(043)
Avtor:	Mojca Ravnikar Turk
Mentor:	dr. Marjan Tušar
Somentor:	izr. prof. dr. Janko Logar
Naslov:	Vpliv laboratorijsko simuliranega staranja bitumnov na njihove lastnosti pri nizkih temperaturah
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	71 str., 20 pregl., 56 sl., 22 en.
Gljučne besede:	bitumni, staranje bitumnov, nizke temperature, BBR, DSR

Izvleček

Laboratoriji za asfalte in bitumne po vsem svetu raziskujejo vpliv nizkih temperatur na razpoke v asfaltu. Za ugotavljanje karakteristik se izvajajo različni preskusi. Odpornost asfalta proti razpokam pri nizkih temperaturah je odvisna predvsem od karakteristik uporabljenega bitumna. Če poznamo karakteristike bitumna pri nizkih temperaturah, je možno predvideti obnašanje asfalta pri nizkih temperaturah. Za ugotavljanje karakteristik bitumna pri nizkih temperaturah se že dolgo časa uporablja preiskava pretrgališča po Fraass-u, ki pa ima več pomanjkljivosti. Zato je bila razvita nova preiskava – ugotavljanje upogibne togosti (BBR). Ta preiskava je standardizirana, vendar se ne uporablja pogosto. Cestogradbeni bitumen B 70/100, ki se uporablja v Sloveniji za proizvodnjo asfalta, še ni bil preiskan s to metodo.

V magistrskem delu smo predstavili rezultate preiskav šestih vzorcev bitumna B 70/100. Namen raziskav je bil ugotoviti vpliv kratkotrajnega in dolgotrajnega staranja na ta bitumen ter predlagati merila za vrednotenje kakovosti bitumna, ki temeljijo na rezultatih izvedenih preskusov. Na nestaranih vzorcih bitumna smo najprej izvedli običajne preiskave (penetracija, temperatura zmehčišča, temperatura pretrgališča po Fraass-u) ter dodatni preiskavi BBR in dinamični strižni reometer (DSR). Vzorce teh bitumnov smo nato laboratorijsko kratkotrajno starali z metodo Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) in ponovili vse preiskave. V zadnjem koraku smo vseh šest vzorcev dolgotrajno starali po metodi Pressure Ageing Vessel (PAV) ter jih ponovili. Dobljene rezultate smo v nalogi predstavili, jih analizirali in ocenili temperaturno območje uporabe šestih vzorcev bitumna B 70/100.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 001.891.53:622.337(497.4)(043)
Author: Mojca Ravnikar Turk, B. Sc.
Supervisor: Marjan Tušar, Ph.D.
Co-supervisor: Assoc. Prof. Janko Logar, Ph.D.
Title: The impact of laboratory simulated aging on bitumen properties at low temperatures
Type of document: M. Sc. Thesis.
Notes: 71 p., 20 tab., 56 fig., 22 eq.
Key words: bitumens, bitumen aging, low temperatures, BBR, DSR

Abstract

Research into the low temperature cracking in asphalt pavements is an important priority in asphalt laboratories worldwide. In such laboratories the low temperature cracking process is simulated on asphalt samples using several different types of tests. Due to the fact that the resistance of asphalt to low temperature cracking depends mainly on the used bitumen, it is assumed that this process can be indirectly predicted with knowledge about the realistic low temperature properties of bitumen. For many years the properties of bitumen at low temperatures have been determined based on the Fraass fracture temperatures. Since the Fraass breaking point test has several shortcomings, additional parameters like stiffness and creep rate were introduced in the Bending Beam Rheometer (BBR) method, which has been standardized but it is still not widely used. The characteristics of B 70/100, which is frequently used in Slovenia for asphalt production, has not been yet tested by this method.

In the master's thesis six samples of bitumen B 70/100 were extensively tested. The purpose of the study was to determine the impact of aging on the paving grade bitumen B 70/100 used in our region, and to propose criteria for bitumen quality based on evaluation of obtained test results. On neat bitumen the usual scope of bitumen tests (R&B, Penetration, Fraass) was performed as well as BBR and Dynamic Shear Rheometer (DSR) tests. These bitumens have been artificially aged with Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) method and all tests were repeated on short term aged bitumens. In the last step the six bitumens have been artificially aged with RTFOT and Pressure Ageing Vessel (PAV) method and then re-tested. In the thesis, the sensitivity to laboratory aging for six different samples of B 70/100 bitumens is presented and analyzed. The lowest and the highest ambient temperatures suitable for the six samples of B 70/100 were determined.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Marjanu Tušarju za strokovne nasvete, zanimive debate, pomoč in vso dobro energijo.

Za dolgoletno podporo, prosti čas, prijazne spodbude in veliko mero potrpljenja se posebno zahvaljujem somentorju izr. prof. dr. Janku Logarju.

Iskreno se zahvaljujem tudi sodelavcem iz Laboratorija za asfalte in bitumne na ZAG Ljubljana predvsem ga. Dušanki Bohinc, g. Aleksandru Ipavcu ter g. Milošu Kmetu za veliko pomoč pri laboratorijskem delu magistrske naloge. Prav tako se zahvaljujem drugim sodelavcem z ZAG Ljubljana, ki so mi raziskovalno delo omogočili. Posebna zahvala gre našima fotografoma Matjažu Zupancu in Mojci Mušič za slike laboratorijske opreme.

Zahvaljujem se tudi svoji družini za podporo in hčerkama Nini in Petri za pomoč.

Zahvaljujem se kolegom z DARS, DRI, DRSI, strokovnjakom z Zveze asfalterjev Slovenije, predstavnikom izvajalcev asfalterskih del ter vsem drugim, ki so naklonjeni trajnostnemu razvoju slovenskih cest in se zavedajo, da je za razvoj na področju asfaltov potrebno raziskovalno delo.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Predstavitev problema	1
1.2	Uporabljena metodologija	2
2	LASTNOSTI BITUMNOV IN LABORATORIJSKE PREISKAVE	4
2.1	Uvod	4
2.2	Osnovne lastnosti bitumnov	5
2.2.1	Penetracija po SIST EN 1426	5
2.2.2	Zmehčišče po metodi prstan - kroglica po SIST EN 1427	6
2.2.3	Pretrgališče po Fraass-u po SIST EN 12593	6
2.2.4	Indeks penetracije IP	7
2.2.5	Območje plastičnosti	8
2.3	Postopki laboratorijskega staranja	10
2.3.1	Kratkotrajno staranje - RTFOT po SIST EN 12607-1	11
2.3.2	Pospešeno staranje - PAV po SIST EN 14769	12
2.4	Določevanje karakteristik bitumnov pri nizkih temperaturah	14
2.4.1	BBR - ugotavljanje upogibne togosti po SIST EN 14771	14
2.4.2	DSR - kompleksni strižni modul po standardu SIST EN 14770	19
2.5	Odpornost asfalta pri nizkih temperaturah	23
2.5.1	Korelacije med karakteristikami bitumna in asfalta pri nizkih temperaturah	26
3	REZULTATI PREISKAV CESTOGRADBENIH BITUMNOV B 70/100	28
3.1	Izbira vzorcev	29
3.2	Zahteve za lastnosti bitumna B 70/100 v slovenskih standardih	30
3.3	Zahteve za lastnosti bitumnov, podane v AASHTO M 320-10	31
3.4	Penetracija	32
3.5	Zmehčišče PK	33
3.6	Pretrgališče po Fraassu	35
3.7	DSR - kompleksni strižni modul in fazni kot	36
3.8	Upogibna togost	38
3.8.1	Nestarani bitumni	38
3.8.2	Kratkotrajno starani bitumni	40
3.8.3	Dolgotrajno starani bitumni	41
4	ANALIZA LASTNOSTI STARANIH BITUMNOV B 70/100	44
4.1	Temperaturne obremenitve bitumnov	44
4.2	Pregled rezultatov preiskav	48
4.3	Ugotovljene korelacije s preiskavo pretrgališča Fraass	52
4.3.1	Preiskave pretrgališča po Fraass-u in BBR	52
4.3.2	Preiskave pretrgališča po Fraass-u in DSR	56
4.4	Najnižja temperatura uporabe bitumna B 70/100 po AASHTO	57
4.5	Najvišja temperatura uporabe B 70/100 po AASHTO	59

5	ZAKLJUČKI.....	61
5.1	Povzetek rezultatov preiskav	61
5.2	Ugotovljene korelacije.....	63
5.3	Ocena temperaturnega območja uporabe bitumnov B 70/100	64
5.4	Predlog kriterijev za bitumne B 70/100.....	66

KAZALO SLIK

Slika 1-1	Shematski prikaz metodologije dela	3
Slika 2-1	Določanje penetracije z iglo (laboratorij ZAG Ljubljana).....	5
Slika 2-2	Določanje zmečičišča - metoda prstana in kroglice (laboratorij ZAG Ljubljana).....	6
Slika 2-3	Določanje pretrgališča po Fraass-u (laboratorij ZAG Ljubljana)	7
Slika 2-4	Indeks penetracije za vzorce B 70/100 preiskane v obdobju 2001-2015	8
Slika 2-5	Območje plastičnosti za B 70/100 preiskane v obdobju 2001-2015.....	9
Slika 2-6	Ciklične dnevne in letne temperaturne obremenitve izbranega vozišča.....	10
Slika 2-7	RTFOT Določanje odpornosti proti otrjevanju pod vplivom toplote in zraka.....	11
Slika 2-8	PAV pospešeno staranje v komori	13
Slika 2-9	PAV odstranjevanje zračnih mehurčkov	13
Slika 2-10	Ugotavljanje upogibne togosti z BBR po SIST EN 14771	14
Slika 2-11	Shematski prikazal obremenjevanja	15
Slika 2-12	Sprememba togosti v času.....	16
Slika 2-13	Določanje $T_{(m)60}$ ter $T_{(S)60}$ po dveh kriterijih (preiskava BBR).....	17
Slika 2-14	Dinamični strižni reometer (laboratorij ZAG Ljubljana).....	19
Slika 2-15	Definicija faznega zamika [36].....	20
Slika 2-16	Spreminjanje G^* in δ v odvisnosti od temperature preiskave	21
Slika 2-17	Določitev kritične temperature $T_{krit N}$	22
Slika 2-18	Prizmatični preskušanci in komora za preskušanje (laboratorij ZAG)	23
Slika 2-19	Rezultati ohlajevalnega preskusa in enosnih nateznih preskusov	24
Slika 2-20	Grafični prikaz rezultatov preiskave odpornosti asfalta na nizke temperature	25
Slika 2-21	Odvisnost med $T_{(m,S)mejna}$ (BBR) in $T_{failure}$ (TSRST).....	27
Slika 3-1	Primerjava osnovnih lastnosti standardiziranih bitumnov po proizvodnji.....	28
Slika 3-2	Rezultati - penetracija pri 25°C	32
Slika 3-3	Ohranjena vrednost penetracije po RTFOT (2004-2015).....	33
Slika 3-4	Rezultati - zmečičišče – T_{PK}	33
Slika 3-5	Ohranjena vrednost zmečičišča T_{PK} po RTFOT	34
Slika 3-6	Rezultati - pretrgališče po Fraassu	35
Slika 3-7	Rezultati DSR na dolgotrajno staranih vzorcih 1 do 6.....	37
Slika 3-8	Nestarani bitumen - togost S_{60} za vzorce 1 do 6.....	38
Slika 3-9	Nestarani bitumen - vrednost m_{60} za vzorce 1 do 6	39
Slika 3-10	Kratkotrajno starani bitumen - togost S_{60} za vzorce 1 do 6	40
Slika 3-11	Kratkotrajno starani bitumen - vrednost m_{60} za vzorce 1 do 6	41
Slika 3-12	Dolgotrajno starani bitumen - togost S_{60} za vzorce 1 do 6	42
Slika 3-13	Dolgotrajno starani bitumen - vrednost m_{60} za vzorce 1 do 6.....	43
Slika 4-1	Absolutna najnižja temperatura zraka s povratno dobo 50 let [33].....	44
Slika 4-2	Absolutna najvišja temperatura zraka s povratno dobo 50 let [34].....	44
Slika 4-3	Temperaturne spremembe vozišča na mostu čez Muro [28]	45

Slika 4-4 Dnevne temperaturne spremembe vozišča v poletnem času [28].....	46
Slika 4-5 Dnevne temperaturne spremembe vozišča v zimskem času [28]	46
Slika 4-6 Primer neustrezne zlepljenosti asfaltnih plasti in mrežaste razpoke vozišča	47
Slika 4-7 Sprememba karakteristik bitumna B 70/100 zaradi staranja	49
Slika 4-8 Spreminjanje mejnih temperatur B 70/100 z laboratorijskim staranjem.....	50
Slika 4-9 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za nestarani bitumen	52
Slika 4-10 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za kratkotrajno starani bitumen.....	53
Slika 4-11 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za dolgotrajno starani bitumen	54
Slika 4-12 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za nestaran bitumen (vir [16]).....	55
Slika 4-13 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za dolgotrajno starani bitumen (vir [16])	55
Slika 4-14 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{krit N}$ za dolgotrajno starani bitumen	56
Slika 4-15 Sprememba karakteristik bitumna B 70/100 pri visokih temperaturah	59
Slika 4-16 Sprememba penetracije in zmehčišča B 70/100 pri visokih temperaturah	60
Slika 5-1 Spremembe karakteristik bitumna B 70/100 z laboratorijskim staranjem	62
Slika 5-2 Korelacija med T_{Fraass} in $T_{krit N}$ za B 70/100.....	63
Slika 5-3 Korelacija med T_{Fraass} in mejno vrednostjo glede na kriterij utrujanja $T_{krit N}$	64
Slika 5-4 Ocena temperaturnega območja uporabe glede na kriterij BBR (AASHTO)	65
Slika 5-5 Ocena temperaturnega območja uporabe glede na kriterij DSR in BBR (AASHTO)	66

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1-1 Pregled izvedenih laboratorijskih preiskav.....	3
Preglednica 3-1 Pregled izvedenih laboratorijskih preiskav.....	29
Preglednica 3-2 Laboratorijske oznake vzorcev preiskanih bitumnov.....	29
Preglednica 3-3 Zahteve za lastnosti bitumna B 70/100.....	30
Preglednica 3-4 Zahteve podane v AASHTO M 320 [12] za PG 58-22.....	31
Preglednica 3-5 Zahteve podane v AASHTO M 320 [12] za PG 64-16.....	31
Preglednica 3-6 Zahteve za karakteristike bitumnov - penetracija.....	32
Preglednica 3-7 Zahteve za karakteristike bitumnov - T_{PK}	34
Preglednica 3-8 Zahteve za karakteristike bitumnov - T_{Fraass}	35
Preglednica 3-9 Rezultati preiskave DSR na dolgotrajno staranih vzorcih	36
Preglednica 4-1 Rezultati izvedenih preiskav na šestih vzorcih bitumna B 70/100	48
Preglednica 4-2 Karakteristike bitumna B 70/100 pomembne pri nizkih temperaturah	51
Preglednica 4-3 Rezultati preiskav nestaranega bitumna B 70/100.....	52
Preglednica 4-4 Rezultati preiskav kratkotrajno staranega bitumna B 70/100	53
Preglednica 4-5 Rezultati preiskav dolgotrajno staranega bitumna B 70/100	53
Preglednica 4-6 Rezultati preiskav nestaranega bitumna [16].....	54
Preglednica 4-7 Rezultati preiskav dolgotrajno staranega bitumna [16]	55
Preglednica 4-8 Najnižje temperature uporabe z upoštevanjem AASHTO M 320 [12]	57
Preglednica 4-9 Določite mejnih vrednosti za dolgotrajno starani bitumen	58
Preglednica 5-1 Predlog kriterijev za B 70/100 po laboratorijskem staranju	67

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

RTFOT	»Rolling Thin Film Oven Test«; simulacija kratkotrajnega staranja bitumna
PAV	»Pressure Ageing Vessel«; simulacija dolgotrajnega staranja bitumna
TSRST	»Thermal Stress Restained Specimen Test«; ohlajevalni preskus
UTST	»Uniaxial Tension Stress Test«; enoosni natezni preskus
DSR	»Dynamic Shear Rheometer«; dinamični strižni reometer
BBR	»Bending Beam Rheometer«; reometer z upogibno obremenitvijo
MSCRT	»Multiple Stress Creep and Recovery Test«; Preskus lezenja s ponavljajočo obremenitvijo in povratkom
RTFOT+PAV	dolgotrajno staranje bitumnov - simulacija kratkotrajnega in pospešenega staranja bitumna (po metodah RTFOT+PAV)
EAPA	European Asphalt Pavement Association
TSC	Tehnične specifikacije za ceste TSC 06.300/06.400:2009 Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
JUS	Jugoslovanski standard
ARSO	Agencija za okolje Republike Slovenije
PmB	s polimeri modificiran bitumen
AC	»Asphalt concrete« Bitumenski beton
SMA	»Stone mastics asphalt« Drobir z bitumenskim mastiksom
PA	»Porous Asphalt« Drenažni asfalt
DARS	Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji
<i>Pen, P</i>	penetracija - enota penetracije, ki je 0,1 mm
T_{PK}	temperatura zmehčišča prstan-kroglica v °C
T_{Fraass}	temperatura pretrgališča po Fraassu v °C
S_{60}	togost po 60 sekundah obremenjevanja (preiskava BBR) v MPa
m_{60}	vrednost m po 60 sekundah obremenjevanja (preiskava BBR)
$T_{(S)60}$	temperatura pri togosti 300 MPa v °C
$T_{(m)60}$	temperatura pri vrednosti $m=0,300$ v °C
$T_{(S)mejna}$	najnižja temperatura uporabe $T_{(S)60} - 10$ °C
$T_{(m)mejna}$	najnižja temperatura uporabe $T_{(m)60} - 10$ °C
$T_{(S,m)mejna}$	višja od najnižjih temperatur uporabe $T_{(m)60} - 10$ °C ali $T_{(S)60} - 10$ °C
G^*	reološki absolutni modul togosti (preiskava DSR) v kPa
δ	fazni kot (preiskava DSR) v stopinjah
$T_{krit V1}$	mejna temperatura za nestarani bitumen, kjer je $G^*/\sin\delta = 1,0$ kPa v °C
$T_{krit V2}$	mejna temperatura za kratkotrajno starani bitumen (po RTFOT), kjer je $G^*/\sin\delta = 2,2$ kPa v °C
$T_{krit N}$	mejna temperatura za dolgotrajno starani bitumen (po RTFOT+PAV), kjer je $G^* \cdot \sin\delta = 5000$ kPa v °C
$T_{(N)mejna}$	najnižja temperatura uporabe v °C glede na 'Table 1' v standardu AASHTO M 320
β_t	natezna trdnost (preiskava UTST) v MPa
$\epsilon_{failure}$	raztezek pri poružitvi (preiskava UTST) v ‰
$T_{failure}$	mejna temperatura pri poružitvi (preiskava TSRST) v °C
$\sigma_{cry, failure}$	kriogena napetost pri poružitvi v MPa (preiskava TSRST)
$\Delta\beta_{(T)}$	rezerva natezne napetosti v MPa (iz preiskav TSRST in UTST)
$T(\Delta\beta_{t,max})$	temperatura pri rezervi natezne napetosti v °C (iz preiskav TSRST in UTST)

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

V zadnjem stoletju je cestogradnja doživela nesluten razvoj. Spodnji ustroji ceste so podobni kot so bili že tisočletje, bistveno pa se je spremenil zgornji ustroj ceste – asfaltni sloj. Tehnologija asfalta je pomembno napredovala zaradi povečanja prometnih obremenitev in potrebe letališč po ravnih in trdnih letaliških stezah, ki jih je mogoče enostavno vzdrževati.

Asfalt je običajno sestavljen iz okoli 95 % kamenega agregata in okoli 5 % bitumna. Karakteristike kamenega agregata so odvisne od vrste kamnine. Običajno se uporabljajo karbonatne sedimentne kamnine za spodnje plasti asfalta in eruptivne kamnine za zgornji obrabni sloj. Kakovost kamenega agregata je odvisna od vrste kamnine, vendar se karakteristike kamnin z leti bistveno ne spreminjajo. Naravni bitumen običajno pridobimo pri destilaciji nafte. Je organska zmes, katere začetne karakteristike so odvisne od izvora same nafte ter od načina destilacije. Pod vplivom oksidacije, visokih temperatur ter obremenitev se karakteristike bitumna z leti spreminjajo. Največ bitumna se v svetu uporabi za gradnjo zgornjih ustrojcev cest (85 %), okoli 10 % pa se ga uporabi za hidroizolacije, predvsem strešne kritine. V svetu se letno uporabi okoli 102 milijona ton bitumna, v letu 2014 je bila letna poraba v Evropi okoli 11,3 milijonov ton bitumna [35].

Asfaltne zmesi so največkrat uporabljeni materiali za zgornji ustroj voziščnih konstrukcij in so neposredno izpostavljene prometnim in podnebnim obremenitvam. Mehansko-fizikalne lastnosti asfaltnih zmesi so zelo odvisne od lastnosti in obnašanja bitumnov, ki predstavljajo bistveno komponento v sestavi asfaltnih zmesi. Lastnosti bitumnov se pomembno spreminjajo s temperaturo. Karakteristike posamezne vrste bitumna morajo omogočati, da projektirana asfaltna zmes nudi ustrezno odpornost tako proti plastičnim deformacijam pri visokih temperaturah kot odpornost proti razpokam pri nizkih temperaturah ter odpornost proti utrujanju pod vplivom prometnih obremenitev tudi po več letih uporabe. Zato so preiskave lastnosti vhodnih in dolgotrajno staranih bitumnov zelo pomembne za oceno obnašanja asfaltnih plasti v teku eksploatacije vozišča in celotne življenjske dobe cestne konstrukcije.

V Sloveniji najpogosteje uporabljamo tri vrste cestogradbenih bitumnov in sicer z oznako običajna cestogradbena bitumna B 50/70 in B 70/100 ter s polimeri modificiran bitumen z oznako PmB45/80-65. Poleg osnovnih lastnosti bitumnov (temperatura zmehčičja, penetracija pri 25 °C, temperatura pretrgališča, duktilnost, pri s polimeri modificiranih vezivih pa tudi elastični povratek ter sila in energija pri raztezanju) je pomembno tudi ugotoviti spremembe lastnosti bitumnov pri staranju. Novejši laboratorijski postopki omogočajo simuliranje kratkotrajnega in pospešenega staranja v laboratoriju. Ugotavljanje kakovosti staranih bitumnov je pomembno z vidika ocenjevanja trajnosti asfaltnih plasti, v katerih bo uporabljen ta bitumen. Staranje bitumnov je oksidacijski proces, ki je prisoten že v teku proizvodnje na asfaltnem obratu, pri vgradnji in tudi kasneje v asfaltni plasti med uporabo vozišča. Laboratorijsko staranje bitumnov in asfaltov je zamuden in drag proces. Količine materiala, ki ga je treba starati, so pri bitumnih manjše, kot če staramo asfalte, zato so se v svetu uveljavile predvsem metode za laboratorijsko staranje bitumnov.

Bitumne, ki so proizvedeni v rafinerijah in dostavljeni na asfaltne baze imenujemo 'vhodni' ali 'originalni' ali 'nestarani' bitumni, saj še niso bili starani v procesu proizvodnje asfaltnih zmesi.

Ugotavljanje obnašanja vhodnih bitumnov pri nizkih temperaturah uporabe (≤ 0 °C) se izvaja že dolga leta s preiskavo imenovano Fraass, ki pa ima več pomanjkljivosti. Zato je bila razvita preiskava 'Ugotavljanje upogibne togosti' oziroma BBR (Bending Beam Rheometer), ki je bila v Sloveniji prvič standardizirana leta 2005 (SIST EN 14771, zadnja verzija iz leta 2012). Metoda je priporočena za preiskave dolgotrajno staranih bitumnov, tako da so v nekaterih državah (ZDA) zahteve za mejne vrednosti parametrov, ki določajo karakteristike staranih bitumnov, že postavljene. V Sloveniji, kakor tudi v evropskem prostoru, zahtev za mejne vrednosti za posamezne vrste običajnih cestogradbenih bitumnov ali s polimeri modificiranih bitumnov, določenih z metodo BBR, še nimamo.

Na nivoju Evrope so na voljo standardi (serija EN 13108), ki obravnavajo osnovne zahteve za različne asfaltne zmesi. Posamezne države uporabljajo samo nekatere izmed v standardih serije EN 13108 navedenih asfaltnih zmesi. Na Nizozemskem se za obrabne plasti veliko uporablja drenažni asfalt (Porous Asphalt oz. PA), v Angliji se za obrabne plasti pretežno uporablja vroče valjani asfalt (Hot Rolled Asphalt oz. HRA), v Sloveniji se v vseh plasteh pretežno uporablja bitumenski beton (Asphalt Concrete oz. AC) ter asfalt z bitumenskim mastiksom (Stone Mastics Asphalt ali SMA). V Sloveniji so za asfalt v veljavi slovenski standardi iz serije SIST 1038 'Bitumenski beton - Zahteve – Pravila za uporabo SIST EN 13108'.

Zahteve za lastnosti bitumenskih veziv za asfaltne plasti so podane v standardih EN 12591 za običajne cestogradbene bitumne [1], v EN 13924 za trše in »multigrade« cestogradbene bitumne ter EN 14023 za s polimeri modificirane bitumne. V Sloveniji se največ uporabljata cestogradbena bitumna z oznako B 50/70 ter B 70/100, ki smo ga preiskovali v tej nalogi. Zahteve za B 70/100, ki je bil predmet te raziskave, ter za druge cestogradbene bitumne so podane v SIST EN 12591:2009 'Bitumen in bitumenska veziva - Specifikacije za cestogradbene bitumne'. Zadnja izdaja tega standarda je bila pred sedmimi leti, tako da je vsebina potrebna vsebinske novelacije. Ta standard predpisuje samo zahteve za vhodne cestogradbene bitumne, ne pa zahtev za laboratorijsko starane cestogradbene bitumne. Naloga držav vsake posamezne članice EU je, da določi nacionalne zahteve glede na svojo specifiko (klimatske in druge pogoje). Z nacionalnimi dodatki se lahko določijo posebne zahteve za karakteristike staranih bitumnov, ki pa jih v Sloveniji zaenkrat še nimamo.

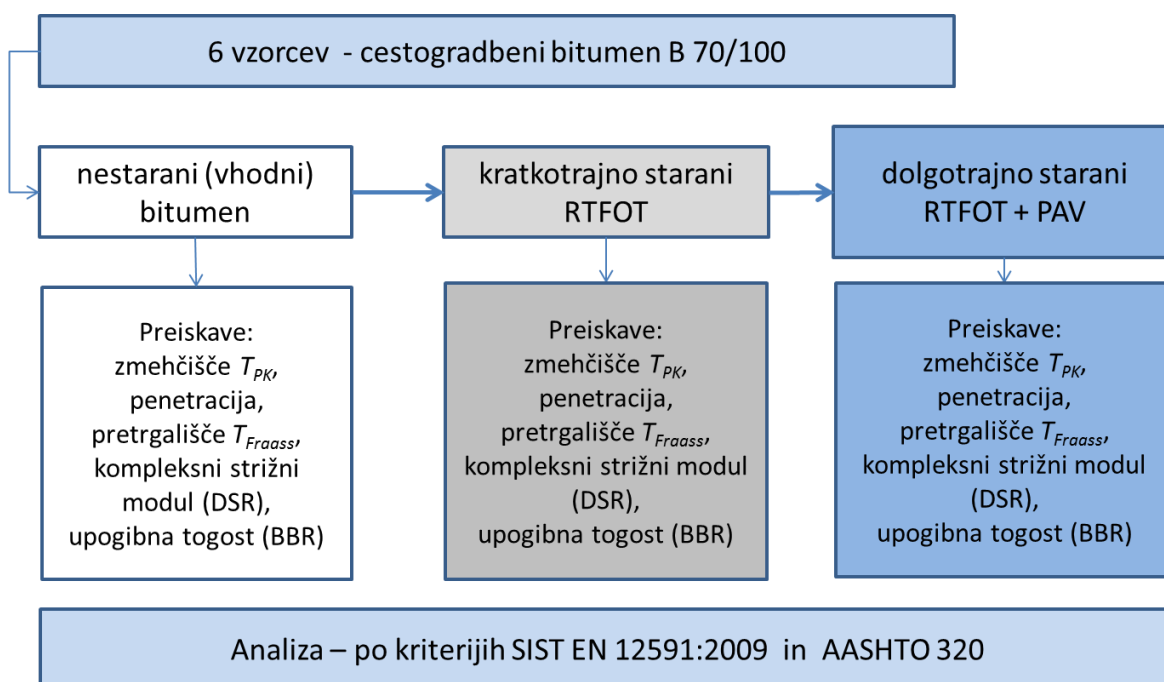
1.2 Uporabljen metodologija

Namen naloge je, da se ugotovi vpliv staranja na cestogradbene bitumne B 70/100, ki se uporabljajo v slovenskem prostoru. Karakteristike teh bitumnov po dolgotrajnem laboratorijskem staranju v Sloveniji do sedaj še niso bile preiskane. Poleg osnovnih preiskav smo vzorce bitumnov starali z dvema laboratorijskima postopkoma ter preiskali njihove karakteristike tudi z novejšima metodama BBR in DSR (Dynamic Shear Rheometer).

Pri dobaviteljih oziroma na asfaltnih obratih smo v jeseni 2014 ter v letu 2015 vzorčili šest bitumnov B 70/100 različnih dobaviteljev. Na vhodnih oziroma nestaranih bitumnih smo v letu 2015 izvedli osnovne preiskave, kot so penetracija (Pen), temperatura zmehčišča (T_{PK}), temperatura pretrgališča (T_{Fraass}) ter z novejšo preiskavo določili upogibne togosti (BBR). Vzorce bitumna smo nato kratkotrajno starali po metodi RTFOT in te preiskave ponovili. Postopek RTFOT oziroma kratkotrajno staranje simulira spremembe bitumenskih veziv pri proizvodnji, transportu na gradbišče in vgradnji asfaltnih zmesi. Vzorce bitumna, ki so bili

laboratorijsko starani po metodi RTFOT, smo starali še po postopku simuliranja pospešenega staranja (PAV), tako da smo pridobili vzorce dolgotrajno staranega bitumna. Ponovili smo navedene preiskave ter ugotavljali še reološke karakteristike (kompleksni strižni modul in fazni kot) z napravo DSR. Načrt preskušanja vzorcev je prikazana na sliki 1-1.

Za izvedbo laboratorijskega staranja bitumnov je potrebna posebna laboratorijska oprema, ki zaenkrat v Sloveniji ni široko dostopna. Naprava za pospešeno staranje bitumnov (PAV) in naprava BBR za določanje upogibne togosti je bila v letu 2015 v Sloveniji na razpolago samo v Laboratoriju za asfalte in bitumenske proizvode na Zavodu za gradbeništvo v Ljubljani (ZAG Ljubljana). Količinski pregled izvedenih preiskav je prikazan v preglednici 1-1.



Slika 1-1 Shematski prikaz metodologije dela

Preglednica 1-1 Pregled izvedenih laboratorijskih preiskav

Vrsta preiskave	Standard	lastnost	Enota	nestarani bitumni	Kratkotrajno starani - po RTFOT	Dolgotrajno starani - po RTFOT+PAV
				št. vzorcev	št. vzorcev	št. vzorcev
Določevanje penetracije z iglo	SIST EN 1426:2007	Pen	mm/10	6	6	6
Določanje zmeščišča - PK	SIST EN 1427:2007	T_{PK}	°C	6	6	6
Določevanje pretrgališča po Fraassu	SIST EN 12593:2007	T_{Fraass}	°C	6	6	6
Dinamični strižni reometer DSR	SIST EN 14770:2009	G^* in δ 1,59 Hz (10 rad.s ⁻¹)	MPa	6*	6*	6
Reometer z upogibno obremenitvijo BBR	SIST EN 14771:2012	$T_{(S)60}$ pri $S = 300$ MPa, $T_{(m)60}$ pri m -vrednost = 0,3	°C	6	6	6

6* za vrednotenje lastnosti pri visokih temperaturah

2 LASTNOSTI BITUMNOV IN LABORATORIJSKE PREISKAVE

2.1 Uvod

Bitumen je črna, lepljiva, zelo viskozna snov. Večinoma ga pridobivamo iz nafte, obstaja pa nekaj naravnih nahajališč bitumna (npr. Selenizza v Albaniji). Nafta se med seboj ločijo po svojih kemijskih in fizikalnih lastnosti, glede na produkte iz katerih so nastale. Nafta iz nekaterih področij, na primer iz Severnega morja [27], ne vsebuje bitumenske frakcije. Nafta za pridobivanje kakovostnega bitumna načrpajo v Srednji Ameriki in na Srednjem vzhodu.

Kemijska sestava bitumnov je zelo raznolika in se razlikuje glede na nahajališče oziroma vir. Sestavlja ga lahko več tisoč različnih organskih spojin. Bitumen sestavljajo različni nasičeni in nenasičeni ogljikovodiki. Natančna kemijska sestava posameznega bitumna pa ni znana oziroma se razlikuje glede na vir. Za cestogradbene bitumne je kemijsko pomembno razmerje med vsebnostjo asfaltenov, parafinov, aromatov in smol, ki vpliva na njihove mehanske lastnosti.

Naravni bitumen so kot gradbeni material uporabljali že pred več kot 4000 leti za gradnjo cest in ga v cestogradnji uporabljamo še danes. Jezera naravnega bitumna se nahajajo v sedanjem Iraku. Delež bitumna v sestavi asfaltne zmesi je sorazmerno majhen (pri asfaltnih betonih običajno od 3 % do 8 %) vendar pa bistveno vpliva na lastnosti vozišč. Ker naravne lastnosti bitumna ne ustrezajo več zahtevam moderne cestogradnje, so bitumen pričeli modificirati z različnimi dodatki, predvsem polimeri, in mu na ta način razširili področje uporabe in podaljšali trajnost. Osnovne lastnosti bitumnov, ki se uporabljajo v cestogradnji, so določene v standardih iz skupine 'Bitumen in bitumenska veziva':

SIST EN 12591: Specifikacije za cestogradbene bitumne [1]

SIST EN 13924-1: Trši cestogradbeni bitumni

SIST EN 13924-2: "Multigrade" cestogradbeni bitumni

SIST EN 14023: Okvirna specifikacija za bitumne, modificirane s polimeri [13]

Asfaltne zmesi, vgrajene v voziščne konstrukcije, morajo biti sposobne prevzeti statične in dinamične obremenitve zaradi prometa ter klimatskih obremenitev (predvsem spremembe temperature). Ker so prometne obremenitve na cestah različne ter so tudi klimatski pogoji v posameznih pokrajinah različni, uporabljamo širok nabor asfaltnih zmesi. Poleg dobre nosilnosti morajo imeti asfaltne zmesi tudi druge lastnosti, kot so odpornost proti obrabi, odpornost proti nizkim temperaturam, odpornost proti visokim temperaturam, odpornost proti ognju, elastičnost, ki so pogojene glede na predvideno uporabo asfalta. Odpornost asfalta proti nizkim temperaturam opisuje standardizirana preiskava SIST EN 12697-46: Odpornost asfaltne plasti proti razpokam pri nizkih temperaturah z enoosnimi nateznimi preskusi.

V naslednjih poglavjih bodo opisane osnovne preiskave za bitumne, s katerimi se ugotavljajo njihove osnovne karakteristike, postopka kratkotrajnega (RTFOT) in pospešenega staranja bitumnov (PAV), novejši preiskavi za ugotavljanje nizkotemperaturnih lastnosti po staranju (BBR in DSR) ter preiskava asfalta za ugotavljanje odpornosti na nizke temperature (TSRST+UCTS).

2.2 Osnovne lastnosti bitumnov

2.2.1 Penetracija po SIST EN 1426

Najbolj osnovna lastnost bitumnov je penetracija pri 25 °C (Pen). Konsistenco bitumna ovrednotimo kot globino, do katere se ugrezne standardizirana igla pod standardizirano težo v bitumen, ki ima temperituro 25 °C. Teža igle je 100 g, čas obtežbe pa 5 sekund. Rezultati se podajajo v enotah penetracije, pri čemer predstavlja ena enota 0,1 mm in odraža globino, do katere se igla vtisne. Penetracija 75 pomeni, da se je igla pri petih poizkusih v povprečju vtisnila za 7,5 mm v preiskovani bitumen. Interpretacija rezultatov je preprosta – večja kot je penetracija, mehkejši je bitumen pri sobni temperaturi.

Za posamezni vzorec bitumna se postopek ponovi petkrat. Postopek je prikazan na sliki 2-1. Pri penetracijah nad 50 je zahtevana ponovljivost za posamezno penetracijo preiskave 0,2 mm ter 4 % pri penetracijah pod 50. Zahtevana ponovljivost za celotno preiskavo penetracije je 7 % (za absolutno vrednost). Zahtevana obnovljivost (različni laboratoriji) za penetracijo je 10 % (za absolutno vrednost) [2].



Slika 2-1 Določevanje penetracije z iglo (laboratorij ZAG Ljubljana)

2.2.2 Zmehčišče po metodi prstan - kroglica po SIST EN 1427

Z zmehčiščem po metodi prstan-kroglica (PK) ovrednotimo lastnosti bitumna pri visokih temperaturah in predstavlja zgornjo mejo elastične viskoznosti bitumna. Test predstavlja določitev temperature, pri kateri bitumen dobi neko specifično konsistenco. Temperatura se v literaturi označuje s $T_{R\&B}$ (Ring and Ball) oziroma v Sloveniji s T_{PK} .

Vzorec bitumna vlijemo v kovinski model z dvema obročema. Model damo v vodno kopel pri 5 °C ter na vsak vzorec položimo kovinsko kroglico. Vodno kopel kontrolirano segrevamo z naraščanjem temperature 5 °C/min, dokler se bitumen ne zmehča toliko, da obe kroglici povzročita deformiranje bitumna in potoneta na dno posode oziroma 2,54 cm globoko. Rezultat preiskave je temperatura, pri kateri se bitumen zmehča. Zahtevana ponovljivost preiskave je za cestogradbene bitumne 1 °C, zahtevana obnovljivost preiskave pa 2 °C (odstopanje od te zahteve je dovoljeno v povprečju enkrat na vsakih 20 preiskav) [3].



Slika 2-2 Določanje zmehčišča - metoda prstana in kroglice (laboratorij ZAG Ljubljana)

2.2.3 Pretrgališče po Fraass-u po SIST EN 12593

S temperaturo pretrgališča ovrednotimo lastnosti bitumna pri nizkih temperaturah in predstavlja spodnjo mejo elastične viskoznosti bitumna. Test predstavlja določitev temperature, pri kateri bitumen postane krhek.

Vzorec bitumna se vlije na kovinsko ploščico, ki se jo v manjši komori upogiba pri različnih temperaturah. En upogib se naredi pri vsakem znižanju temperature za 1 °C. Temperatura se znižuje s konstantno hitrostjo 1 °C na minuto. Stanje vzorca se preveri po vsakem

upogibu. Test je končan, ko je opazna razpoka v vzorcu bitumna. Rezultat preiskave je temperatura, pri kateri vzorec počí T_{Fraass} .

Sama preiskava je avtomatizirana, vendar pa je zahtevana ponovljivost preiskave relativno nizka - znaša 3 °C (odstopanje od te zahteve je dovoljeno na vsakih 20 preiskav). Zahtevana obnovljivost preiskave pretrgališča je prav tako relativno majhna in znaša 6 °C (odstopanje od te zahteve je dovoljeno v povprečju enkrat na vsakih 20 preiskav) [4].



Slika 2-3 Določevanje pretrgališča po Fraass-u (laboratorij ZAG Ljubljana)

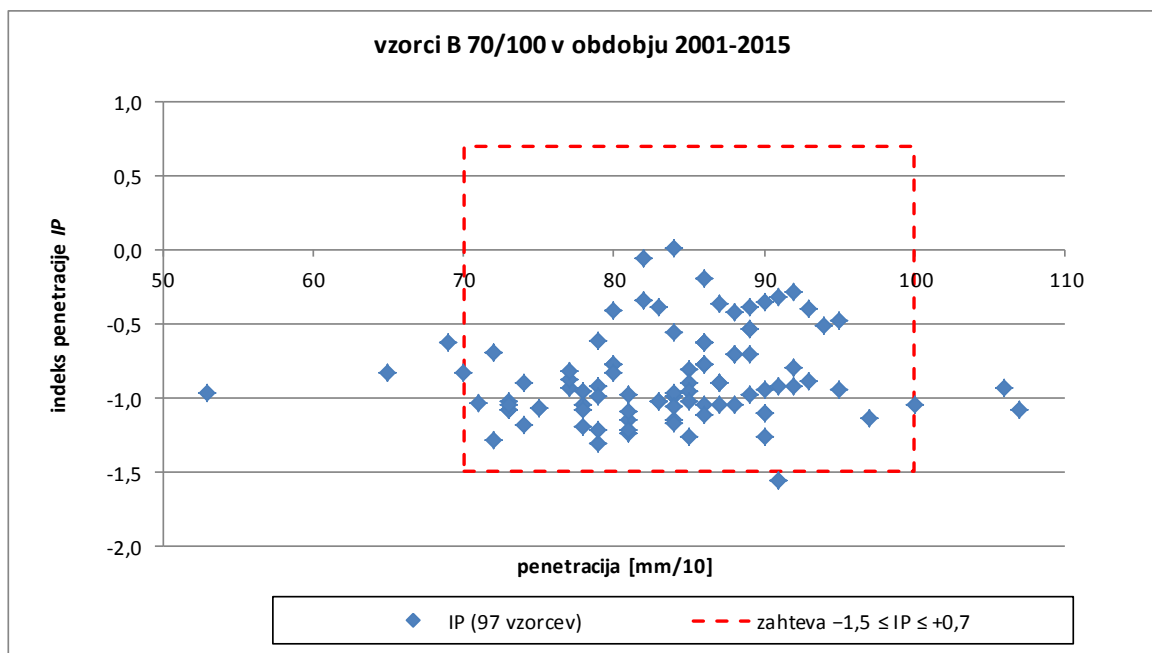
2.2.4 Indeks penetracije IP

Indeks penetracije IP odraža občutljivost bitumna na temperaturo. Izračunamo ga iz penetracije Pen in temperature zmečičišča T_{PK} po enačbi 2-1. Manjši kot je IP , bolj je bitumen občutljiv na temperaturne spremembe. Spodnja enačba je postavljena na predpostavki, da je penetracija bitumna pri temperaturi zmečičišča 80. Postopek izračuna IP je naveden v SIST EN 12591.

$$IP = \frac{-20 \cdot T_{PK} \pm 500 \cdot LgPen - 1952}{T_{PK} - 50 \cdot LgPen + 120} \quad (2-1)$$

T_{PK} temperatura zmečičišča v °C
 $Lg Pen$ logaritem penetracije pri 25 °C

V laboratoriju ZAG Ljubljana smo v obdobju 2001 do 2015 preiskali 97 vzorcev bitumna B 70/100 [41]. Izračunane vrednosti indeksa penetracije so prikazane na sliki 2-4. V obdobju 2001 do vključno 2007 je bilo preiskanih 71 vzorcev. Večina vzorcev je izpolnjevala zahtevo, podano v SIST EN 12591:2009 (Tabela 1B) in sicer $-1,5 < IP < +0,7$. Po letu 2007 so vsi preiskani vzorci izpolnjevali to zahtevo.



Slika 2-4 Indeks penetracije za vzorce B 70/100 preiskane v obdobju 2001-2015

2.2.5 Območje plastičnosti

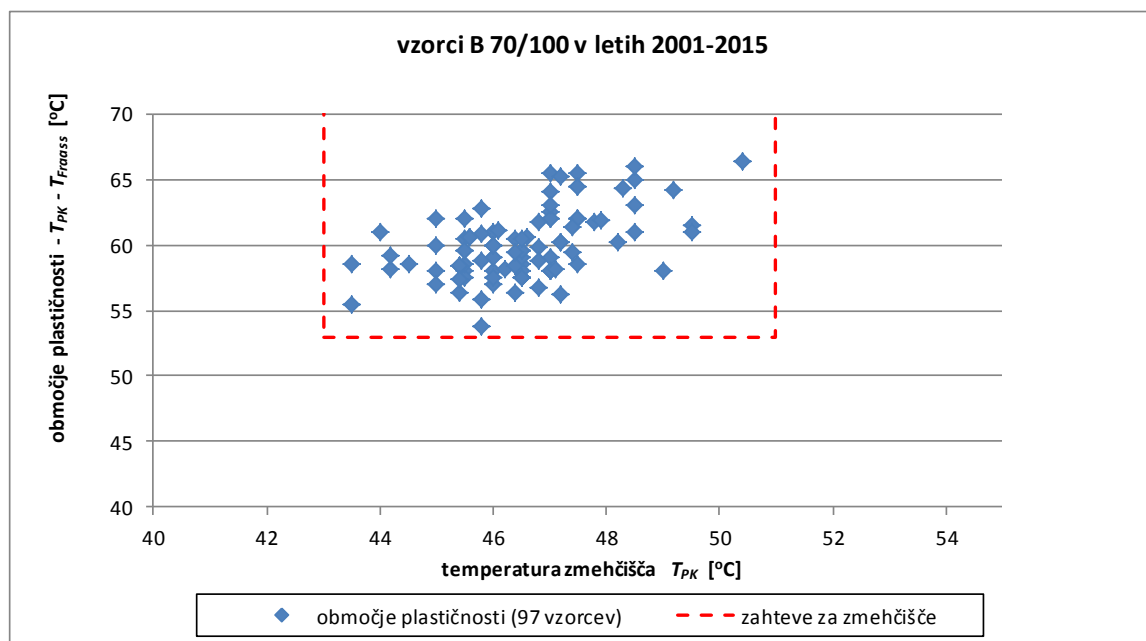
Območje plastičnosti je območje med temperaturo zmečkaišča T_{PK} in temperaturo pretrgališča T_{Fraass} . Zaradi temperaturnih sprememb, katerim je izpostavljen asfalt pri uporabi, želimo, da je območje plastičnosti bitumna čim večje. Zahtev za območje plastičnosti v standardih ni, so pa zahteve za T_{PK} in T_{Fraass} . Temperatura zmečkaišča mora biti za cestogradbeni bitumen B 70/100 od 43 °C do 51 °C, temperatura pretrgališča pa nižja od -10 °C.

$$\text{Območje plastičnosti} = T_{PK} - T_{Fraass} \dots \dots \dots (2-2)$$

Na sliki 2-5 so prikazani rezultati preiskav nestaranih bitumnov B 70/100, ki so bile izvedene v laboratoriju ZAG Ljubljana v zadnjih štirinajstih letih [41]. S slike lahko ugotovimo, da so vsi preiskani vzorci ustrezali zahtevi za temperaturo zmečkaišča.

Vzorci tega bitumna se obnašajo plastično v temperaturnem razponu od najmanj 54 °C do največ 67 °C. Vendar pa podatek o T_{PK} in T_{Fraass} ter o območju plastičnosti nestarane bitumna ne nakazuje najvišjih in najnižjih temperatur uporabe, saj je bitumen že v času proizvodnje asfalta podvržen staranju in se njegove karakteristike spremenijo.

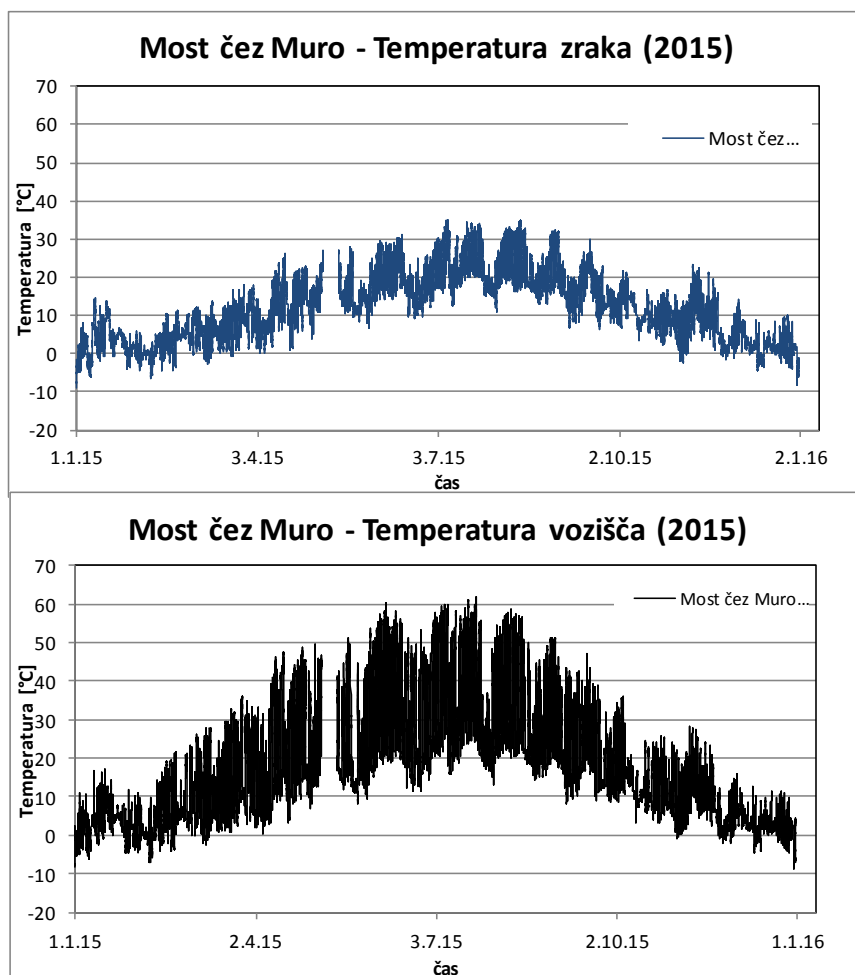
V zadnjih letih se v svetu vedno bolj uvajata dve zahtevnejši preiskavi, s katerimi preverjamo reološke karakteristike bitumnov. Preiskavo DSR - ugotavljanje kompleksnega strižnega modula izvajamo za ugotavljanje najvišjih ter najnižjih temperatur uporabe na dolgotrajno staranih bitumnih. Preiskavo BBR - ugotavljanje upogibne togosti običajno izvajamo za ugotavljanje najnižjih temperatur uporabe na dolgotrajno staranih bitumnih.



Slika 2-5 Območje plastičnosti za B 70/100 preiskane v obdobju 2001-2015

2.3 Postopki laboratorijskega staranja

Po izdelavi v rafineriji se bitumni hranijo več tednov v cisternah pri temperaturah od 90 °C do 180 °C. V fazi proizvodnje asfalta so podvrženi visokim temperaturam do okoli 180 °C, zato med samim postopkom otrdijo. Po vgradnji so podvrženi dnevnim temperaturnim ciklom ter visokim temperaturam v poletnem času in nizkim temperaturam v zimskem času. Pridobili smo podatke o izmerjenih temperaturah vozišča na mostu čez Muro [28] v letih 2012 do 2015. Na sliki 2-6 je prikazana izmerjena temperature zraka in vozišča v letu 2015 na mostu čez Muro. S slike je razvidno, da so temperaturne spremembe vozišča večje kot so temperaturne spremembe zraka. V zimskem obdobju je temperatura vozišča podobna temperaturi zraka, čez dan lahko tudi nekoliko višja. Predvsem v poletnem obdobju pa so temperature asfalta precej višje od temperature zraka – na mostu čez Muro je bila v obdobju 2012-2015 najvišja izmerjena temperatura vozišča +62,1 °C (v letu 2015), najnižja izmerjena pa -12,9 °C (v letu 2014).



Slika 2-6 Ciklične dnevne in letne temperaturne obremenitve izbranega vozišča

Za ugotavljanje lastnosti bitumnov in asfalta se uvajajo takoimenovane na obnašanje vezane karakteristike, ki bolje ponazarjajo obnašanje bitumnov pri realnih pogojih na cesti. Karakteristike bitumna se spremenijo predvsem v času proizvodnje in vgradnje asfalta, ko je ta podvržen visokim temperaturam. V tem času je izhlapevanje lahkih komponent bitumna zaradi visokih temperatur veliko, prav tako je intenzivna oksidacija, saj bitumen obviije vroč kameni agregat, kar povzroči, da je velika površina bitumna izpostavljena

vročemu zraku. Karakteristike bitumna se spreminjajo tudi v celotnem času uporabe predvsem zaradi oksidacije in UV sevanja ter zaradi temperaturnih sprememb in utrujanja pri prometnih obremenitvah.

Poškodbe asfalta nastajajo predvsem v času zelo visokih in zelo nizkih temperatur zraka oziroma posledično vozišča. Pri zelo visokih in dolgotrajnih temperaturah zraka lahko nastajajo kolesnice, ko temperatura asfalta preseže temperaturo zmehčišča bitumna. Pri nizkih temperaturah (predvsem pod lediščem) pa so bitumni bolj viskozni in nastajajo razpoke. Ker bitumni z leti postajajo vse bolj togi, se nevarnost nastanka razpok z leti povečuje, nevarnost nastanka kolesnic pa se z leti staranja bitumna zmanjšuje.

Sodobna oprema omogoča laboratorijsko staranje bitumnov, s katerim simuliramo staranje pri proizvodnji in staranje vgrajenega bitumna. Postopek laboratorijskega kratkotrajnega in dolgotrajnega staranja je opisan v naslednjih razdelkih [37], [38].

2.3.1 Kratkotrajno staranje - RTFOT po SIST EN 12607-1

Bitumen se najbolj intenzivno stara zaradi segrevanja pri postopku mešanja z vročim agregatom na sami asfaltni bazi. Takrat je temperatura asfalta najvišja, zrna agregata pa so obvita z zelo tanko plastjo bitumna. Priporočena najvišja temperatura pri proizvodnji je odvisna od vrste bitumna – za bitumne B 70/100 je običajno 180 °C.

Postopek za kratkotrajno staranje RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) simulira spremembe bitumenskih veziv pri proizvodnji, transportu na gradbišče in vgradnji asfaltnih zmesi. Izvaja se po standardizirani metodi SIST EN 12607- 1: Bitumen in bitumenska veziva - Določanje odpornosti proti otrjevanju pod vplivom toplote in zraka - 1. del: Metoda RTFOT [5].

Majhne količine vzorca bitumna se vlije v steklene valjaste čaše, ki se jih vloži v komoro. Laboratorijski postopek se izvaja pri povišani temperaturi z vrtenjem čaš, v katerih je tanka plast bitumna. Staranje oziroma otrjevanje bitumna poteka v komori pod vplivom toplote (temperatura v komori je 163 °C) in zraka, ki se vpihuje v čaše oziroma v komoro. Pretok vročega zraka je 240 l/h. Postopek traja 75 minut. Bitumen, ki je bil laboratorijsko podvržen kratkotrajnemu staranju, se uporabi za nadaljnje preiskave.



Slika 2-7 RTFOT Določanje odpornosti proti otrjevanju pod vplivom toplote in zraka

Bitumen, ki je po vročem postopku vgrajen v asfaltno plast, je bil že podvržen kratkotrajnemu staranju v fazi proizvodnje. Zaradi staranja bitumen otrdi, kar pomeni, da se zniža penetracija, poviša se temperatura zmečičišča, poveča se viskoznost, bitumen postane bolj krhek (poviša se temperatura pretrgališča po Fraass-u). Zato je občutljivost bitumna na staranje zelo pomembna za obnašanja asfalta.

V sklopu kontrole bitumnov je skladno s standardi treba preveriti lastnosti bitumna po kratkotrajnem staranju in sicer vrednost penetracije T_{PK} ter spremembo mase. Za s polimeri modificirane bitumne pa je treba preveriti tudi elastičnost. Pri teh preiskavah se uporabljata dva standarda: SIST EN 13589 (Metoda določanja sile pri merjenju duktilnosti) ter SIST EN 13704 (Izračun deformacijske energije).

Izračuna se ohranjena vrednost penetracije za posamezni vzorec bitumna ob predpostavki, da je penetracija nestaranega bitumna 100%. Izračuna se ohranjena vrednost zmečičišča za posamezni vzorec bitumna.

Standard predvideva, da se po kratkotrajnem staranju preveri tudi sprememba mase bitumna, ki pa je lahko pozitivna ali negativna. Posamezni vzorec bitumna se stehta pred in po preiskavi ter se izračuna razlika. Zahtevana ponovljivost za spremembo mase je podana v standardu in je 0,15 % (za isti laboratorij). Zahtevana obnovljivost za spremembo mase je 0,20 % (za različne laboratorije). Drugih karakteristik niti evropski niti slovenski standardi ne predpisujejo.

2.3.2 Pospešeno staranje - PAV po SIST EN 14769

Postopek pospešenega staranja PAV (Pressure Ageing Vessel) simulira spremembe bitumenskih veziv po daljšem času uporabe - večletno staranje zaradi oksidacije, UV sevanja in kemikalij.

Postopek pospešenega staranja se izvaja v komori pri povišanem tlaku (2,1 MPa, oz. 21 barov) in pri povišani temperaturi od 85 °C do največ 110 °C. Izbrana temperatura je odvisna od klimatskih razmer. Temperatura 90 °C naj bi simulirala mrzlo klimo, 100 °C srednjo klimo, 110 °C pa zelo vroče razmere (npr. kot so v puščavah) [17]. Za bitumen B 70/100 smo za naše klimatske razmere dolgotrajno staranje izvajali 20 ur pri temperaturi 100 °C. V posodi se nahaja deset valjastih posodic, v katere vlijemo bitumen. Po končanem postopku se vzorčki prenesejo še v komoro za vakuumiranje, da se iz bitumna izločijo zračni mehurčki, nastali med staranjem v posodi PAV. Iz literature lahko razberemo, da naj bi postopek dolgotrajnega staranja simuliral življenjsko dobo asfalta 7 do 10 let [36]. Časovna meja seveda ni jasno določena, saj je staranje odvisno tudi od lege asfalta (prisojna, osojna, predor), utrujanja, vrste asfalta, votlavosti...

Za pridobitev dolgotrajno staranih vzorcev bitumna moramo v postopku PAV uporabiti bitumne, ki smo jih najprej kratkotrajno postarali, saj postopek PAV simulira samo počasno, postopno staranje bitumnov.



Slika 2-8 PAV pospešeno staranje v komori



Slika 2-9 PAV odstranjevanje zračnih mehurčkov

Pospešeno staranje se izvaja po standardizirani metodi SIST EN 14769:2012 Bitumen in bitumenska veziva – Pospešeno staranje v tlačni posodi (PAV). Standard ne navaja zahtev za obnovljivost in ponovljivost [6].

Na dolgotrajno staranem bitumnu opravimo preiskave, s katerimi ugotavljamo karakteristike povezane z nastankom razpok pri nizkih temperaturah (BBR) ter preiskave za določanje karakteristik utrujanja pri srednjih temperaturah (DSR).

V evropskih standardih [1] kakor tudi v slovenskih TSC-jih [11] še ni zahtev za karakteristike bitumnov po dolgotrajnem staranju.

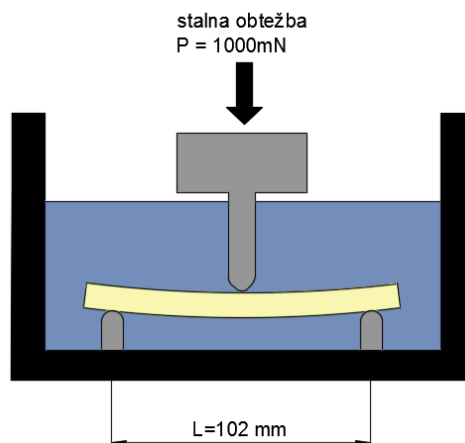
2.4 Določevanje karakteristik bitumnov pri nizkih temperaturah

2.4.1 BBR - ugotavljanje upogibne togosti po SIST EN 14771

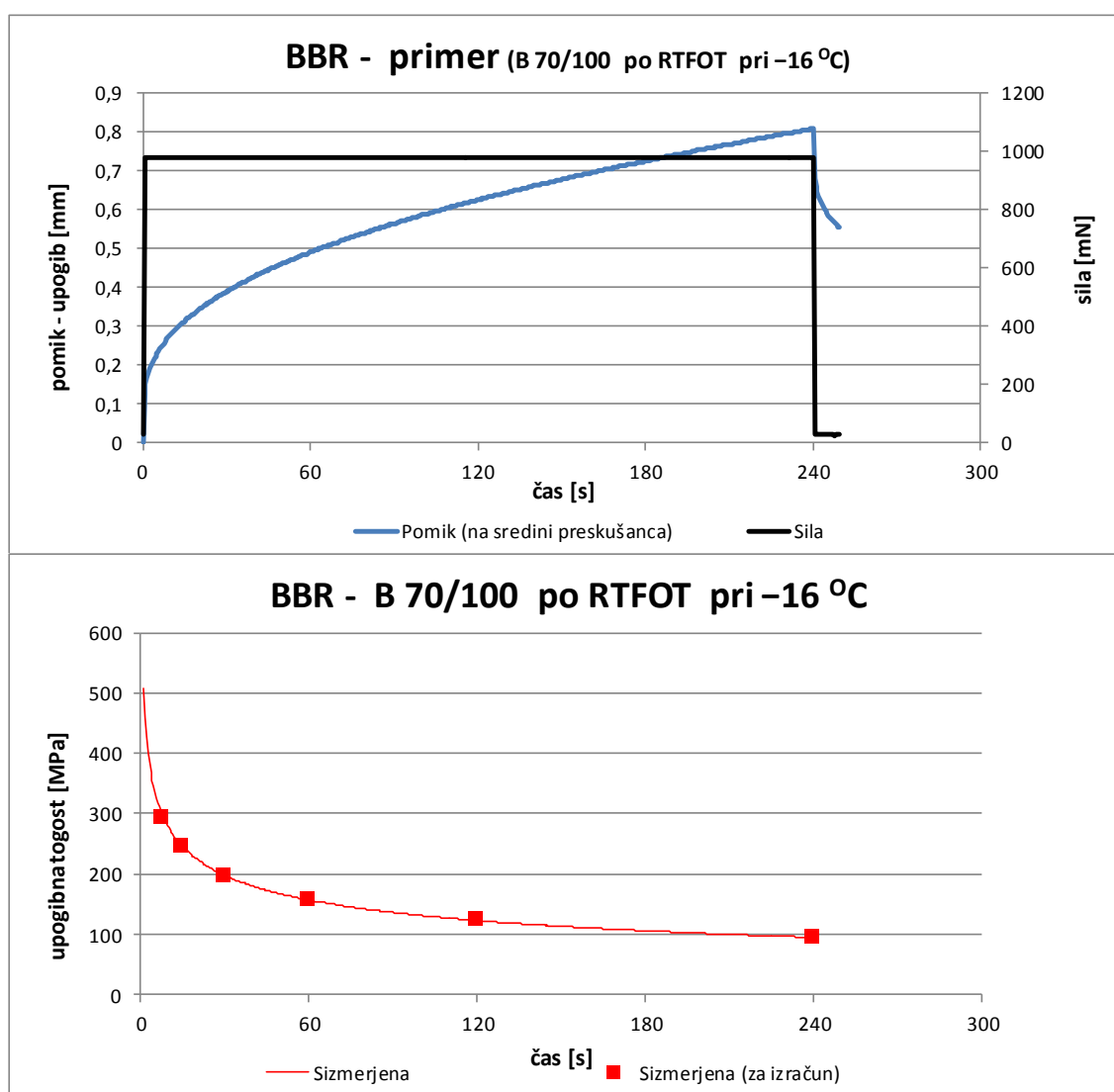
Laboratoriji za asfalte in bitumne po vsem svetu raziskujejo vpliv nizkih temperatur na razpoke v asfaltu. Običajno se preiskave izvajajo po dveh standardiziranih metodah, opisanih v razdelku 2.5. Odpornost neke vrste asfalta (npr. AC - Asphalt Concrete) proti razpokam pri nizkih temperaturah je predvsem odvisna od vrste uporabljenega bitumna, zato je možno sklepati na obnašanje asfalta, če poznamo karakteristike bitumna pri nizkih temperaturah.

Za ugotavljanje karakteristik bitumna pri nizkih temperaturah se uporablja preiskava pretrgališča po Fraass-u, ki pa ima več pomanjkljivosti. Zato so bile razvite nove preiskave – Ugotavljanje upogibne togosti – Reometer z nosilcem, obremenjenim na upogib (BBR). Ta metoda je standardizirana od leta 2005, zadnja revizija standarda je iz 2012. Preiskava BBR se v Sloveniji izvaja šele od leta 2014 in sicer v laboratoriju ZAG Ljubljana. V ameriških specifikacijah AASHTO M320 [12] pa je preiskava BBR obvezna preiskava na laboratorijsko staranih bitumnih, ne pa tudi na nestaranih bitumnih.

Ugotavljanje upogibne togosti se izvaja na predhodno kratkotrajno in dolgotrajno (RTFOT+PAV) staranih bitumenskih vzorcih. Vzorec bitumna se vlije v model v obliki prizme (dimenzij 6,34 x 12,7 x 127,5 mm). Vsako prizmo oziroma preskušane se položi kot nosilec na dve podpori (slika 2-10) in se jo na sredini med podporama obremeni s konstantno navpično obtežbo. V napravi se preskuša po dve paralelki (dva enaka vzorca) pri vsaki temperaturi, izvedejo pa se preiskave pri različnih temperaturah, ki so vse pod lediščem. Običajno delamo preiskavo pri temperaturah od $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ s korakom po $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Če želimo preiskavo izvesti pri šestih temperaturah, moramo dolgotrajno starati zadostno količino bitumna za pripravo najmanj dvanajstih preskušancev. Vsak preskušane vstavimo v tekočino (etanol) na dve podpori in ga temperiramo. Pri vsaki temperaturi preskušanja se preskušane obremenjuje s silo okoli 1000 mN najmanj 240 s (sila na vzorec se sme spreminjati v območju od 930 mN do 1030 mN z natančnostjo $\pm 10\text{ mN}$). Samo obremenjevanje temperiranih vzorcev je avtomatizirano. Shematski prikaz obremenjevanja je prikazan na sliki 2-10.



Slika 2-10 Ugotavljanje upogibne togosti z BBR po SIST EN 14771



Slika 2-11 Shematski prikazal obremenjevanja

Prikaz izmerjenih rezultatov preiskave - togost in pomik v odvisnosti od časa je prikazan na sliki 2-11. Primer spremembe upogibne togosti S_{60} ter vrednosti m_{60} sta prikazana na sliki 2-12.

Iz podatkov o dimenzijah preskušanca, izmerjene obtežbe in pomika, se izračuna togost preskušanca v posameznih časih obremenjevanja (8s, 15s, 30s, 60s, 120s, 240s) po enačbi 2-3.

$$S_{izmerjena}(t) = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta(t)} \dots \dots \dots (2-3)$$

- $S_{izmerjena}(t)$ izmerjena upogibna togost pri lezenju (flexural creep stiffness) v času t (v MPa)
- P izmerjena sila (v N)
- L razdalja med podporami preskušanca (v mm)
- B širina preskušanca (v mm)
- H debelina preskušanca (v mm)
- $\delta(t)$ pomik preskušanca v času t (v mm)

Krivulja (desetiški logaritem časa/desetiški logaritem togosti) se nato na osnovi šestih točk modelira s polinomom druge stopnje. Na sliki 2-12 je prikazana togost v odvisnosti od časa v logaritmskem merilu. Določi se regresijske koeficiente ter se za kontrolo izračuna togost po enačbi 2-4.

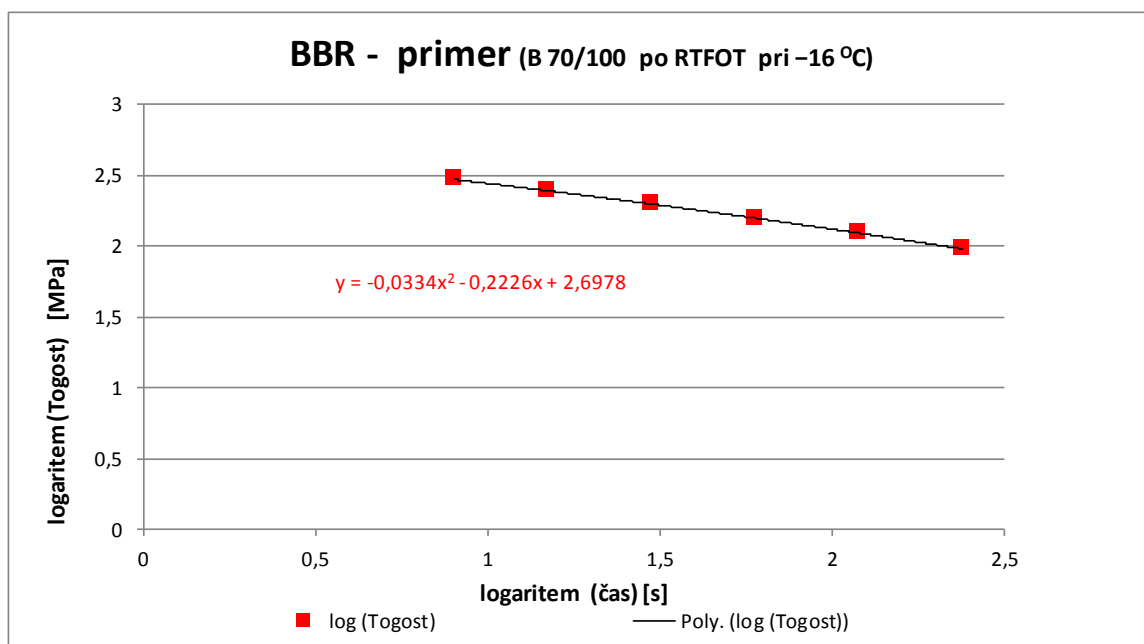
$$\log S_c(t) = A + B \cdot \log(t) + C \cdot [\log(t)]^2 \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

$S_c(t)$ izračunana togost (pri lezenju) v času t (v MPa)
 A, B, C regresijski koeficienti
 t čas od začetka obremenitve (v s)

m -vrednost se izračuna po enačbi 2-5 in predstavlja naklon tangente na graf $\log S_c = f(x) \cdot \log(t)$ v 60. sekundi obremenjevanja, oz. trajanja preiskave.

$$m(t) = \frac{d \log S_c(t)}{d \log(t)} = B + 2 \cdot C \cdot \log(t) \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

B, C regresijski koeficienti iz enačbe 2-4
 t čas od začetka obremenitve (v s)



Slika 2-12 Sprememba togosti v času

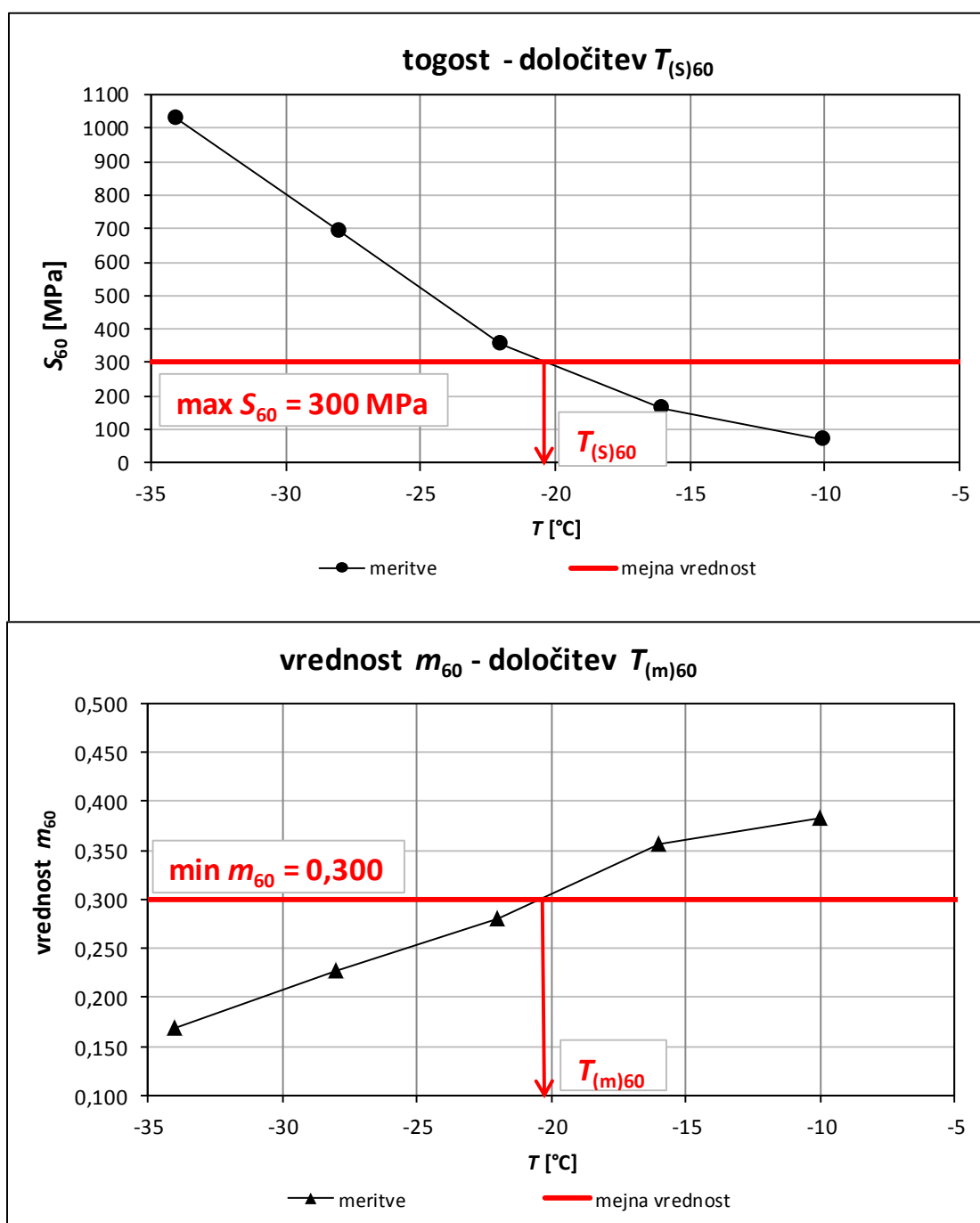
Za bitumen B 70/100 smo preiskavo izvedli pri temperaturah $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri vsaki temperaturi preskušanja smo kot rezultat dobili

- S_{60} togost v 60. sekundi obremenjevanja in
- m_{60} m-vrednost, ki izraža spremembo togosti med obremenjevanjem.

Po preiskavi smo izrisali grafe temperatura/togost ter temperatura/m-vrednost po 60 sekundah obremenjevanja, skladno z ameriškimi specifikacijami za cestogradbeni bitumen AASHTO M 320. Dogovorjeni mejni vrednosti sta skladno s specifikacijami $T_{(S)60}$ pri $S_{max} = 300\text{ MPa}$ in $T_{(m)60}$ pri $m\text{-vrednost} = 0,300$ [12]. Pri mejnih vrednostih 300 MPa za togost ter 0,300 za m-vrednost smo odčitali temperaturi $T_{(S)60}$ in $T_{(m)60}$.

Temperatura pri mejni togosti ($T_{(S)60}$) je definirana kot temperatura, pri kateri je togost S_{60} še manjša od 300 MPa. Prevelika togost pri nizkih temperaturah pomeni, da so v bitumnu akumulirane prevelike termične napetosti. Predpostavljeno je, da je bitumen odporen proti nastanku razpok, če je njegova togost manjša ali enaka od 300 MPa.

Temperatura pri mejni vrednosti m ($T_{(m)60}$), je definirana kot temperatura, pri kateri je m_{60} oziroma m -vrednost večja ali enaka 0,300. Višja vrednost m pomeni, da ima tak bitumen boljšo sposobnost relaksacije nakopičenih termičnih napetosti. Na sliki 2-13 je prikazano določevanje $T_{(S)60}$ in $T_{(m)60}$ po zgoraj opisanih kriterijih.



Slika 2-13 Določevanje $T_{(m)60}$ ter $T_{(S)60}$ po dveh kriterijih (preiskava BBR)

Kot končna temperatura uporabnosti bitumnov pri nizkih temperaturah se glede na AASHTO M320 [12] upoštevana višja od temperatur glede na kriterij 300 MPa in m -vrednost 0,300. Od te temperature se odšteje 10 °C ter se tako dobi spodnja mejna temperatura uporabe $T_{(S)mejna}$ oziroma $T_{(m)mejna}$.

Pri preiskavi se vedno izvajata dve paralelki (preizkusi se dve prizmi pri isti temperaturi), za kateri velja, da mora biti ponovljivost rezultatov S_{60} je 9 % ter m_{60} 4 % srednje vrednosti. Zahteva po obnovljivosti je za S_{60} 27 %, za m_{60} pa 13 % srednje vrednosti [7].

Preiskava BBR je namenjena ugotavljanju lastnosti dolgotrajno (RTFOT+PAV) staranih bitumnov: V okviru magistrske naloge smo izvajali to preiskavo tudi na vhodnem in na kratkotrajno (po RTFOT) staranem bitumnu zaradi ugotavljanja odvisnosti med preiskavami, ki določajo lastnosti pri nizkih temperaturah.

2.4.2 DSR - kompleksni strižni modul po standardu SIST EN 14770

Z dinamičnim strižnim reometrom (DSR) lahko preiskujemo viskoelastično in elastično obnašanje bitumnov. Metoda se je najprej uveljavila v specifikacijah za asfalt (Superpave's Performance Graded asphalt binder specification) v Združenih državah Amerike (ZDA). Ameriške specifikacije za določanje karakteristik bitumnov temeljijo predvsem na preiskavah DSR in BBR. Ker so klimatske razmere v državah ZDA zelo različne, je v njihovih priporočilih predvideno, da se tudi temperature, pri katerih se izvajajo preiskave, izbirajo glede na pričakovane temperature v času uporabe asfalta.

Glede na ugotovitve ameriških strokovnjakov parametra G^* (kompleksni strižni modul) in δ (fazni kot) opredeljujeta dva pomembna dejavnika pri nastanku poškodb asfalta:

- tvorjenje kolesnic (pri višjih temperaturah oziroma elastičnem področju bitumna) in pa
- tvorjenje razpok zaradi utrujanja pri nižjih temperaturah oziroma visko-elastične območju

Preiskava s katero ugotavljamo G^* in δ , v skladu z določili AASHTO [12], ne služi neposredno ugotavljanju lastnosti bitumnov pri temperaturah pod lediščem. Iz korelacij med tvorjenjem razpok zaradi utrujanja pri temperaturah nižjih od $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ se nato oceni uporabnost bitumna pri temperaturah pod lediščem oziroma mejna temperatura $T_{N(\text{mejna})}$. Standard predvideva, da se za ugotavljanje poškodb zaradi utrujanja izvedejo preiskave samo na dolgotrajno staranem bitumnu. Preiskave na nestaranem in kratkotrajno staranem bitumnu se izvajajo pri višjih temperaturah (nad $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$) samo za ugotavljanje nastanka poškodb (kolesnic) pri visokih temperaturah zraka.

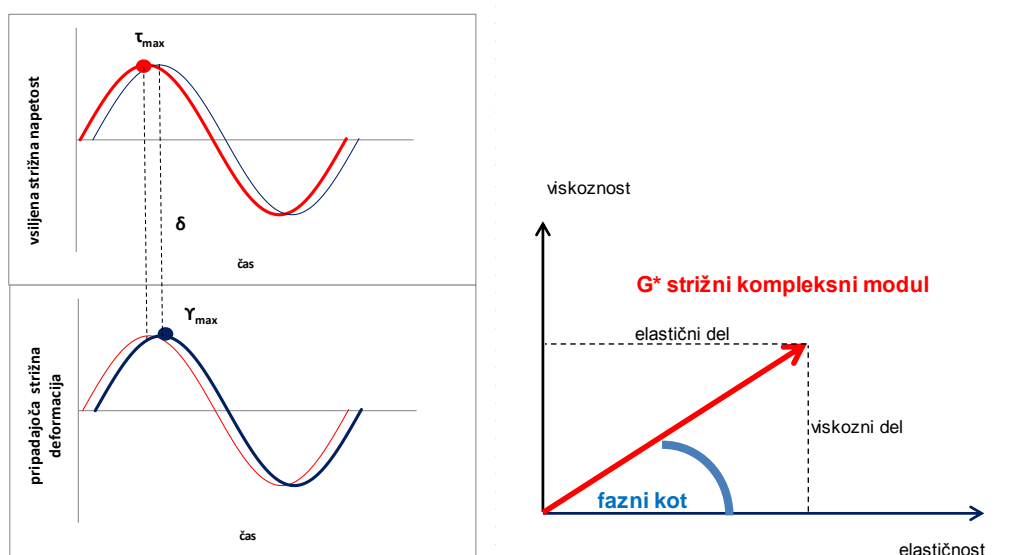


Slika 2-14 Dinamični strižni reometer (laboratorij ZAG Ljubljana)

V Evropskem prostoru se preiskava izvaja po standardu SIST EN 14770 - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR), ki je bil prvič izdan leta 2005. S preiskavo določimo kompleksni strižni modul G^* in fazni kot δ (fazni zamik). Naprava je prikazana na sliki 2-14. Naprava ima podstavek in dve horizontalno postavljeni ploščici krožne oblike. Preiskava se izvaja na tankem vzorcu bitumna, ki ga namestimo na spodnjo ploščico, ki je nepomična.

Zgornjo ploščico pritisnemo na vzorec bitumna. V času izvedbe preskusa spodnja ploščica miruje, zgornja pa oscilira s predpisano hitrostjo 10 rad/sec (1,59 Hz), da se v vzorcu ustvarijo strižne sile.

Bitumen je naravni material, ki je viskoelastičen, obnašanje je odvisno od temperature. S preiskavo DSR je uvedena količina 'kompleksni strižni modul', ki se označuje z G^* . Izraža celotno odpornost vzorca na deformacije med ponavljajočim se striženjem. Fazni kot (δ) je zamik med največjo vsiljeno strižno napetostjo in največjo strižno deformacijo (slika 2-15). Pri preiskavi se izmeri časovni zamik v sekundah, ki se ga pretvori v fazni kot z upoštevanjem oscilatorne frekvence. Fazni kot lahko zavzame vrednosti od 90° do 0°. V primeru, da je material popolnoma elastičen, je fazni kot 0°, popolnoma viskozen material pa ima fazni kot 90°. Na sliki 2-16 je prikazano spreminjanje faznega kota in kompleksnega strižnega modula v odvisnosti od temperature preiskave. Z višanjem temperature se strižni modul zmanjšuje, fazni kot pa se povečuje.



Slika 2-15 Definicija faznega zamika [36]

$$\tau_{max} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (2-6)$$

$$\gamma_{max} = \frac{\theta r}{h} \quad (2-7)$$

$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} \quad (2-8)$$

τ_{max} = maksimalna vnešena napetost (kPa)

γ_{max} = maksimalna izmerjena deformacija (kPa)

T = maksimalni vnešeni navor (kNm)

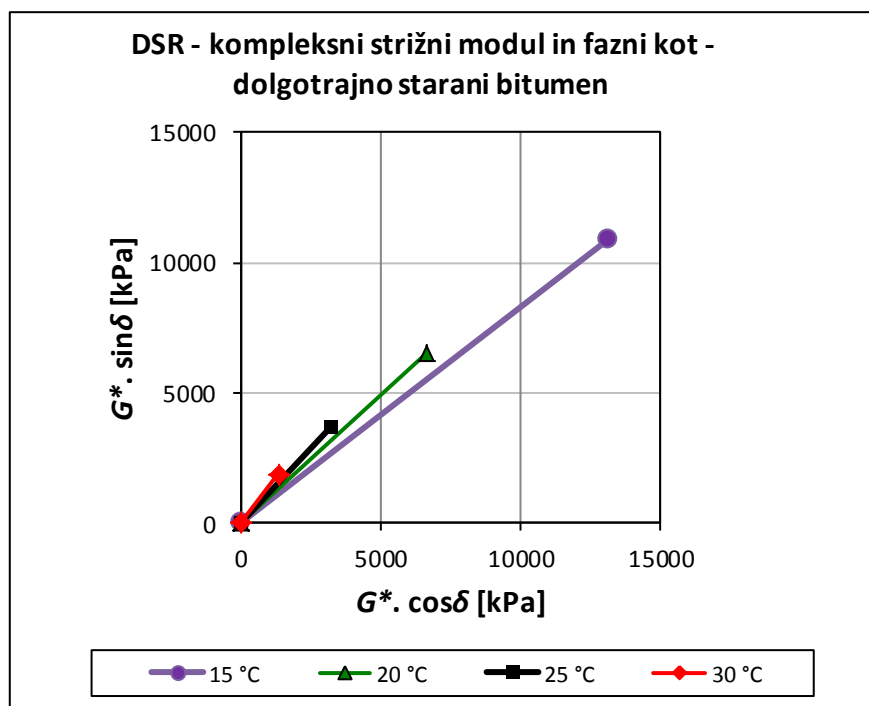
r = radij vzorca

θ = krožni kot (v radianih)

h = višina vzorca

δ = fazni kot je časovni zamik med τ_{max} in γ_{max} izražen v stopinjah

G^* = kompleksni strižni modul



Slika 2-16 Spreminjanje G^* in δ v odvisnosti od temperature preiskave

Takoj po vgradnji je bitumen manj viskozen in bolj elastičen kot kasneje v življenjski dobi. Zato takrat predstavljajo deformacije (tvorjenje kolesnic) glavni vzrok za poškodbe asfalta. Bitumen mora biti zato na začetku uporabe dovolj tog, da lahko kljubuje prometnim obremenitvam in hkrati dovolj elastičen, da se lahko po deformacijah vrne v prvotno lego. Zato mora biti $G^*/\sin\delta$ v začetku življenjske dobe oziroma takoj po vgradnji dovolj velik. V ameriških specifikacijah je podana minimalna vrednost za elastično komponento strižnega modula oziroma $G^*/\sin\delta$ za kratkotrajno starani bitumen. Za nestarani bitumen (pred proizvodnjo asfalta in vgradnjo) je postavljena nekoliko drugačna (še nižja) mejna vrednost. Večji kot je fazni kot, bolj je bitumen elastičen in sposoben vračanja v prvotno lego.

Bitumen v asfaltu z leti uporabe otrdi – postane bolj viskozen, hkrati pa mora ostati tudi dovolj elastičen. Prenašati mora prometne obremenitve in se po deformacijah zaradi obremenitev vrniti v prvotno lego tudi pri nizkih temperaturah. Zato bitumen tudi po desetih letih uporabe ne sme postati preveč tog, saj se ne bi mogel vračati v prvotno lego in bi nastale razpoke. V ameriških specifikacijah je zato podana za dolgotrajno starane bitumne največja vrednost za viskozni del kompleksnega strižnega modula oziroma mora biti $G^* \sin\delta$ dovolj majhen.

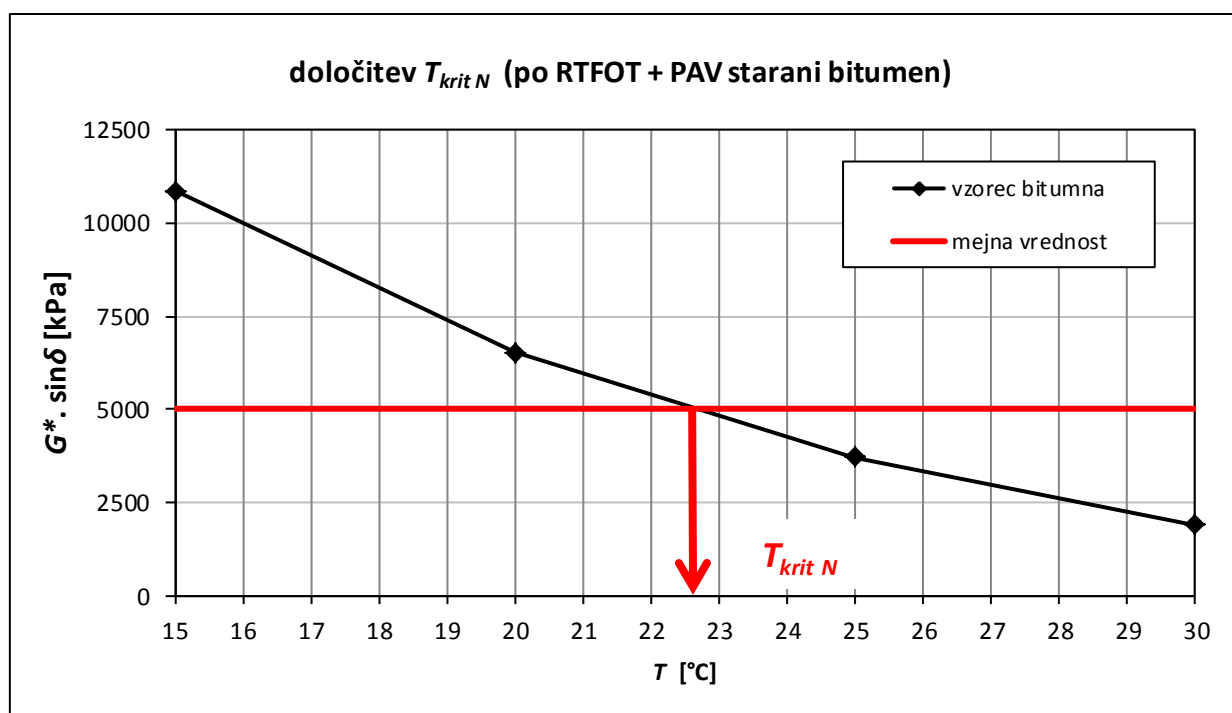
Oscilatorni strižne teste smo izvedli na dolgotrajno staranem bitumnu. Preiskave dolgotrajno staranih bitumnov smo izvedli pri temperaturah 15 °C, 20 °C, 25 °C in 30 °C. Uporabili smo ploščico premera 8 mm ter višino vzorca 2 mm. Temperature, pri katerih izvajamo preiskave, se razlikujejo glede na vrsto bitumna, saj so mejne vrednosti za vse cestogradbene dolgotrajno starane bitumne enake (B 70/100, B 50/70, PmB itd).

Hitrost striženja 10 radianov/sekundo (1,59 Hz) naj bi simulirala strižne obremenitve pri hitrosti vozil cca 90 km/h. Iz meritev kompleksnega strižnega modula in faznega kota

dolgotrajno staranega bitumna B 70/100 pri temperaturah od 15 °C do 30 °C lahko ovrednotimo tudi obnašanje pri nizkih temperaturah s pomočjo kriterija podanega v AASHTO [12] - kriterij razpok zaradi utrujanja:

$$G^* \cdot \sin \delta \leq 5000 \text{ kPa} \quad (\text{za RTFOT+PAV starani bitumen}) \quad (2-9)$$

Na graf nanese izmerjene vrednosti pri različnih temperaturah in pri mejni vrednosti odčitamo $T_{krit N}$ mejno temperatura za dolgotrajno starani bitumen (po RTFOT+PAV). Na podlagi $T_{krit N}$ pa ovrednotimo primernost bitumna za uporabo pri temperaturah pod lediščem s pomočjo zahtev podanih v preglednici (Table 1) v AASHTO [12]. Na sliki 2-17 je prikazana določitev kritične temperature $T_{krit N}$.



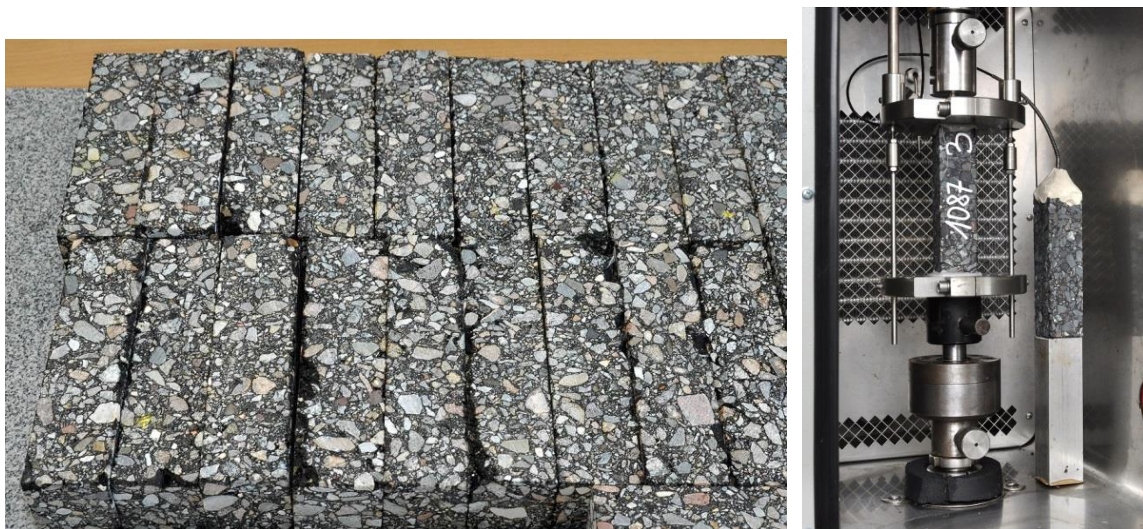
Slika 2-17 Določitev kritične temperature $T_{krit N}$

Natančnost te metode preskušanja še ni bila ugotovljena. Iz standarda [8] lahko razberemo, da so bili izvedeni primerjalni preskusi s vzporednimi ploščicami takih dimenzij, ki smo jih v tej nalogi uporabili za preiskave (premer 25mm ter 8mm). Na osnovi teh preskusov je bilo zaključeno, da je možno dobiti ponovljivost za kompleksni strižni modul $|G^*|$ v območju od 0 % do 10 % ne glede na vrsto bitumna in stanje (nestarani, kratkotrajno ali dolgotrajno starani). Ponovljivost za fazni kot δ lahko dobimo v območju od 0 % do 5 % ne glede na vrsto in stanje bitumna.

2.5 Odpornost asfalta pri nizkih temperaturah

Pri gradnji cest želimo, da je življenjska doba vozišča čim daljša. Zato moramo skrbno izbrati asfaltno zmes in vrsto bitumna glede na namen uporabe ceste in na klimatske pogoje. Razpoke so najbolj pogosta poškodba asfalta na cestah. Vzrokov za razpoke je veliko, najbolj pogosta pa sta preveč deformabilna podlaga in premajhna sposobnost za povrnitev v prvotno lego pri nizkih temperaturah. Obnašanje asfaltne zmesi pri nizkih temperaturah lahko vrednotimo z različnimi preiskavami, ki so opisane v standardu SIST EN 12697-46 'Odpornost asfaltne plasti proti razpokam pri nizkih temperaturah z enoosnimi nateznimi preskusi'. Pri nas se je najbolj uveljavila preiskava, s katero določimo rezervo natezne trdnosti vzorca asfalta. Preiskava sestoji iz dveh preskusov: enoosni natezni preskus (Uniaxial Tension Stress Test – UTST) ter ohlajevalni preskus (Thermal Stress Restrained Specimen Test – TSRST).

Preiskave se izvajajo na vzorcih oblike prizme dimenzij $(40\pm 2)\times(40\pm 2)\times(160\pm 2)$ mm³, ki so običajno izrezani iz asfaltnih plošč pripravljenih s segmentnim zgoščevalnikom. Iz vsake plošče se izreže najmanj 12 prizem (slika 2-18), na katerih se najprej določi njihovo prostorninsko maso ρ [kg/m³] po standardu SIST EN 12697-6 [10]. Preskušanje se opravlja na stiskalno-trgalnem stroju v temperaturni komori. Temperaturna komora mora imeti temperaturno območje od -40 °C do 100 °C, z natančnostjo nastavitve 0,1 °C in stabilnostjo temperature $\leq \pm 0,1$ °C ter mora omogočati padanje temperature s hitrostjo $(10\pm 0,5)$ °C/h.



Slika 2-18 Prizmatični preskušanci in komora za preskušanje (laboratorij ZAG)

Preiskava sestoji iz dveh preskusov [9]

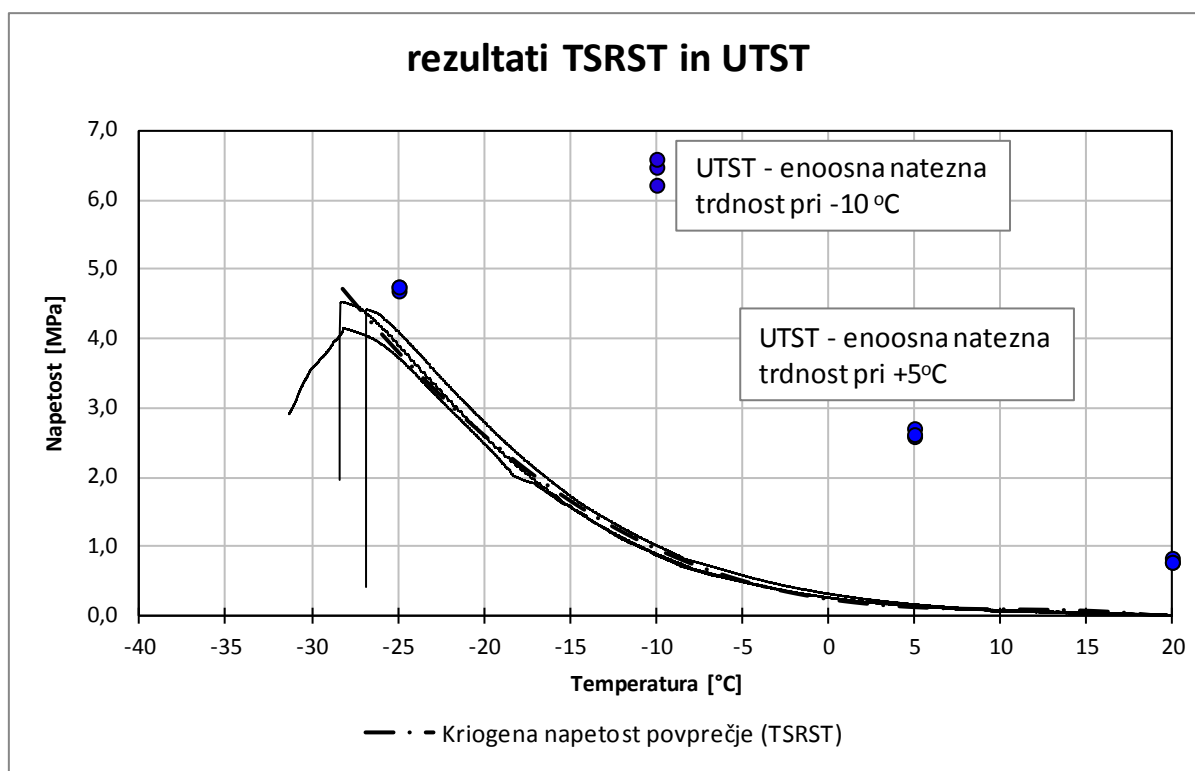
1) Enoosni natezni preskus (UTST)

je opisan v točki 8.1 standarda SIST EN 12697-46. Za enoosni natezni preskus potrebujemo najmanj tri preskušance pri vsaki testni temperaturi (skupaj najmanj 12). Pri enoosnem nateznem preskusu preskušanelec enakomerno raztegujemo pri konstantni temperaturi. Preskušanje poteka pri temperaturah T_i 20°C, 5°C, -10°C, -25°C. Na začetku temperiramo preskušanelec najmanj dve uri v komori na temperaturi $T = T_i \pm 0,5$ °C. V tem času na vzorec ne sme delovati nobena dodatna sila. Temperirani preskušanelec nato raztezamo s hitrostjo $d\varepsilon = (0,625 \pm 0,025)$ %/min. Rezultat sta natezna trdnost β_i [MPa] in raztezek pri porušitvi

$\epsilon_{failure}$ [%]. Standard (EN12697-46:2012) ne podaja zahtev za ponovljivost in obnovljivost za to preiskavo. Za primerno se smatra naslednja ponovljivost rezultatov (dobljenih vrednosti natezne trdnosti): primerna ponovljivost je odvisna od temperature, pri kateri izvajamo preiskavo in sicer 0,7 MPa pri temperaturah $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter 0,3 MPa pri $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 0,1 MPa pri $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Primerna ponovljivost je zelo odvisna od vrste asfaltne zmesi oziroma vsebnosti votlin v asfaltni zmesi. Primer dobljenih rezultatov enosnega nateznega preskusa [39] je na sliki 2-18 prikazan z modrimi pikami.

2) Ohlajevalni preskus (TSRST)

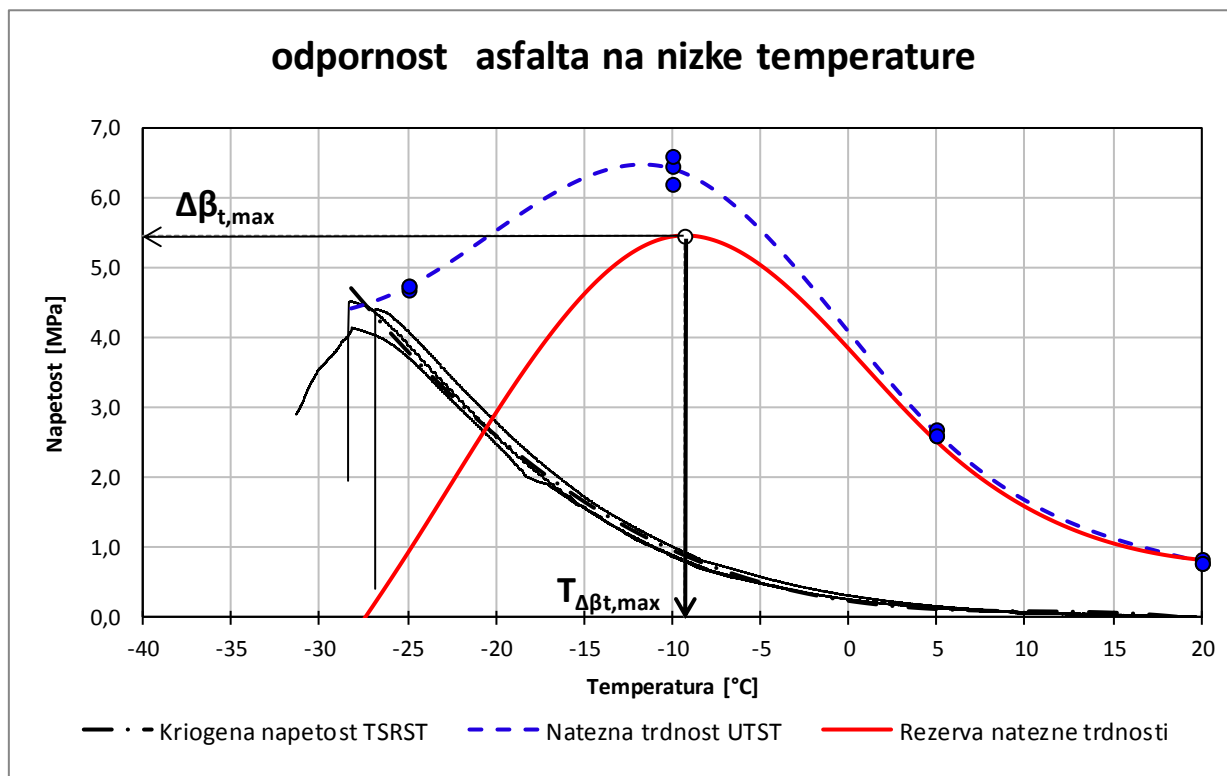
je opisan v točki 8.2 standarda SIST EN 12697-46. Tudi za ohlajevalni preskus potrebujemo najmanj tri preskušance. Pri ohlajevalnem preskusu preskušanecega vzorca ohlajamo pri nespremenjeni dolžini preskušancega vzorca (razdalja med obema koncema prizmatičnega vzorca mora biti ves čas konstantna). Na začetku temperiramo preskušanecega vzorca najmanj 2 uri v komori na temperaturi $T_0 = (20 \pm 0,5)\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tem času na vzorec ne sme delovati nobena dodatna sila. Ohlajanje poteka s hitrostjo $dT = (-10 \pm 0,5)\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Zaradi nižanja temperature pod ledišče ob vzdrževanju konstantne začetne dolžine preskušancega vzorca se v vzorcu ustvarijo napetosti, ki so v standardu [9] poimenovane kriogene napetosti. Rezultat preskusa je kriogena napetost v odvisnosti od temperature $\sigma_{cry}(T)$ [MPa], kriogena napetost pri porušitvi $\sigma_{cry, failure}$ [MPa] in temperatura pri porušitvi $T_{failure}$ [$^{\circ}\text{C}$]. Primer dobljenih rezultatov ohlajevalnega preskusa [39] je na sliki 2-19 prikazan s črnimi črtami.



Slika 2-19 Rezultati ohlajevalnega preskusa in enosnih nateznih preskusov

Rezultat preskušanja, dobljen iz obeh preiskav, je rezerva natezne trdnosti kot je opisano v točki 9.1 standarda SIST EN 12697-46. Za predstavitev natezne trdnosti pri neki temperaturi se rezultati pri štirih temperaturah modelirajo s 'spline' numerično funkcijo (polinom, definiran po posameznih odsekih). Ta funkcija je prikazana kot modra črtkana črta na sliki 2-20. Rezerva natezne trdnosti $\Delta\beta_i(T)$ [MPa] je definirana kot razlika med natezno trdnostjo $\beta_i(T)$ in

kriogeno napetostjo $\sigma_{cry}(T)$ pri posamezni temperaturi. Rezerva natezne trdnosti $\Delta\beta_t$ [MPa] je prikazana na sliki 2-20 z rdečo črto. Maximum krivulje predstavlja največjo rezervo natezne trdnosti $\Delta\beta_{t,max}$ [MPa] in pripadajočo temperaturo $T(\Delta\beta_{t,max})$ [°C].



Slika 2-20 Grafični prikaz rezultatov preiskave odpornosti asfalta na nizke temperature

Čim nižja je temperatura, pri kateri je rezerva natezne napetosti največja, tem bolj je asfalt odporen proti razpokam pri nizkih temperaturah. Na odpornost proti nizkim temperaturam najbolj vplivajo lastnosti bitumna ter delež votlin v asfaltni zmesi, v manjši meri pa tudi zrnavost kamnitih zrn v asfaltni zmesi.

Preiskava je relativno nova, standard ne podaja zahtev za obnovljivost in ponovljivost za preiskavi TSRST in UTST. Dokler ne bo na razpolago medlaboratorijskih preiskav pa je priporočeno naslednje: ponovljivost rezultatov TSRST - temperatura pri porušitvi se smatra za nezanesljiv rezultat, če se razlikuje za več kot 2 °C na treh preskušancih, ki jih preskusi ista oseba, napetost pa, če se razlikuje za več kot 0,5 MPa [9].

Prav tako še ni na razpolago priporočenih vrednosti za največjo rezervo natezne trdnosti in pripadajočo temperaturo na mednarodnem nivoju za posamezne asfaltni zmesi [31].

2.5.1 Korelacije med karakteristikami bitumna in asfalta pri nizkih temperaturah

Pregledali smo literaturo, ki obravnava povezave med rezultati preiskav bitumnov ter rezultati preiskav odpornosti vzorcev asfalta na nizke temperature.

V več študijah so predstavljeni rezultati DSR preiskav, ki pa so se izvajali pri temperaturi 60 °C [18], [19], [20], [21]. Analiza teh rezultatov sicer pokaže nekaj korelacij med mejno temperaturo pri porušitvi pri ohlajevalnem preskusu in kompleksnim strižnim modulom pri 60 °C. Te povezave so verjetno posledica lastnosti bitumnov, da se manj togi bitumni načeloma bolje obnašajo pri nizkih temperaturah. Verjetno je, da bi s preiskavami DSR izvedenimi pri nižjih temperaturah dobili korelacije med mejno temperaturo asfalta pri porušitvi pri ohlajevalnem preskusu in kompleksnim strižnim modulom. Vendar pa nismo uspeli pridobiti nobene literature, ki bi opisovala te zveze [29].

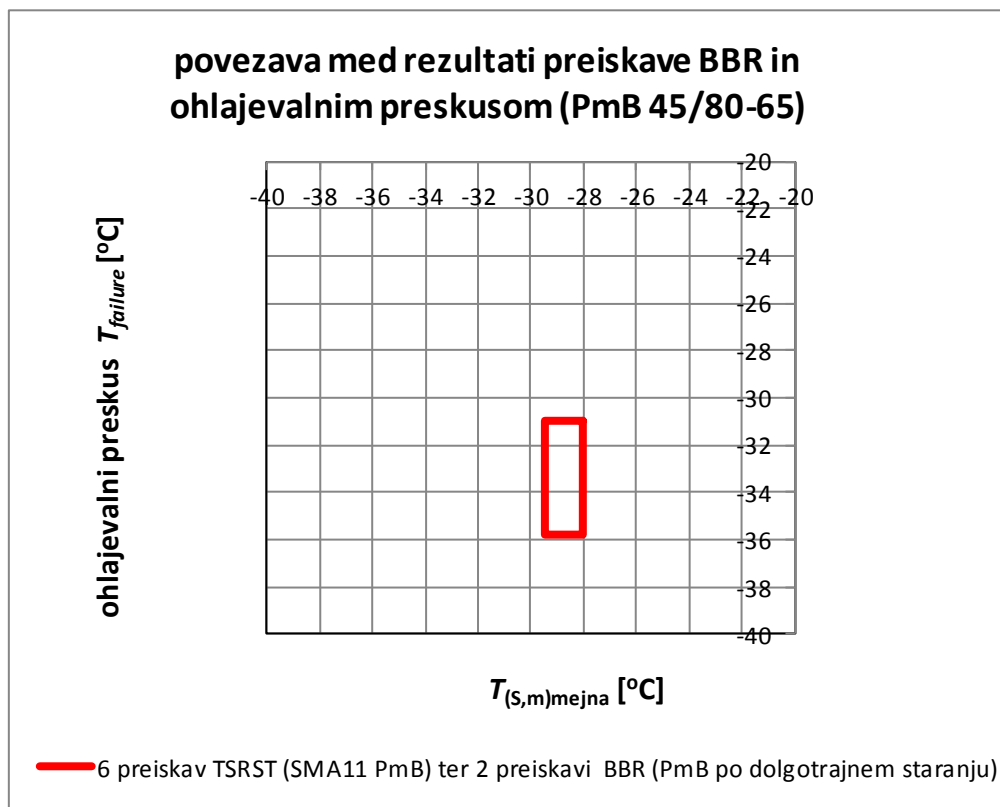
Karakteristike bitumnov zelo vplivajo na mejno temperaturo porušite pri ohlajevalnih preskusih. Poleg vrste bitumna pa na mejno kriogeno napetost in deformacije pri porušitvi pomembno vpliva tudi sestava asfaltnih zmesi, predvsem vsebnost votlin in vsebnost bitumna. Zato direktne univerzalne povezave med karakteristikami bitumnov pri nizkih temperaturah in karakteristikami asfaltnih zmesi niso možne.

Iz literature je prav tako razvidno, da lahko iz temperature pretrgališča po Fraass-u sklepamo na obnašanje asfalta pri nizkih temperaturah, vendar pa so korelacije med T_{Fraass} in odpornostjo asfalta na nizke temperature zelo šibke.

V literaturi je na voljo več študij, ki opisujejo rezultate preiskav BBR bitumnov in preiskav odpornosti na razpoke pri nizkih temperaturah, narejenih z istimi bitumni. Z BBR preiskavami so ovrednotili lastnosti bitumnov pri nizkih temperaturah na enak način, kot smo jih določili v tej nalogi. Kot končna temperatura uporabnosti bitumnov pri nizkih temperaturah je upoštevana višja od temperatur glede na kriterij 300 MPa in m-vrednost 0,3. Od te temperature se odšteje 10 °C (kot je smiselno povzeto po AASHTO [12]). Glede na navedbe v literaturi [22], [23], [24], [25], [26] lahko zaključimo, da so šibke korelacije med mejno temperaturo uporabnosti bitumnov pri nizkih temperaturah $T_{(S)mejna}$ oziroma $T_{(m)mejna}$ in mejno temperaturo pri porušitvi pri ohlajevalnem preskusu $T_{failure}$. Kljub temu lahko ugotovimo, da morajo biti mejne temperature bitumna nižje od -20 °C, če želimo doseči mejno temperaturo asfalta pri ohlajevalnem testu $T_{failure}$ nižjo od -25 °C [29].

Korelacij med mejno temperaturo asfalta pri ohlajevalnem testu $T_{failure}$ in mejno temperaturo uporabnosti bitumnov pri nizkih temperaturah za cestogradbene bitumne B 70/100 nimamo na razpolago, imamo pa nekaj podatkov za s polimeri modificirane bitumne. V laboratoriju ZAG smo v zadnjih treh letih (2012-2015) izvedli sedem ohlajevalnih preskusov (TSRST) vzorcev asfaltna zmesi SMA11 PmB 45/80-65, v katerih je bil uporabljen bitumen istega proizvajalca. Mejne temperature pri porušitvi so bile od 31 °C do 35,8 °C, povprečno pa 32,6 °C [40]. Preskuse smo naredili na vzorcih asfaltna zmesi, ki je bila odvzeta pri vgradnji in nato zgoščena v laboratoriju. V obdobju 2014-2015 smo dolgotrajno starali in preiskali dva vzorca s polimeri modificiranega bitumna PmB 45/80-65 istega proizvajalca bitumna, kot je bil uporabljen v teh asfaltih [41]. Tako smo dobili območje korelacij med laboratorijsko dolgotrajno staranim bitumnom in proizvedeno asfaltno zmesjo, ki pa še ni bila podvržena dolgotrajnem staranju. S preiskavo BBR smo določili mejne temperature na dveh vzorcih

PmB 45/80-65; $T_{(m,S)mejna}$ je bila $-28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sklepamo, da pri $T_{(m,S)mejna}$ nižja od $-28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ za dolgotrajno starani s polimeri modificiran bitumen lahko pričakujemo $T_{failure}$ nižjo od $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ za proizvedeno asfaltno zmes SMA11. Ugotovitev je podobna, kot je bilo zaključeno na podlagi pregleda literature. Območje korelacij med preiskavo BBR na dolgotrajno staranih bitumnih in ohlajevalnim preskusom na asfaltnem vzorcu, ki še ni bil dolgotrajno staran, je prikazano na sliki 2-21.



Slika 2-21 Odvisnost med $T_{(m,S)mejna}$ (BBR) in $T_{failure}$ (TSRST)

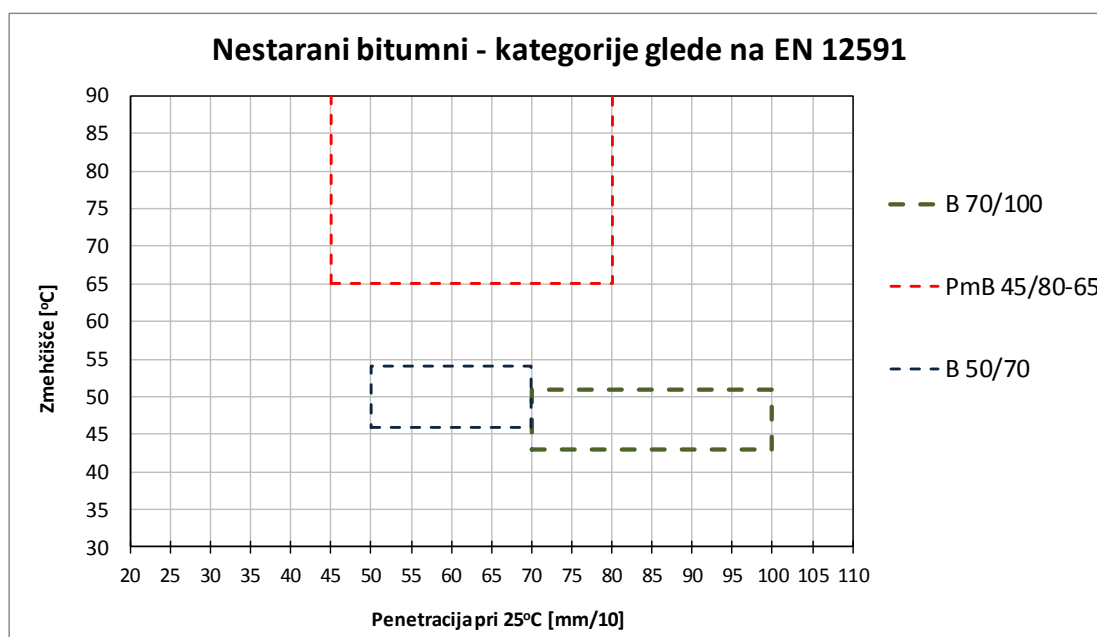
Za običajne cestogradbene bitumne (B 50/70 in B 70/100) pa teh povezav med $T_{(m,S)mejna}$ in $T_{failure}$ še nimamo, niti za dolgotrajno, niti za kratkotrajno starane bitumne. Vsekakor pa bo treba zveze ugotovljati za vsako asfaltno zmes (AC, SMA, PA), ki se pri nas uporablja.

3 REZULTATI PREISKAV CESTOGRADBENIH BITUMNOV B 70/100

Namen naloge je, da se ugotovi vpliv staranja na cestogradbene bitumne, ki se uporabljajo v slovenskem prostoru ter da se začne formiranje baze podatkov o lastnostih starih bitumnov glede na veljavne slovenske in evropske standarde. Ker je nabor zahtev v sedaj veljavnih standardih majhen, smo s preiskavami ugotavljali lastnosti glede na zahteve v ameriških specifikacijah [12] in priporočilih iz literature [16], [18]. Preiskave starih bitumnov so tudi v evropskem prostoru relativno nove in še ne obstajajo kriteriji za obnašanje standardiziranih vrst bitumnov.

Preiskave togosti cestogradbenih bitumnov po metodi BBR se v Sloveniji praviloma ne izvajajo, tako da so bili bitumni B 70/100 v okviru te naloge preiskani prvič. V nalogi smo želeli tudi za preiskane bitumne ugotoviti korelacije med novejšimi in običajnimi preiskavami bitumnov (penetracija, PK, Fraass). Zato smo izbrali bitumne, ki se uporabljajo v Sloveniji, in izvedli opisane laboratorijske preiskave.

Na slovenskem tržišču se pojavljata v zadnjih letih dva običajna cestogradbena bitumna in sicer z oznako B 50/70 ter B 70/100. Poleg teh dveh bitumnov se uporablja še s polimeri modificirani bitumen z oznako PmB 45/80-65 za zelo prometno obremenjene ceste. Primerjava osnovnih lastnosti teh treh bitumnov (penetracija pri 25 °C in zmečičišče nestaranih bitumnov) glede na EN 12591:2009 [1] oziroma SIST 1035 [14] je prikazana na sliki 3-1. Nestarani s polimeri modificirani bitumni imajo drugačno (širše) območje penetracije in višje zmečičišče. Zmečičišče nestaranih bitumnov B 70/100 je najnižje, zato so ti bitumni bolj podvrženi deformacijam pri visokih temperaturah v primerjavi z B 50/70. Penetracija nestaranih bitumnov B 70/100 je višja, zato so bolj odporni proti nizkim temperaturah. Če bi se podobne lastnosti ohranile tudi po staranju, bi lahko zaključili, da se B 70/100 bolje obnaša pri nizkih temperaturah kot B 50/70.



Slika 3-1 Primerjava osnovnih lastnosti standardiziranih bitumnov po proizvodnji

3.1 Izbira vzorcev

Izbrali smo šest vzorcev bitumna B 70/100 šestih proizvajalcev, katerih bitumen se uporablja v slovenskih asfaltnih bazah. Proizvajalci so bili OMV, MOL, ENI, Alma Petroli, IES in RNAF. Bitumni so bili vzorčeni od januarja 2014 do julija 2015. Virov, iz katerih je bil pridobljen bitumen v rafinerijah proizvajalcev, ne poznamo. Možno je, da se surova nafta dobavlja iz različnih virov, tako da se lahko tudi kakovost proizvedenega bitumna iz iste rafinerije s časom spreminja.

Pri vrednotenju rezultatov preiskav smo upoštevali zahteve SIST EN 12591 Bitumen in bitumenska veziva – Specifikacije za cestogradbene bitumne [1] in AASHTO M 320-10 Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder [12]. Pri programu preiskav smo upoštevali tudi neformalna priporočila EAPA, ki sodeluje pri pripravi nove izdaje standarda EN 12591. Pregled izvedenih preiskav v okviru te naloge je v preglednici 3-1.

Preglednica 3-1 Pregled izvedenih laboratorijskih preiskav

			nestarani bitumni	Kratkotrajno starani - po RTFOT	Dolgotrajno starani - po RTFOT+PAV
Vrsta preiskave	lastnost	Enota	št. vzorcev	št. vzorcev	št. vzorcev
Določevanje penetracije z iglo	Pen	mm/10	6	6	6
Določanje zmeščišča - PK	T_{PK}	°C	6	6	6
Določevanje pretgališča po Fraassu	T_{Fraass}	°C	6	6	6
Dinamični strižni reometer DSR	G^* in δ 1,59 Hz (10 rad.s ⁻¹)	MPa	6*	6*	6 (pri štirih temperaturah)
Reometer z upogibno obremenitvijo BBR	$T_{(S)60}$ pri $S = 300$ MPa, $T_{(m)60}$ pri m -vrednost = 0,3	°C	6 (pri petih temperaturah)	6 (pri petih temperaturah)	6 (pri petih temperaturah)

6* za vrednotenje lastnosti pri visokih temperaturah

Za to nalogo smo izbrali šest vzorcev bitumna B 70/100, ki so označeni s številkami 1 do 6. V preglednici 3-2 so navedeni tudi datumi vzorčenja in laboratorijske oznake vzorcev. Vse preiskave so bile izvedene v Laboratoriju za asfalte in bitumne na ZAG Ljubljana. V poglavjih 3.4 do 3.8 so na kratko podani rezultati preiskav vseh šestih vzorcev s komentarji glede ustreznosti njihovih karakteristik glede na standard, ki velja v Sloveniji [1].

Preglednica 3-2 Laboratorijske oznake vzorcev preiskanih bitumnov

zap. oznaka vzorca	država rafinerije	vzorčeno	laboratorijska oznaka	zap. oznaka vzorca	država rafinerije	vzorčeno	laboratorijska oznaka
1	Avstrija	18. 11. 2014	H46/14B	4	BiH	7. 7. 2014	H39/15B
2	Madžarska	2. 12. 2014	H51/14B	5	Italija	8. 1. 2014	H5/14B
3	Italija	14. 1. 2014	H7/14B	6	Italija	16. 12. 2014	H6/14B

3.2 Zahteve za lastnosti bitumna B 70/100 v slovenskih standardih

Zahteve za lastnosti bitumna B 70/100 so podane v evropskem in hkrati slovenskem standardu SIST EN 12591:2009 (v Tabeli 1A in 1B), dodatnih zahtev v slovenskih predpisih ni (TSC). V preglednici 3-3 so podane zahteve iz standarda SIST EN 12591:2009. Zahteve, ki se nanašajo na lastnosti cestogradbenega bitumna po kratkotrajnem staranju, so označene s sivo barvo. Standardi ne predpisujejo nobenih zahtev za lastnosti bitumnov po dolgotrajnem staranju.

Preglednica 3-3 Zahteve za lastnosti bitumna B 70/100

lastnost bitumna B70/100	Standard/metoda	enota	zahteva	bitumen
penetracija pri 25°C	EN 1426	0,1 mm	70 do 100	nestarani
zmehčišče T_{PK}	EN 1427	°C	43 do 51	nestarani
odpornost proti otrjevanju pri 163°C	EN 12607-1			
ohranjena vrednost penetracije	EN 12607-1 in EN 1426	%	≥ 46	po RTFOT
zvišanje zmehčišča (po RTFOT)	EN 12607-1 in EN 1427	°C	≤ 11	po RTFOT
sprememba mase (po RTOFT)	EN 12607-1	% (m/m)	≤ 0,8	po RTFOT
plamenišče	EN ISO 2592	°C	≥ 230	nestarani
topnost	EN 12592	% (m/m)	≥ 99,0	nestarani
indeks penetracije	annex A	/	-1,5 do +0,7	nestarani
dinamična viskoznost pri 60°C	EN 12596	Pa.s	≥ 90	nestarani
pretrgališče po Fraass-u	EN 12593	°C	≤ -10	nestarani
kinematična viskoznost pri 135°C	EN 12595	mm ² /s	≥ 230	nestarani

Iz preglednice 3-3 lahko tudi ugotovimo, da so zahteve za lastnosti po kratkotrajnem staranju zelo skromne. Osnovni zahtevi za penetracijo in T_{PK} po kratkotrajnem staranju se ne nanašata na absolutne vrednosti, temveč na relativne vrednosti, ki so odvisne od ugotovljenih vrednosti teh bitumnov pred staranjem. Zahteve ne vključujejo karakteristik, ki bi povedale več o obnašanju teh bitumnov pri nizkih temperaturah.

Iz preglednice 3-3 in slik 2-4 'Indeks penetracije za vzorce B 70/100 preiskane v obdobju 2001-2015) ter 2-5 'Območje plastičnosti za B 70/100 preiskane v obdobju 2001-2015' lahko prav tako ugotovimo, da zahteve za nestarane bitumne niso stroge, saj so vsi preiskani vzorci v obdobju 2005-2015 v teh karakteristikah izpolnili zahteve.

3.3 Zahteve za lastnosti bitumnov, podane v AASHTO M 320-10

Način vrednotenja lastnosti bitumnov se v ameriških specifikacijah AASHTO M 320 [12] pomembno razlikuje od evropskih. Standardi ne predpisujejo zahtev za posamezne lastnosti ampak je pomembno obnašanje bitumnov pri nizkih in visokih temperaturah v celotni življenjski dobi.

Uporablja se oznaka Performance Grade (PG vv-*nn*). Oznaka 'vv' se nanaša na najvišjo temperaturo (v stopinjah Celzija) področja uporabe, '*nn*' pa na najnižjo temperaturo področja uporabe (pod lediščem v stopinjah Celzija). V preglednicah 3-4 in 3-5 so kot primer prikazane zahteve za bitumne klasificirane kot PG 58-22 in PG 64-22 v standardu AASHTO M 320. Prikazane so zahteve za najvišje in najnižje kritične temperature v času uporabe. Najvišja temperatura asfalta je definirana po posebni metodologiji in velja za 7-dnevno povprečje.

Preglednica 3-4 Zahteve podane v AASHTO M 320 [12] za PG 58-22

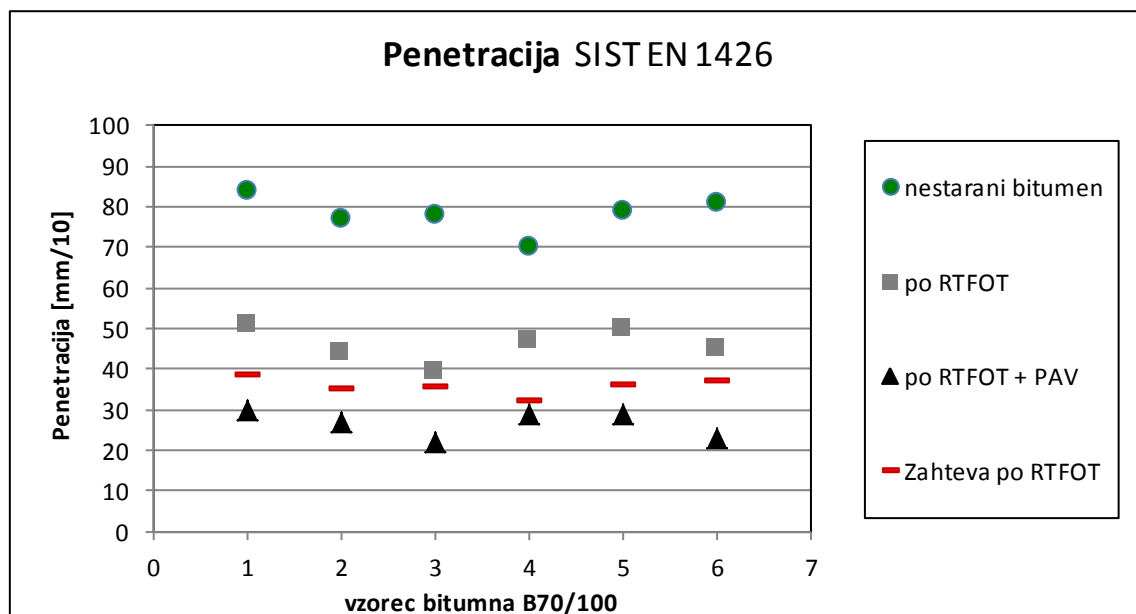
zahteve za NAJNIŽJE kritične temperature	oznaka		bitumen
temperature pri $S_{(60)} \leq 300$ MPa	$T_{(S)60}$	$\leq -12^{\circ}\text{C}$	po RTFOT+PAV
temperature pri $m_{(60)} \geq 0,3$	$T_{(m)60}$	$\leq -12^{\circ}\text{C}$	po RTFOT+PAV
zahteve za NAJNIŽJE kritične temperature (utrufanje)			
$G^* \cdot \sin \delta = 5\,000$ kPa (bitumen po RTFOT in PAV)	$T_{crit} = T_{krit\ N}$	$\leq +22^{\circ}\text{C}$	po RTFOT+PAV
zahteve za najvišje kritične temperature			
$G^* / \sin \delta = 1$ kPa (nestarani oziroma vhodni bitumen)	$T_{crit} = T_{krit\ V1}$	$\geq 58^{\circ}\text{C}$	nestarani
$G^* / \sin \delta = 2,2$ kPa (bitumen po RTFOT)	$T_{crit} = T_{krit\ V2}$	$\geq 58^{\circ}\text{C}$	po RTFOT

Preglednica 3-5 Zahteve podane v AASHTO M 320 [12] za PG 64-16

zahteve za NAJNIŽJE kritične temperature	oznaka		bitumen
temperature pri $S_{(60)} \leq 300$ MPa	$T_{(S)60}$	$\leq -6^{\circ}\text{C}$	po RTFOT+PAV
temperature pri $m_{(60)} \geq 0,3$	$T_{(m)60}$	$\leq -6^{\circ}\text{C}$	po RTFOT+PAV
zahteve za NAJNIŽJE kritične temperature (utrufanje)			
$G^* \cdot \sin \delta = 5\,000$ kPa (bitumen po RTFOT in PAV)	$T_{crit} = T_{krit\ N}$	$\leq +28^{\circ}\text{C}$	po RTFOT+PAV
zahteve za najvišje kritične temperature			
$G^* / \sin \delta = 1$ kPa (nestarani oziroma vhodni bitumen)	$T_{crit} = T_{krit\ V1}$	$\geq 64^{\circ}\text{C}$	nestarani
$G^* / \sin \delta = 2,2$ kPa (bitumen po RTFOT)	$T_{crit} = T_{krit\ V2}$	$\geq 64^{\circ}\text{C}$	po RTFOT

3.4 Penetracija

Na sliki 3-2 je prikazana penetracija pri 25 °C na nestaranih, kratkotrajno staranih in dolgotrajno staranih vzorcih bitumna. Na slikah so rezultati za nestarane bitumne označeni s krogom v zeleni barvi, kratkotrajno starani (po RTFOT) s sivim kvadratom, dolgotrajno starani bitumni (po RTFOT+PAV) pa s črnim trikotnikom. 'Zahteva po RTFOT' se nanaša na kratkotrajno starani bitumen – na 'ohranjeno vrednost penetracije'. Po kratkotrajnem staranju se izračuna ohranjena vrednost penetracije za posamezni vzorec bitumna ob predpostavki, da je penetracija nestarane bitumna 100 %.



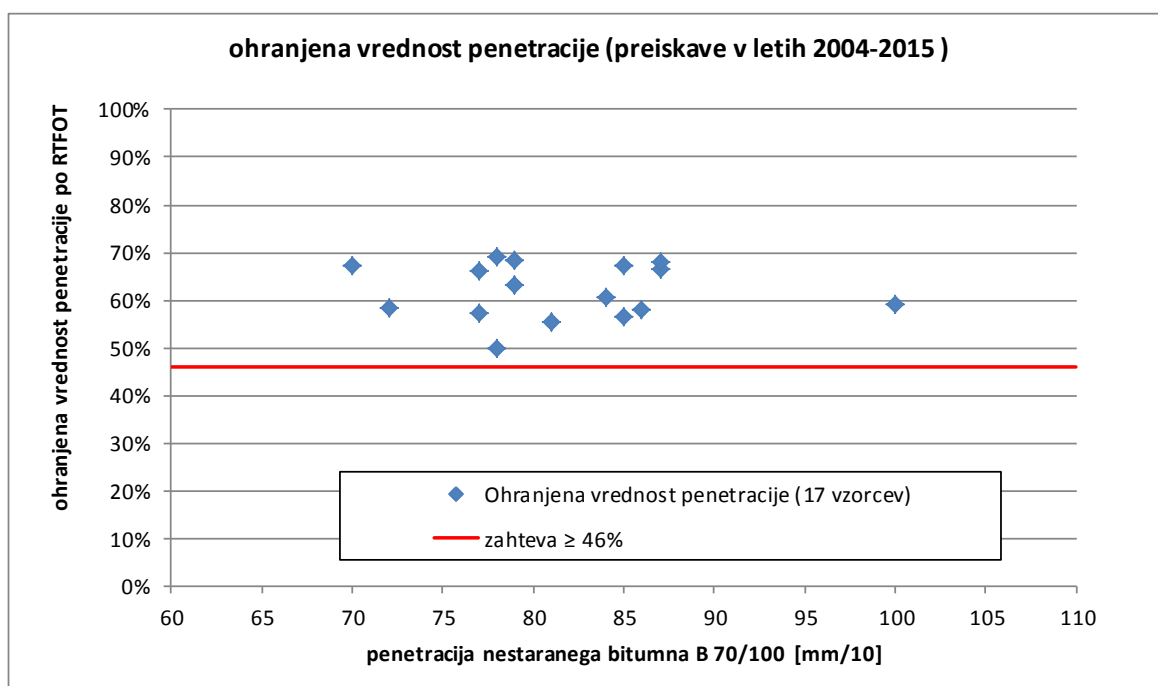
Slika 3-2 Rezultati - penetracija pri 25°C

S slike 3-2 je razvidno, da so bitumni po dolgotrajnem staranju različno otrdeli. Najbolj je otrdel vzorec bitumna 6, saj je bila sprememba penetracije največja. Glede na absolutne vrednosti po staranju imajo najvišje vrednosti bitumni 1, 2, 4 in 5. Iz teh preiskav sklepamo, da so ti bitumni najbolj odporni proti nizkim temperaturam.

Preglednica 3-6 Zahteve za karakteristike bitumnov - penetracija

Preiskave izvedene na	Ustreznost glede na SIST EN 12591:2009
nestaranemu bitumnu	vsi rezultati so v zahtevanih mejah (od 70 do 100 mm/10)
po RTOFT staranju	vsi rezultati so v zahtevanih mejah (več kot 46% ohranjene penetracije)
po RTOFT+PAV staranju	ni zahtev

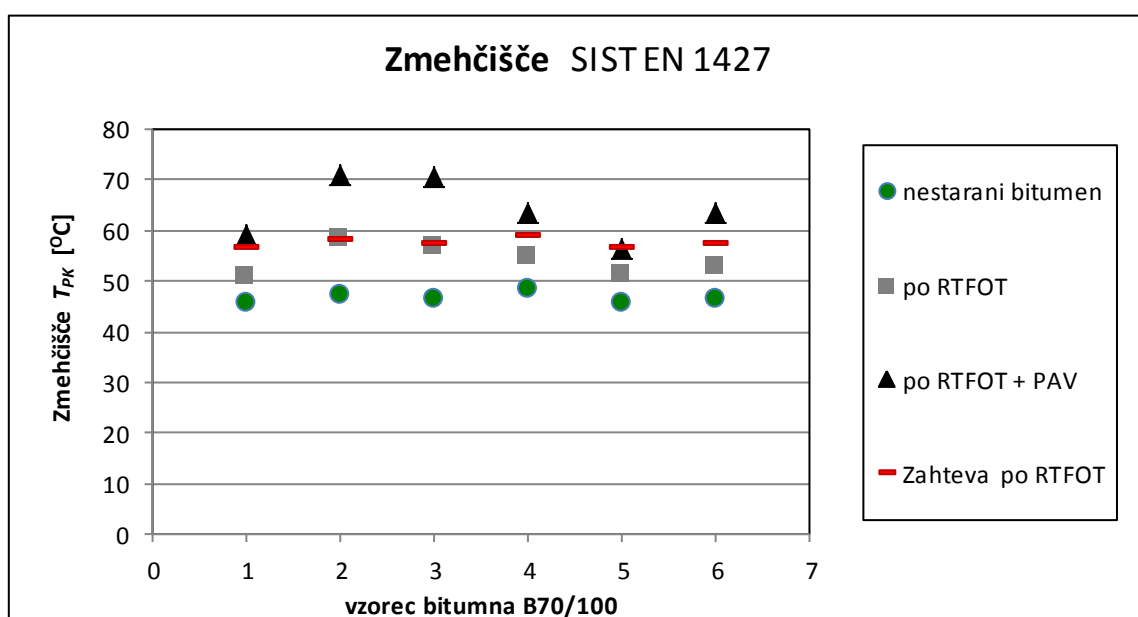
V laboratoriju ZAG smo v letih 2004 do 2015 izvedli kratkotrajno staranje ter preiskave penetracije in temperature zmečičišča T_{PK} na 17 vzorcih bitumna B 70/100 [41], vključno s šestimi vzorci v okviru te naloge. Na sliki 3-3 so prikazane ohranjene vrednosti penetracije po kratkotrajnem staranju. Ugotovimo lahko, da je penetracija otrdelega bitumna od 42 do 59, oziroma 50 % do 70 % prvotne vrednosti, kar ustreza zahtevi podani v SIST EN 12591:2009.



Slika 3-3 Ohranjena vrednost penetracije po RTFOT (2004-2015)

3.5 Zmehčišče PK

Po kratkotrajnem staranju se zmehčišče bitumna običajno poviša. Preiskava PK se ponovi ter se izračuna razliko temperature pred in po staranju. Na sliki 3-4 je prikazana temperatura zmehčišča na nestaranih, kratkotrajno staranih in dolgotrajno staranih vzorcih bitumna. 'Zahteva po RTFOT' se nanaša na kratkotrajno starani bitumen in sicer na dovoljeno zvišanje zmehčišča za 11 °C.



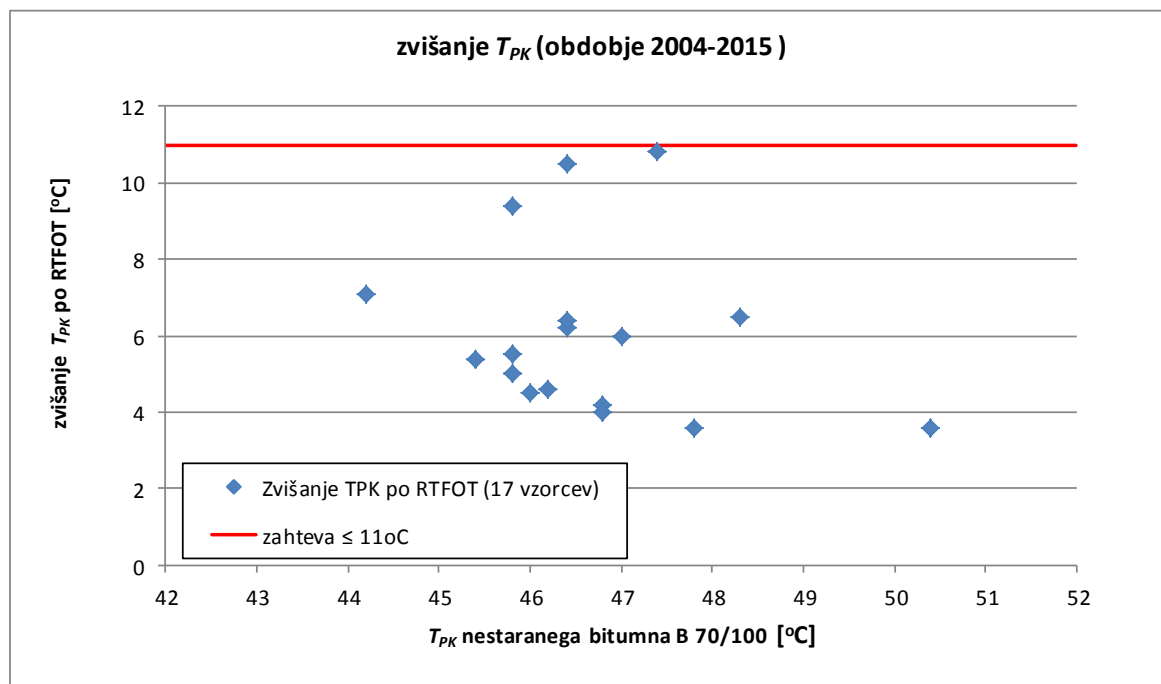
Slika 3-4 Rezultati - zmehčišče – T_{PK}

Zvišanje zmečkšča glede na nestarani bitumen pomeni, da je bitumen po staranju otrdel. Ugotovimo lahko, da je temperatura zmečkšča kratkotrajno staranega bitumna od 50 °C do 58 °C. Temperatura zmečkšča dolgotrajno staranih bitumnov pa je od 56 °C do 71 °C.

Preglednica 3-7 Zahteve za karakteristike bitumnov - T_{PK}

Preiskave izvedene na	Ustreznost glede na SIST EN 12591:2009
nestaranemu bitumnu	vsi rezultati so v zahtevanih mejah (od 43 °C do 51 °C)
po RTOFT staranju	vsi rezultati so v zahtevanih mejah (povišanje zmečkšča za manj kot 11 °C)
po RTOFT+PAV staranju	ni zahtev

S slike 3-4 je razvidno, da so bitumni po dolgotrajnem staranju različno otrdeli, zmečkšče se je po pričakovanjih pri vseh bitumnih zvišalo. Najbolj sta otrdela bitumna označen s številko 2 in 3, saj je bila sprememba zmečkšča največja. Glede na absolutne vrednosti imata najnižje vrednosti po kratkotrajnem staranju (sta najbolj primerna za visoke temperature) vzorca bitumna 1 in 5.

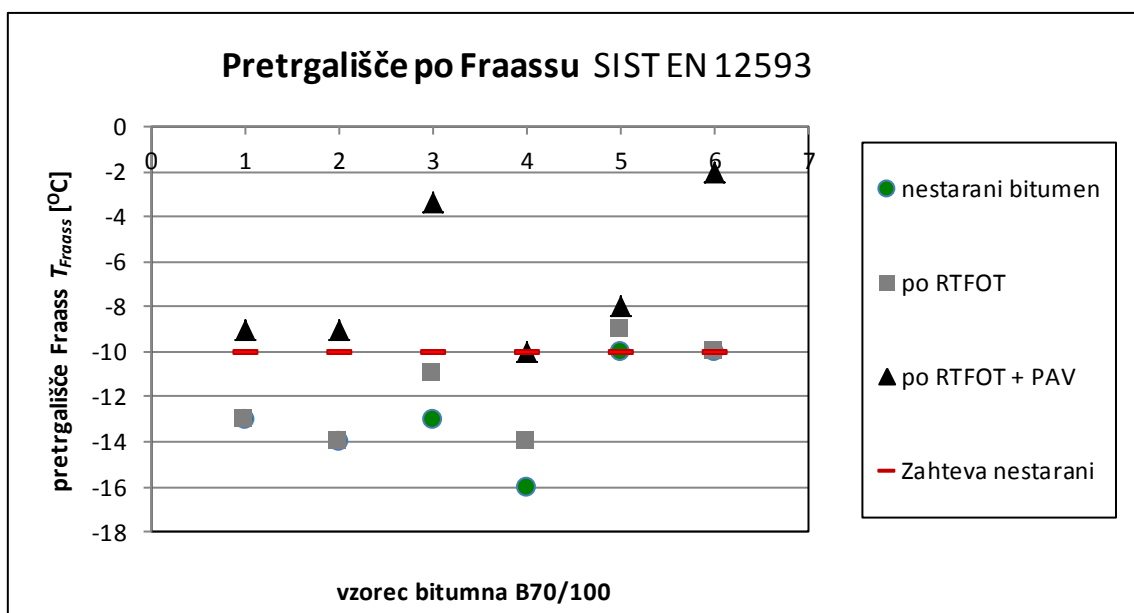


Slika 3-5 Ohranjena vrednost zmečkšča T_{PK} po RTFOT

Na sliki 3-5 so prikazane razlike v temperaturi zmečkšča (povišanje glede na nestarani bitumen) po kratkotrajnem staranju. Preiskave izvedene v letih 2004 do 2015 na 17 vzorcih kažejo, da se zmečkšče ni povišalo za več kot 11 °C pri nobenem vzorcu, kar ustreza zahtevi, podani v SIST EN 12591:2009 [1]. V statistiki so zajeti tudi vzorci, preiskani v okviru te naloge.

3.6 Pretrgališče po Fraassu

Na sliki 3-6 je prikazana temperatura pretrgališča po Fraassu na nestaranih, kratkotrajno staranih in dolgotrajno staranih vzorcih bitumna. Na slikah so rezultati za nestarane bitumne označeni s krogom v zeleni barvi, kratkotrajno starani (po RTFOT) s sivim kvadratom, dolgotrajno starani bitumni (po RTFOT+PAV) pa s črnim trikotnikom. 'Zahteva nestarani' se nanaša na nestarani bitumen – T_{Fraass} mora biti nižja od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 3-6 Rezultati - pretrgališče po Fraassu

Zvišanje pretrgališča glede na nestarani bitumen pomeni, da je bitumen po staranju otrdel in je manj elastičen pri nizkih temperaturah. S slike je razvidno, da bitumni po kratkotrajnem staranju niso pomembno otrdeli - razen pri vzorcih 3 in 4 se temperatura pretrgališča ni zvišala. Upoštevati je treba, da je natančnost določitve T_{Fraass} relativno majhna. V standardu je zahtevana ponovljivost $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar pomeni, da isti operater pri enakih pogojih (ista oprema, ista vrsta materiala preskušanca) pri dveh preskušancih dobi vrednost, ki se ne razlikuje za več kot $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

S slike 3-6 je razvidno, da so bitumni po dolgotrajnem staranju različno otrdeli, saj se je temperatura pretrgališča po pričakovanjih precej zvišala. Najbolj so otrdeli bitumni označeni s številko 3, 4 in 6, saj se je T_{Fraass} najbolj zvišala. Glede na absolutne vrednosti pa so najbolj odporni proti nizkim temperaturam bitumni 1, 2, 4 in 5.

Preglednica 3-8 Zahteve za karakteristike bitumnov - T_{Fraass}

Preiskave izvedene na	Ustreznost glede na SIST EN 12591:2009
nestaranemu bitumnu	vsi rezultati so v zahtevanih mejah (manj kot $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)
po RTOFT staranju	ni zahtev
po RTOFT+PAV staranju	ni zahtev

3.7 DSR - kompleksni strižni modul in fazni kot

Z dinamičnim strižnim reometrom smo izvedli preiskave za določitev kompleksnega strižnega modula G^* (kPa) in faznega zamika δ (rad).

Glede na specifikacije AASHTO [12] se preiskave izvajajo na nestaranem in kratkotrajno staranem bitumnu. Iz dobljenih rezultatov se določi višja temperatura uporabe glede na kriterij odpornosti proti plastičnim deformacijam. Izvedli smo preiskave na vseh šestih vzorcih v temperaturnem območju od 54 °C do 72 °C. Iz dobljenih rezultatov in mejnih vrednosti smo pridobili podatke o obnašanju bitumna pri visokih temperaturah okolice takoj po vgradnji asfalta. Rezultatov teh preiskav v magistrski nalogi podrobno ne navajamo, saj se ne nanašajo na nizke temperature.

Glede na iste specifikacije AASHTO [12] se preiskave DSR izvajajo tudi na dolgotrajno staranem bitumnu. Iz dobljenih rezultatov in mejnih vrednosti se določi mejna temperatura za dolgotrajno starani bitumen $T_{krit N}$. Mejna vrednost je postavljena glede na kriterij odpornosti proti razpokam zaradi utrujanja.

V slovenskih in evropskih standardih [1], [11], [13], [14] ni zahtev za karakteristike določene s preiskavo DSR.

Preglednica 3-9 Rezultati preiskave DSR na dolgotrajno staranih vzorcih

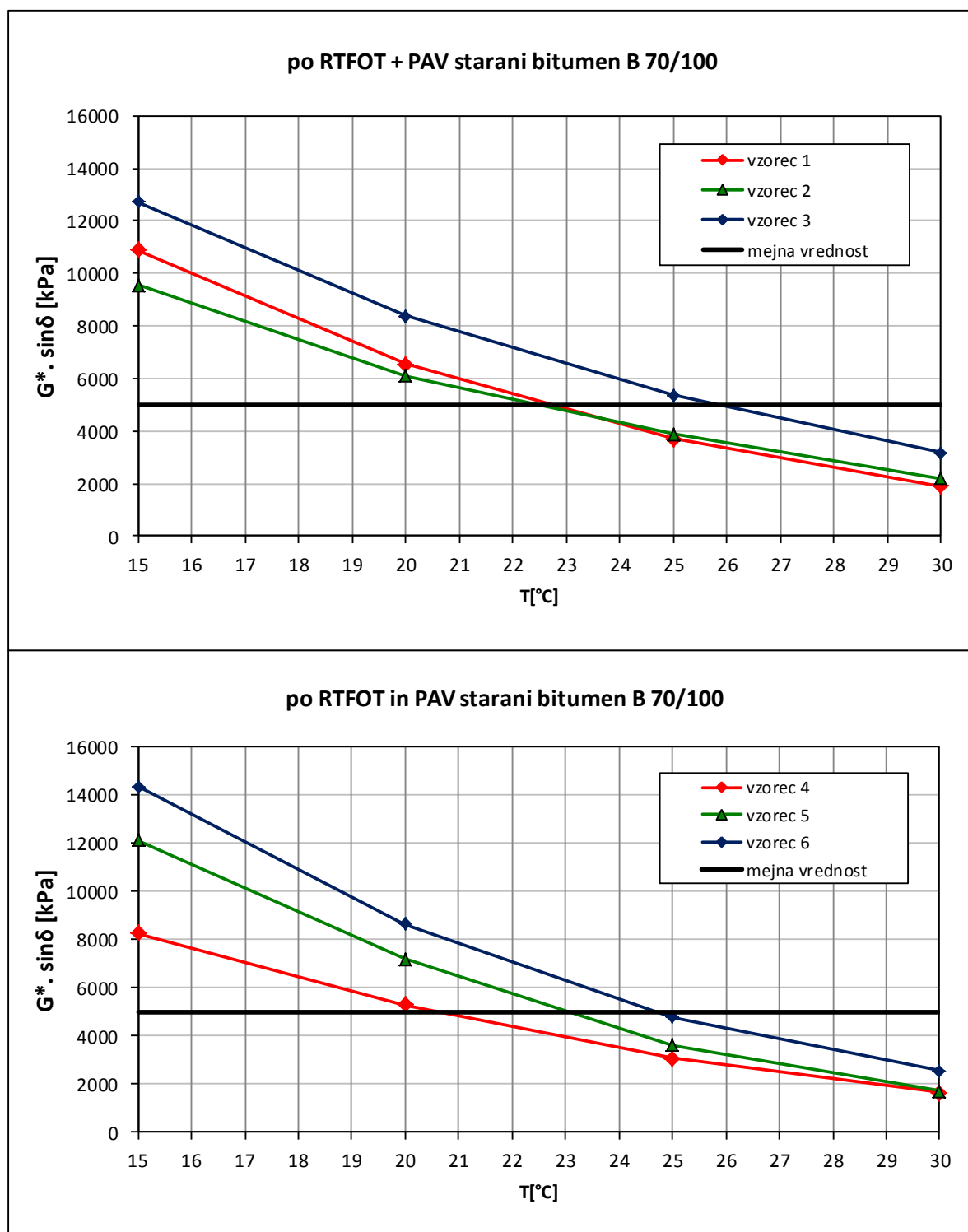
Temperatura preiskave	$G^* \sin \delta$					
	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6
°C	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
15	10870	9547	12709	8264	12122	14339
20	6529	6094	8377	5282	7207	8655
25	3708	3872	5350	3064	3631	4765
30	1887	2193	3158	1663	1705	2546
	mejna vrednost 5000 kPa					
Temperatura $T_{krit N}$	22,7	22,5	25,6	20,9	23,1	24,7

Iz meritev kompleksnega strižnega modula in faznega kota dolgotrajno staranega bitumna B 70/100 pri temperaturah od 15 °C do 30 °C smo izračunali vrednosti $G^* \sin \delta$, ki so prikazane v preglednici 3-6. S kriterijem podanem v AASHTO [12] - kriterij razpok zaradi utrujanja (za RTFOT+PAV starani bitumen)

$$G^* \cdot \sin \delta \leq 5000 \text{ kPa} \dots\dots\dots(3-1)$$

smo določili $T_{krit N}$ - kritično temperaturo za dolgotrajno starani bitumen (po RTFOT+PAV). Na podlagi tega kriterija pa lahko z upoštevanjem kriterijev v AASHTO [12] ocenimo primernost bitumna za uporabo pri temperaturah pod lediščem.

Na sliki 3-7 so rezultati preiskav DSR prikazani v grafični obliki. Zaradi boljše preglednosti dobljenih vrednosti navajamo rezultate za vzorce od 1 do 6 v dveh grafih.



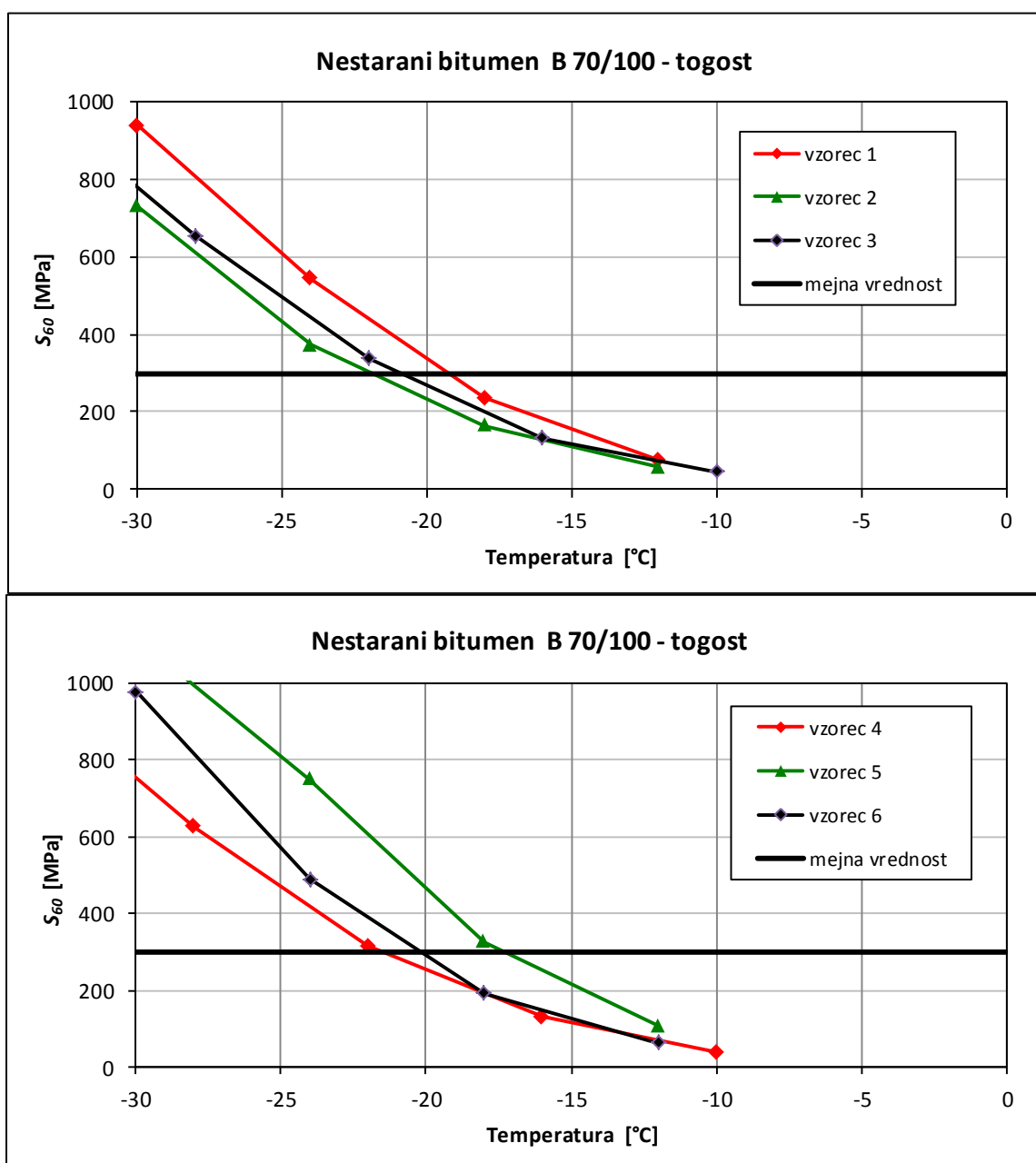
Slika 3-7 Rezultati DSR na dolgotrajno staranih vzorcih 1 do 6

Rezultati preiskave, mejna temperatura za dolgotrajno starani bitumen $T_{krit N}$ (pri $G^* \cdot \sin\delta = 5000$ kPa) so zbrani v preglednici 4-1 v naslednjem poglavju.

3.8 Upogibna togost

Z reometrom z nosilcem, obremenjenim na upogib (BBR), smo izvedli preiskave za določitev upogibne togosti šestih vzorcev bitumna po 60 sekundah obremenitve. Pri vsaki od štirih temperatur smo preiskali po dva vzorca (dve paralelki). Rezultat preiskave sta 'togost' S_{60} in 'm-vrednost' m_{60} . Zaradi boljše preglednosti dobljenih vrednosti navajamo rezultate za vzorce od 1 do 6 v dveh grafih.

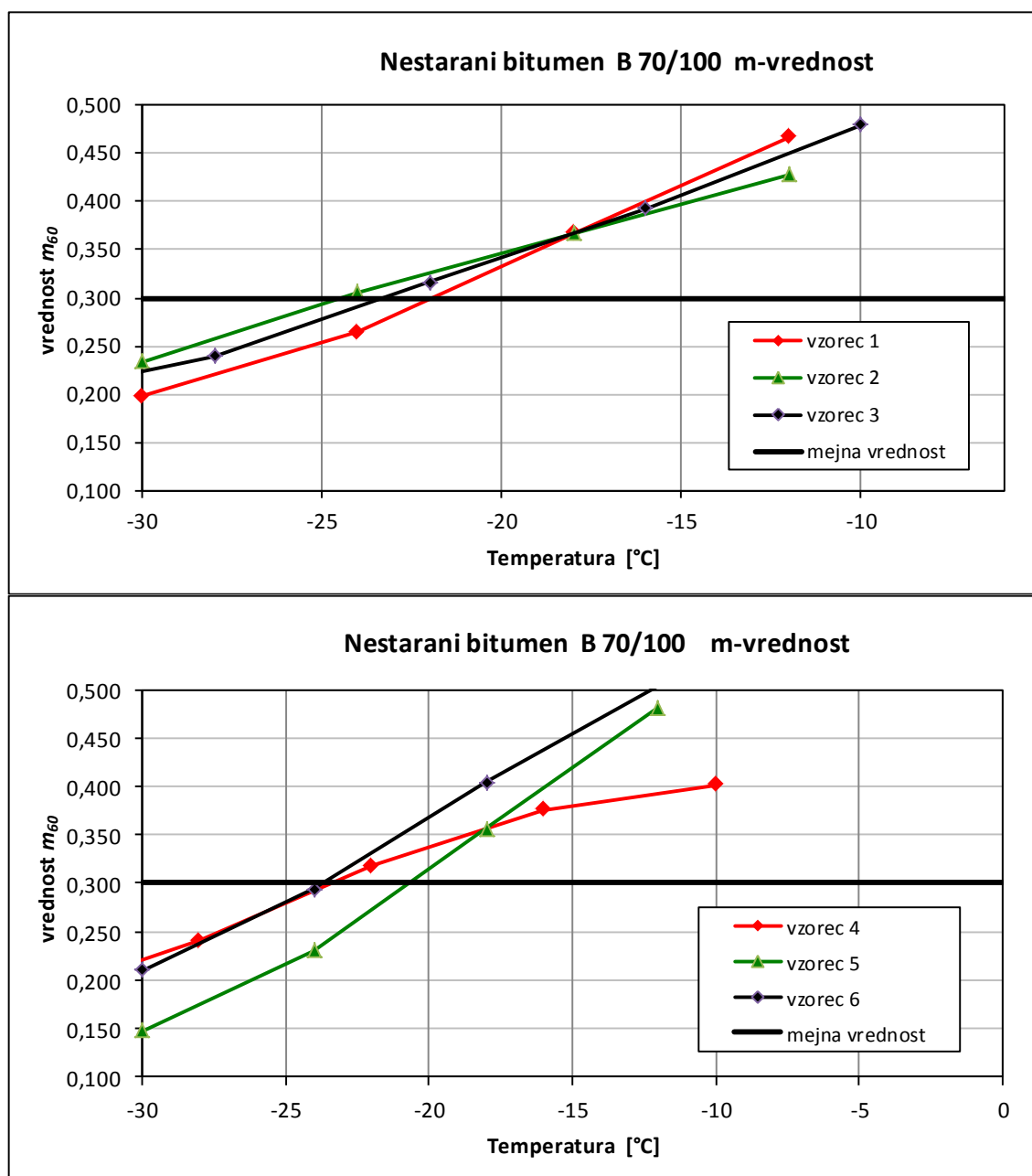
3.8.1 Nestarani bitumni



Slika 3-8 Nestarani bitumen - togost S_{60} za vzorce 1 do 6

V AASHTO [12] priporočilih so podane zahteve samo za dolgotrajno starane vzorce, saj je bitumen takoj po vgradnji manj otrdel kot po daljšem času uporabe. Ta preiskava se zato običajno izvaja samo na dolgotrajno staranih vzorcih, vendar smo jo za namene te magistrske naloge izvedli tudi na nestaranih in kratkotrajno staranih vzorcih. Rezultati preiskav so grafično prikazani na slikah 3-8 in 3-9. Pri vrednotenju mejnih temperatur smo upoštevali enake mejne vrednosti (300 MPa za togost ter 0,300 za m-vrednost) kot za dolgotrajno starane vzorce bitumna.

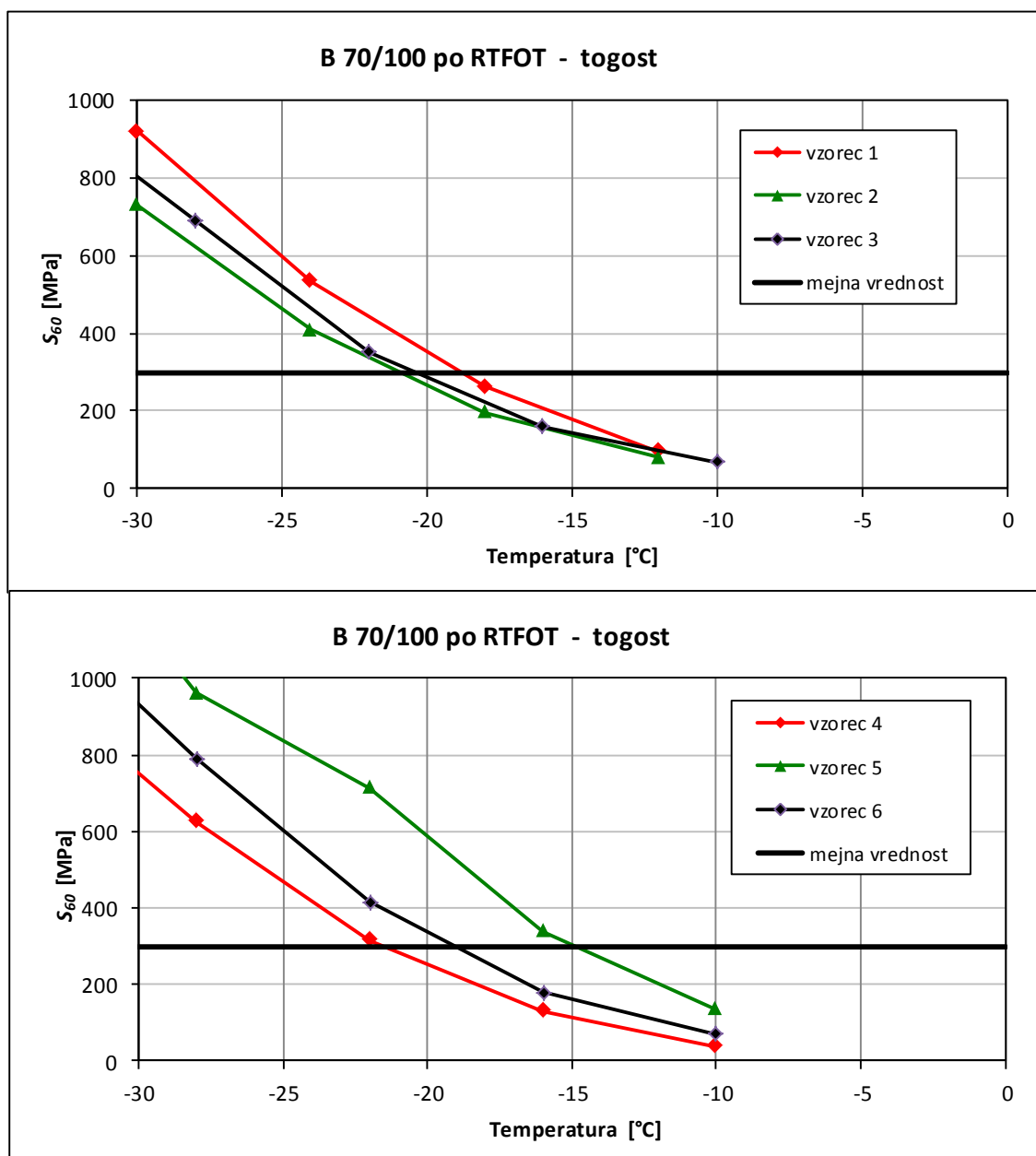
Pri istih kriterijih so mejne temperature nižje kot pri staranih vzorcih, kar je pričakovano, saj bitumen še ni otrdel. Opazili pa smo, da so mejne temperature, dobljene z upoštevanjem kriterija togosti S_{60} pri vseh vzorcih višje (povprečno $T_{(S)60} = -20\text{ °C}$), kot mejne temperature, dobljene z upoštevanjem m-vrednosti (povprečno $T_{(m)60} = -23\text{ °C}$).



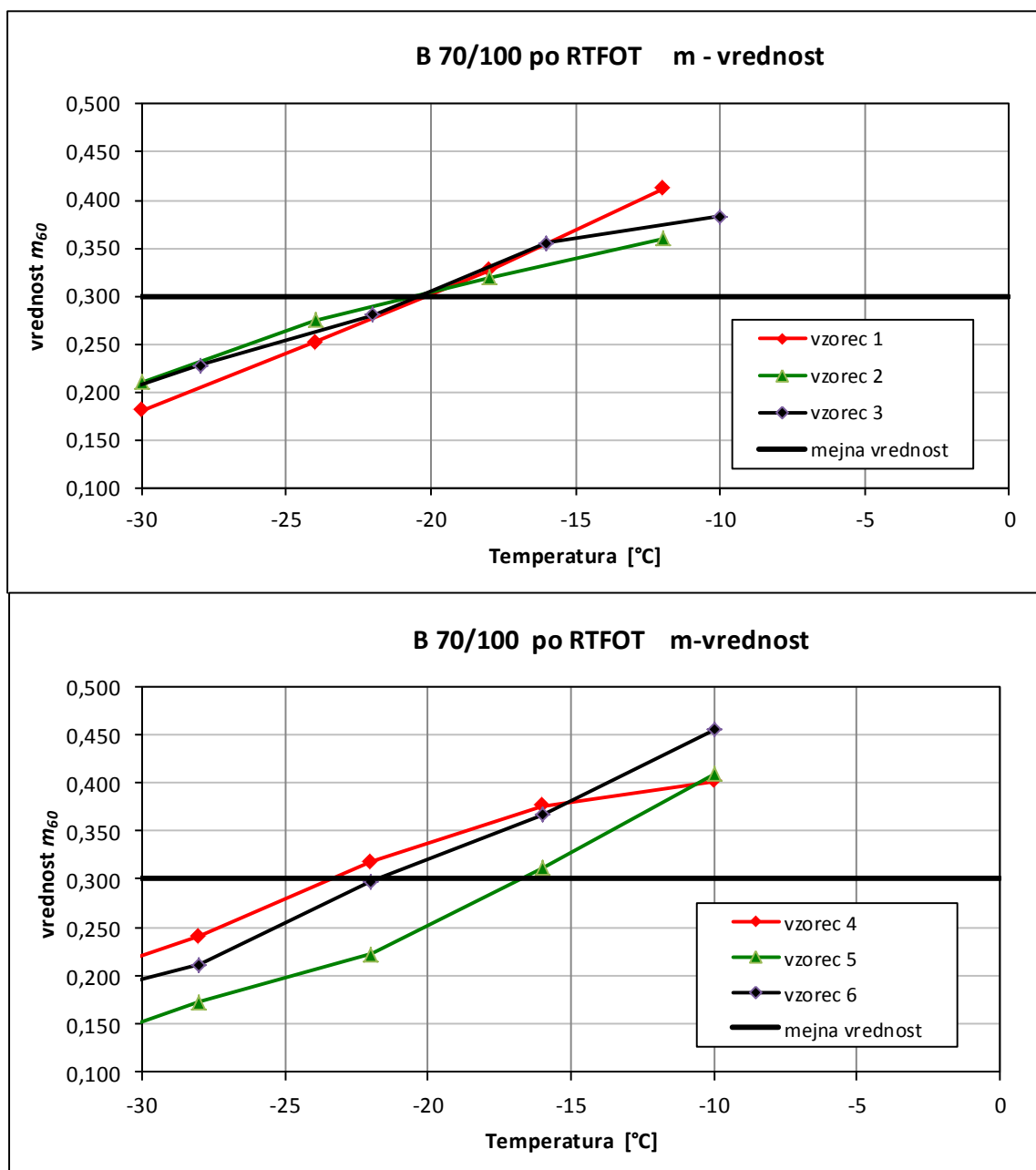
Slika 3-9 Nestarani bitumen - vrednost m_{60} za vzorce 1 do 6

3.8.2 Kratkotrajno starani bitumni

Rezultati izvedenih preiskav (sliki 3-10 in 3-11) kažejo, da so mejne temperature višje kot pri nestaranih vzorcih in nižje kot pri dolgotrajno staranih vzorcih, kot je tudi pričakovano. Mejne temperature, dobljene z upoštevanjem kriterija togosti, so bile pri večini vzorcev višje (povprečno $T_{(S)60} = -19\text{ °C}$), kot mejne temperature, dobljene z upoštevanjem m-vrednosti (povprečno $T_{(m)60} = -20\text{ °C}$).



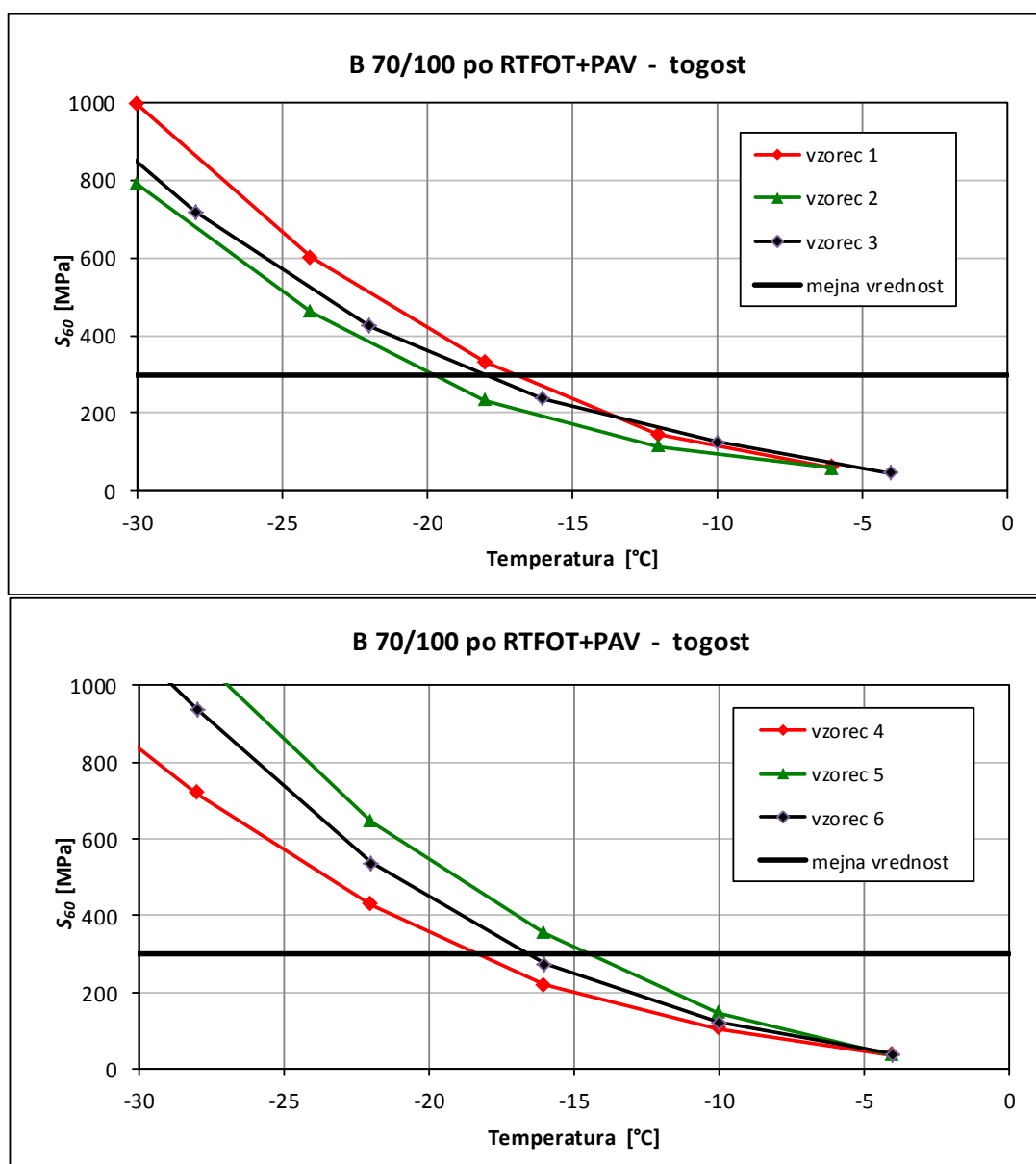
Slika 3-10 Kratkotrajno starani bitumen - togost S_{60} za vzorce 1 do 6



Slika 3-11 Kratkotrajno starani bitumen - vrednost m_{60} za vzorce 1 do 6

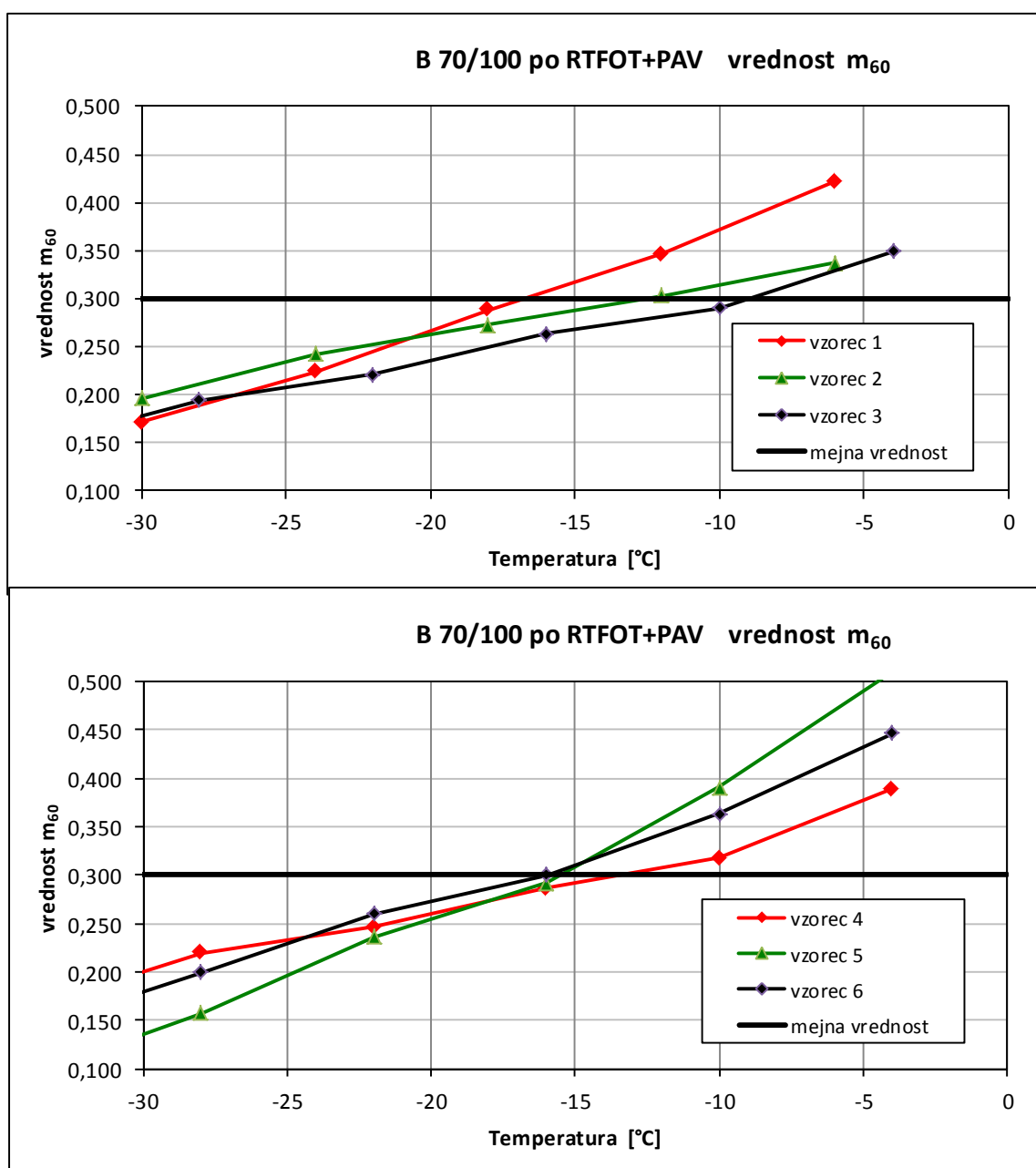
3.8.3 Dolgotrajno starani bitumni

Preiskave smo ponovili na dolgotrajno staranih vzorcih (sliki 3-12 in 3-13). Pri mejnih vrednostih 300 MPa za togost ter 0,300 za m-vrednost smo odčitali temperature in dobili $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$. Prevelika togost pri nizkih temperaturah pomeni, da so v bitumnu akumulirane prevelike termične napetosti. Predpostavljeno je, da je bitumen odporen na razpoke, če je njegova togost manjša ali enaka 300 MPa. Višja m vrednost pomeni, da ima tak bitumen boljšo sposobnost relaksacije nakopičenih termičnih napetosti.



Slika 3-12 Dolgotrajno starani bitumen - togost S_{60} za vzorce 1 do 6

Rezultati kažejo, da so mejne temperature višje kot pri nestaranih vzorcih in kratkotrajno staranih vzorcih, kot je tudi pričakovano. Za razliko od prejšnjih primerov so bile mejne temperature, dobljene z upoštevanjem kriterija togosti, pri vseh vzorcih nižje (povprečno $T_{(S)60} = -17\text{ °C}$) kot mejne temperature, dobljene z upoštevanjem m-vrednosti (povprečno $T_{(m)60} = -14\text{ °C}$). Sklepamo lahko, da ima dolgotrajno starani bitumen manjšo sposobnost relaksacije nakopičenih termičnih napetosti, medtem ko se sama togost ni toliko povečala.



Slika 3-13 Dolgotrajno starani bitumen - vrednost m_{60} za vzorce 1 do 6

Dobljeni rezultati kažejo, da je za oceno odpornosti asfaltov oziroma cestogradbenih bitumnov B 70/100 na nizke temperature takoj po vgradnji verjetno odločilen kriterij togost bitumna, po dolgotrajnem staranju pa je odločilen kriterij m-vrednost.

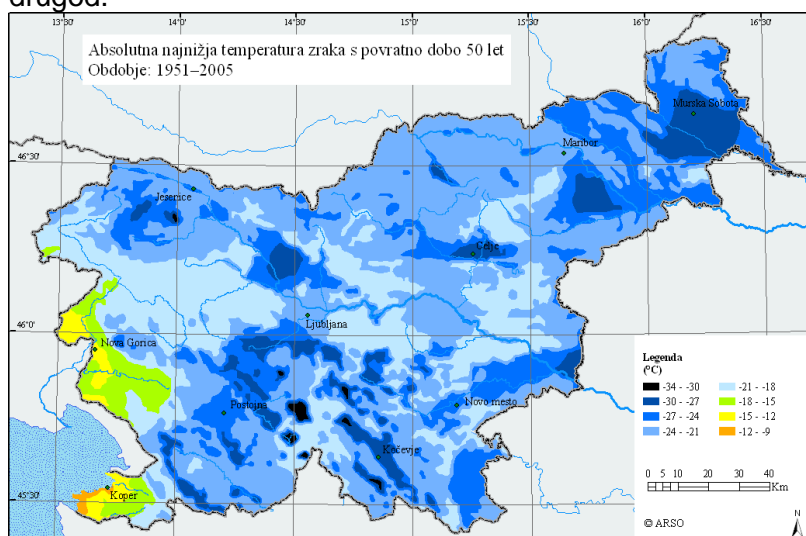
Dobljeni rezultati $T_{(S)60}$ in $T_{(m)60}$ so zbrani v preglednici 4-1 v naslednjem razdelku.

4 ANALIZA LASTNOSTI STARANIH BITUMNOV B 70/100

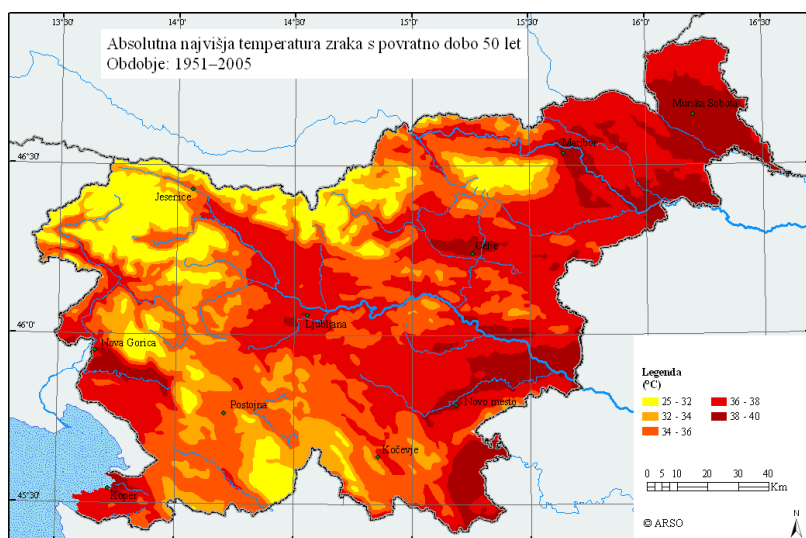
4.1 Temperaturne obremenitve bitumnov

Asfalt je v celotni življenjski dobi obremenjen s prometno obtežbo (utrujenjem), s temperaturnimi obremenitvami ter s sevanjem. Z laboratorijskim staranjem bitumnov pri visokih temperaturah in pri povišanem tlaku simuliramo predvsem temperaturne obremenitve in oksidacijo. Ne glede na dejanske klimatske in prometne razmere so postopki laboratorijskega staranja vedno enaki.

V Sloveniji razpolagamo s podatki o najnižjih in najvišjih temperaturah zraka v posameznih pokrajinah. Na sliki 4-1 so prikazani podatki Agencije RS za okolje (ARSO) o najnižjih temperaturah zraka s povratno dobo 50 let (obdobje 1951-2005), na sliki 4-2 pa so podatki o najvišjih temperaturah zraka v Sloveniji s povratno dobo 50 let (obdobje 1951-2005). Iz obeh kart lahko razberemo, da so največji ekstremi oziroma sezonske spremembe temperatur v vzhodnem (panonskem) delu in jugovzhodnem delu Slovenije (okolica Mokric) ter ponekod drugod.



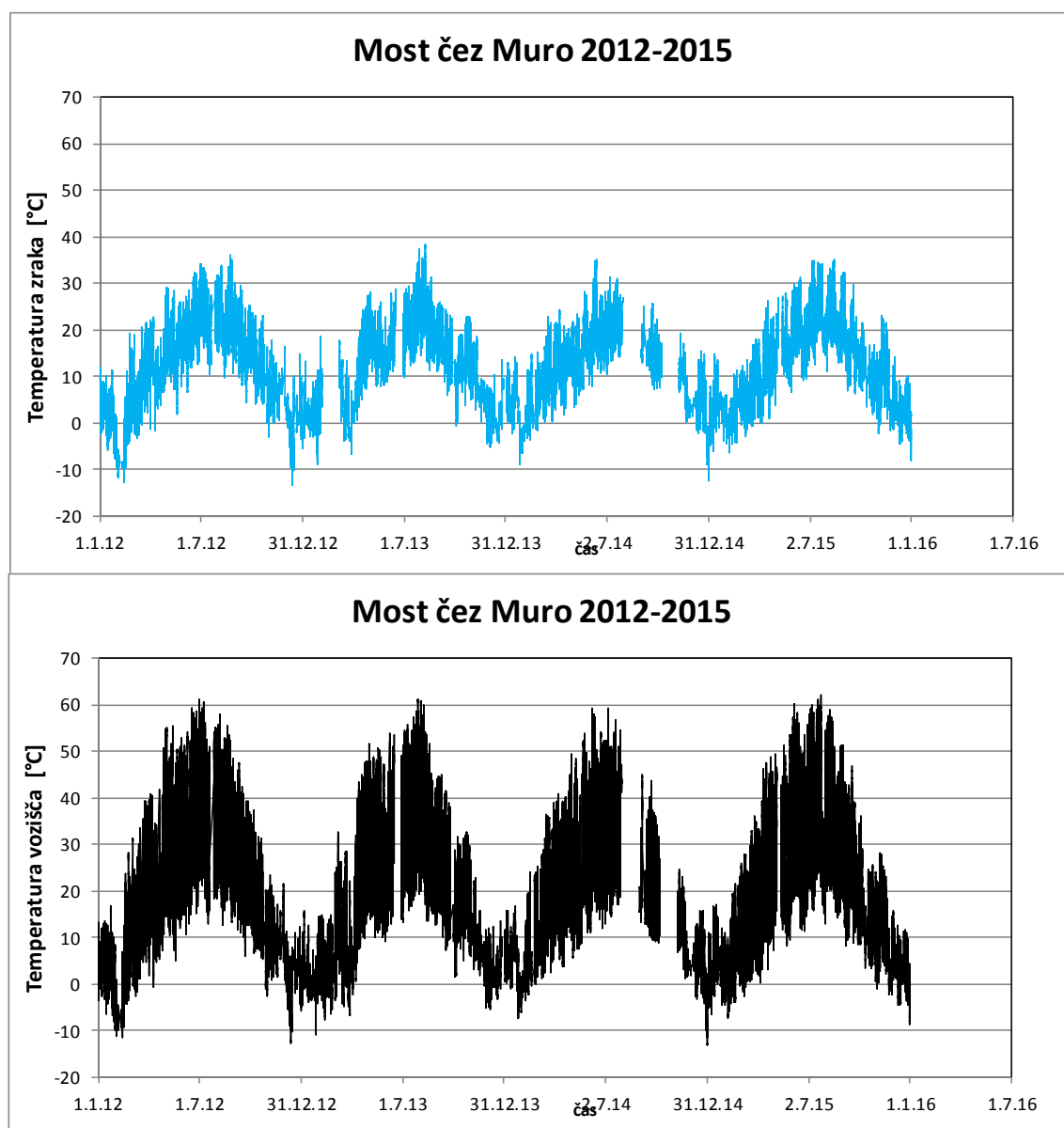
Slika 4-1 Absolutna najnižja temperatura zraka s povratno dobo 50 let [33]



Slika 4-2 Absolutna najvišja temperatura zraka s povratno dobo 50 let [34]

Predstavniki ARSO ugotavljajo [32], da je nekaj izjemno vročih poletij v zadnjih letih vplivalo na izračunane vrednosti najvišje temperature zraka s povratno dobo 50 let, ki so se v povprečju dvignile za 0,8 °C. Ta dvig je že primerljiv z negotovostjo izračuna, zato je karto najvišje vrednosti temperature s povratno dobo 50 let [34] smiselno obnoviti z novimi vrednostmi.

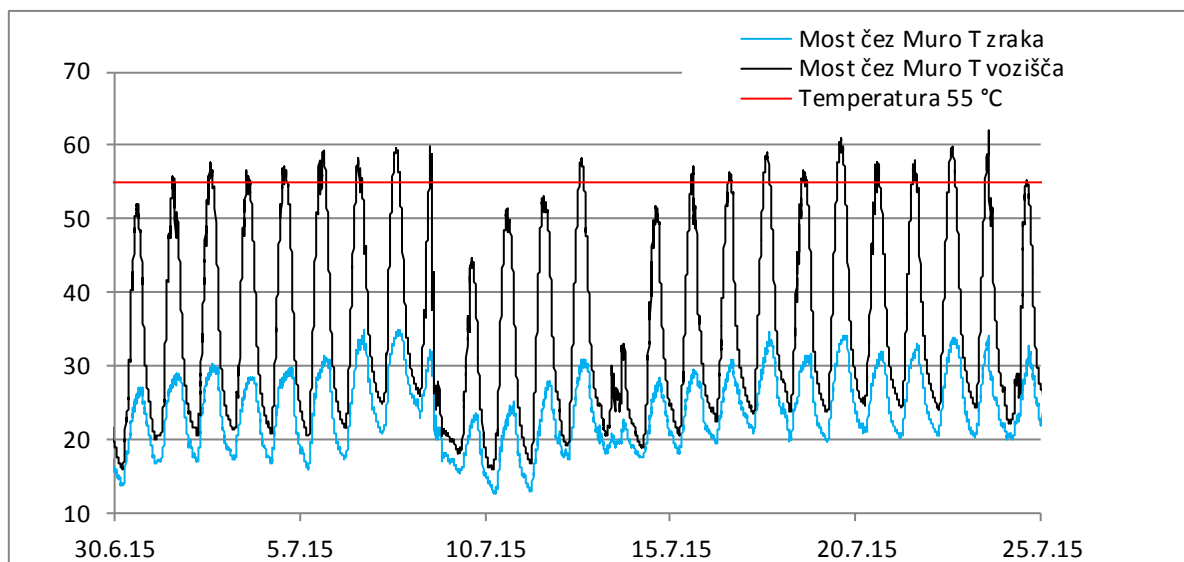
Vgrajeni asfalt je podvržen vremenskim temperaturnim pogojem. Pridobili smo podatke z vremenske postaje DARS, vgrajene na avtocestnem mostu čez Muro. Na sliki 4-3 so prikazane izmerjene temperature vozišča na mostu čez Muro [28] v obdobju štirih let (2012-2015). Temperaturne spremembe niso vsako leto enake, so pa podobne.



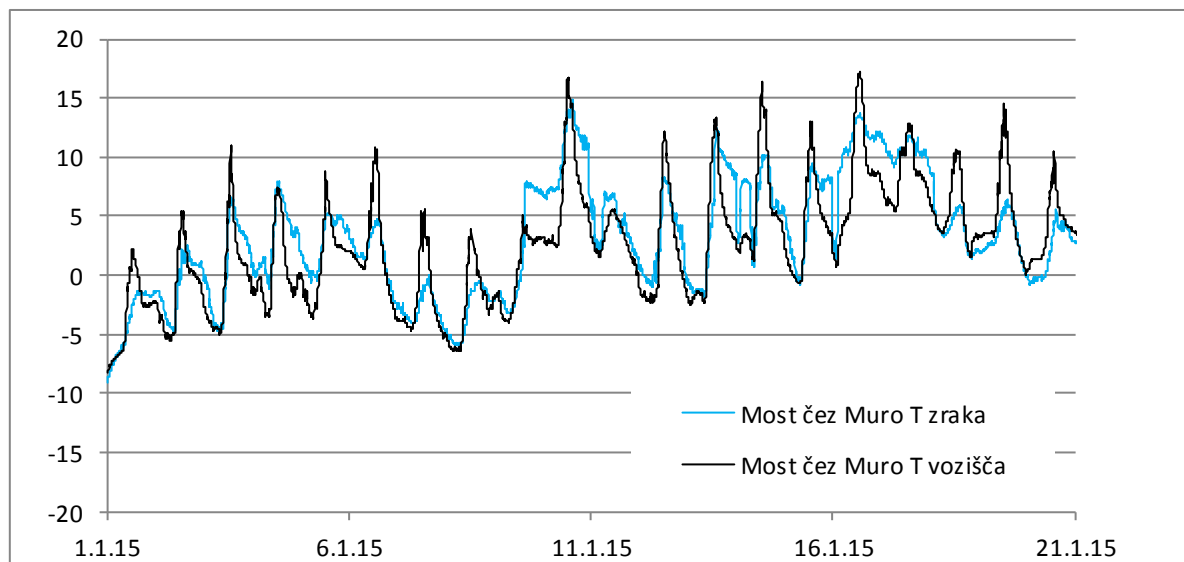
Slika 4-3 Temperaturne spremembe vozišča na mostu čez Muro [28]

Dnevne spremembe temperature asfalta lahko dosežejo tudi 40 °C v poletnem času, v zimskem času pa so dnevna nihanja temperature asfalta bistveno manjša. Na sliki 4-4 so na časovnih diagramih prikazane dnevne spremembe temperature vozišča poleti 2015 na mostu čez Muro. Temperatura vozišča je v letu 2015 več dni zapored preseгла temperaturo 55 °C.

Na sliki 4-5 so prikazane dnevne spremembe temperature vozišča pozimi 2015 na mostu čez Muro. Na sliki 4-7 v naslednjem razdelku so prikazane okvirne temperaturne obremenitve asfalta v času skladiščenja, proizvodnje asfaltne zmesi, vgradnje in prvih dvanajst let uporabe. Shematsko je prikazano sezonsko spreminjanje temperatur v letih, dejanske spremembe temperature pa so bistveno bolj dinamične, kot je razvidno s slik 4-3 do 4-5.



Slika 4-4 Dnevne temperaturne spremembe vozišča v poletnem času [28]



Slika 4-5 Dnevne temperaturne spremembe vozišča v zimskem času [28]

Bitumen se proizvede v rafinerijah nafte. Ker v Sloveniji ni nobene rafinerije, se ves uporabljeni bitumen uvaža – pretežno iz Avstrije, Madžarske, Italije pa tudi iz Bosne in Hercegovine. Bitumen se na asfaltne baze dostavi v cisternah. Pretakanje v ogrevane cisterne v asfaltnih bazah poteka pri temperaturi bitumna okoli 150 °C. Bitumen se v asfaltnih bazah skladišči čim krajši čas, saj ga je treba stalno ogrevati, kar lahko povzroča staranje bitumna, pomeni pa nepotrebno porabo energije in s tem povezane stroške.

Priporočena temperatura bitumna B 70/100 v fazi dodajanja agregatu na asfaltnih bazah je okoli 150 °C do 160 °C [30]. Glede na TSC [11] je priporočena temperatura asfalta z bitumnov B 70/100 pri vgradnji 145 °C. Po vgradnji je asfalt v času uporabe podvržen dnevnim in sezonskim temperaturnim nihanjem. Dejanske temperature asfalta so odvisne od klimatskih razmer ter tudi od lokalnih pogojev (osončenje, podlaga...).

Bitumen v asfaltni zmesi je mehkejši takoj po vgradnji in je zato bolj podvržen deformacijam pri visokih temperaturah. Z leti otrdi in kasneje ni pričakovati poškodb (tvorjenja kolesnic) zaradi visokih temperatur. Pred obnovo vozišč se običajno odvzamejo vzorci asfalta (slika 4-6) in se izvedejo preiskave asfaltov in bitumnov, da se oceni stanje asfalta in bitumna. Tak asfalt je bil dolga leta podvržen dejanskim klimatskim vplivom in prometnim obremenitvam. Preiskave vzorcev vgrajenega asfalta običajno zajemajo ugotavljanje debelin in zlepljenosti plasti, na posameznih vzorcih pa tudi ugotavljanje zrnivosti ter karakteristik bitumna. Pred preiskavami je treba bitumen ekstrahirati iz asfaltne zmesi, kar lahko vpliva na njegove karakteristike. Na ekstrahiranem bitumnu se običajno izvedejo osnovne preiskave – preiskava penetracije, zmehčišča in pretrgališča po Fraass-u. Iz teh osnovnih preiskav vemo, da vsi bitumni s staranjem postajajo bolj togi. Težko pa primerjamo pridobljene podatke iz asfaltnih zmesi, vgrajenimi pred mnogimi leti, s karakteristikami nestarane bitumna iz teh asfaltnih zmesi, saj nimamo na razpolago take baze podatkov. Prav tako še ne moremo primerjati karakteristik bitumnov, vgrajenih v asfaltne zmesi po več letih uporabe, z dolgotrajno staranim bitumnom. Dolgotrajno laboratorijsko staranje smo izvedli prvič leta 2014, tako da bomo s primerjavami lahko začeli šele v prihodnjih letih.

Poleg razpok zaradi nizkih temperatur in utrujanja asfalta so pogosti vzroki za poškodbe slaba zlepljenost plasti in neprimerne debeline glede na prometne obremenitve cest, slabo nosilna podlaga. Na sliki 4-6 so prikazani odvzeti vzorci za izvedbo preiskav asfalta in bitumna na obstoječi cesti – primer nezlepljenosti plasti ter primer poškodb asfalta – nastanek mrežastih razpok in prekomernih deformacij zaradi poddimenzioniranega vozišča pri povečani prometni obremenitvi.



Slika 4-6 Primer neustrezne zlepljenosti asfaltnih plasti in mrežaste razpoke vozišča

4.2 Pregled rezultatov preiskav

V preglednici 4-1 so zbrani rezultati izvedenih preiskav nestaranih, kratkotrajno in dolgotrajno starih bitumnov. Obnašanje pri nizkih temperaturah opisujejo preiskave Fraass, BBR ter DSR (utrujanje) oziroma vrednosti T_{Fraass} , $T_{(S)60}$ in $T_{(m)60}$ ter $T_{krit N}$. V preglednici so tudi rezultati, ki opisujejo obnašanje pri visokih temperaturah, in sicer $T_{krit V1}$ za nestarane bitumne ter $T_{krit V2}$ za kratkotrajno starane bitumne. V preglednicah so zaradi boljše preglednosti rezultati, ki se nanašajo na kratkotrajno starane bitumne, navedeni na sivi podlagi, rezultati za dolgotrajno starane bitumne pa so navedeni na modri podlagi.

Preglednica 4-1 Rezultati izvedenih preiskav na šestih vzorcih bitumna B 70/100

Nestarani bitumen B 70/100

pri 1000 Pa
G*/sinđ

oznaka	pen	T_{PK}	T_{Fraass}	$T_{(S)60}$	$T_{(m)60}$	$T_{krit V1}$
vzorca	mm/10	°C	°C	°C	°C	°C
1	84	45,8	-13	-19,0	-22,0	62,4
2	77	47,4	-14	-22,0	-24,5	62,9
3	78	46,4	-13	-21,0	-23,0	62,7
4	70	48,3	-16	-21,5	-23,0	63,2
5	79	45,8	-10	-17,5	-21,0	61,7
6	81	46,4	-10	-20,0	-24,0	62,6
<i>povprečje</i>	78	47	-13	-20	-23	62,6

Kratkotrajno starani bitumen B 70/100 RTFOT

pri 2200 Pa
G*/sinđ

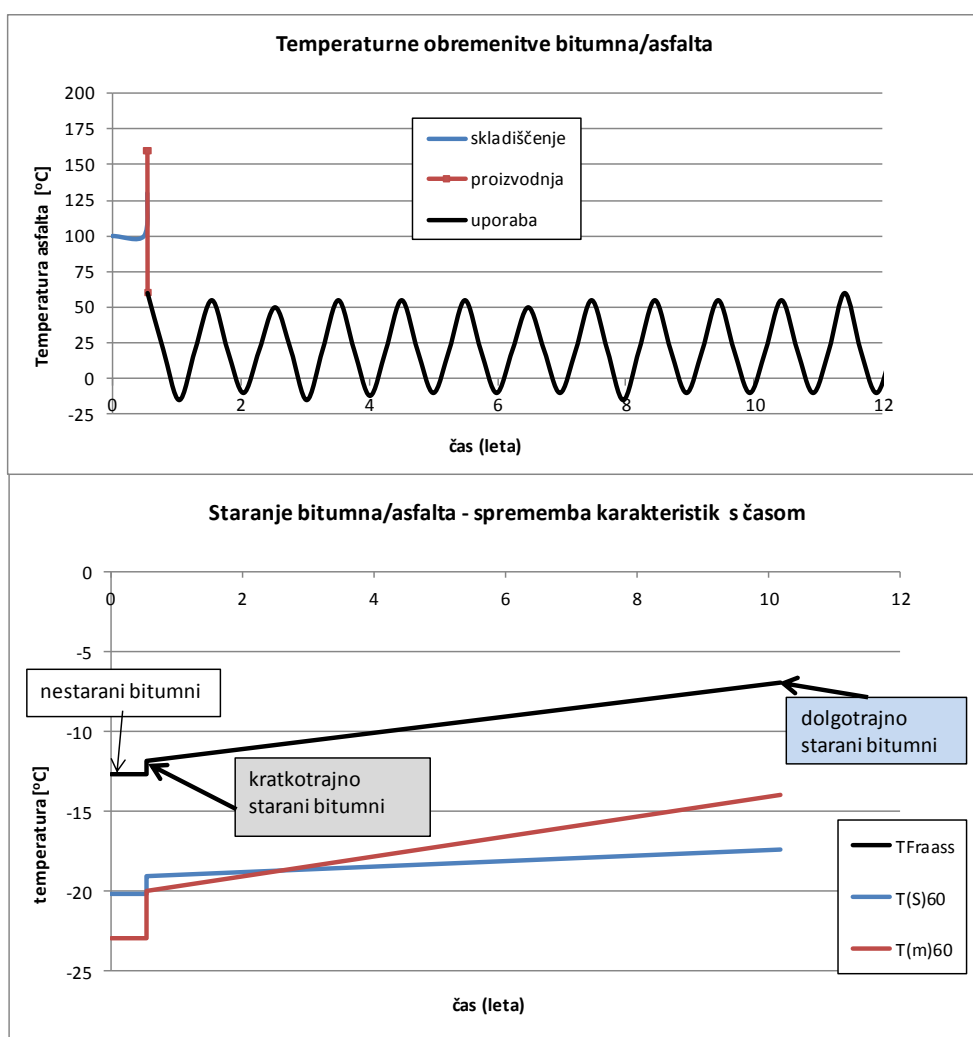
oznaka	pen	T_{PK}	T_{Fraass}	$T_{(S)60}$	$T_{(m)60}$	$T_{krit V2}$
vzorca	mm/10	°C	°C	°C	°C	°C
1	51	50,8	-13	-18,5	-20,5	61,8
2	44	58,2	-14	-21,0	-21,0	65,8
3	39	56,9	-11	-20,5	-20,0	64,4
4	47	54,8	-14	-21,5	-23,0	63,6
5	50	51,3	-9	-15,0	-17,0	60,8
6	45	52,8	-10	-19,0	-22,0	64,4
<i>povprečje</i>	46	54	-12	-19	-21	63,5

Dolgotrajno starani bitumen B 70/100 RTFOT+PAV

pri 5000 kPa
G* sinđ

oznaka	pen	T_{PK}	T_{Fraass}	$T_{(S)60}$	$T_{(m)60}$	$T_{krit N}$
vzorca	mm/10	°C	°C	°C	°C	°C
1	30	59,2	-9	-17,0	-17,0	22,7
2	27	70,8	-9	-19,5	-13,0	22,5
3	22	70,5	-3	-18,0	-9,0	25,6
4	29	63,6	-10	-18,0	-13,0	20,9
5	29	56,4	-8	-15,0	-16,0	23,1
6	23	63,6	-2	-17,0	-16,0	24,7
<i>povprečje</i>	27	64	-7	-17	-14	23

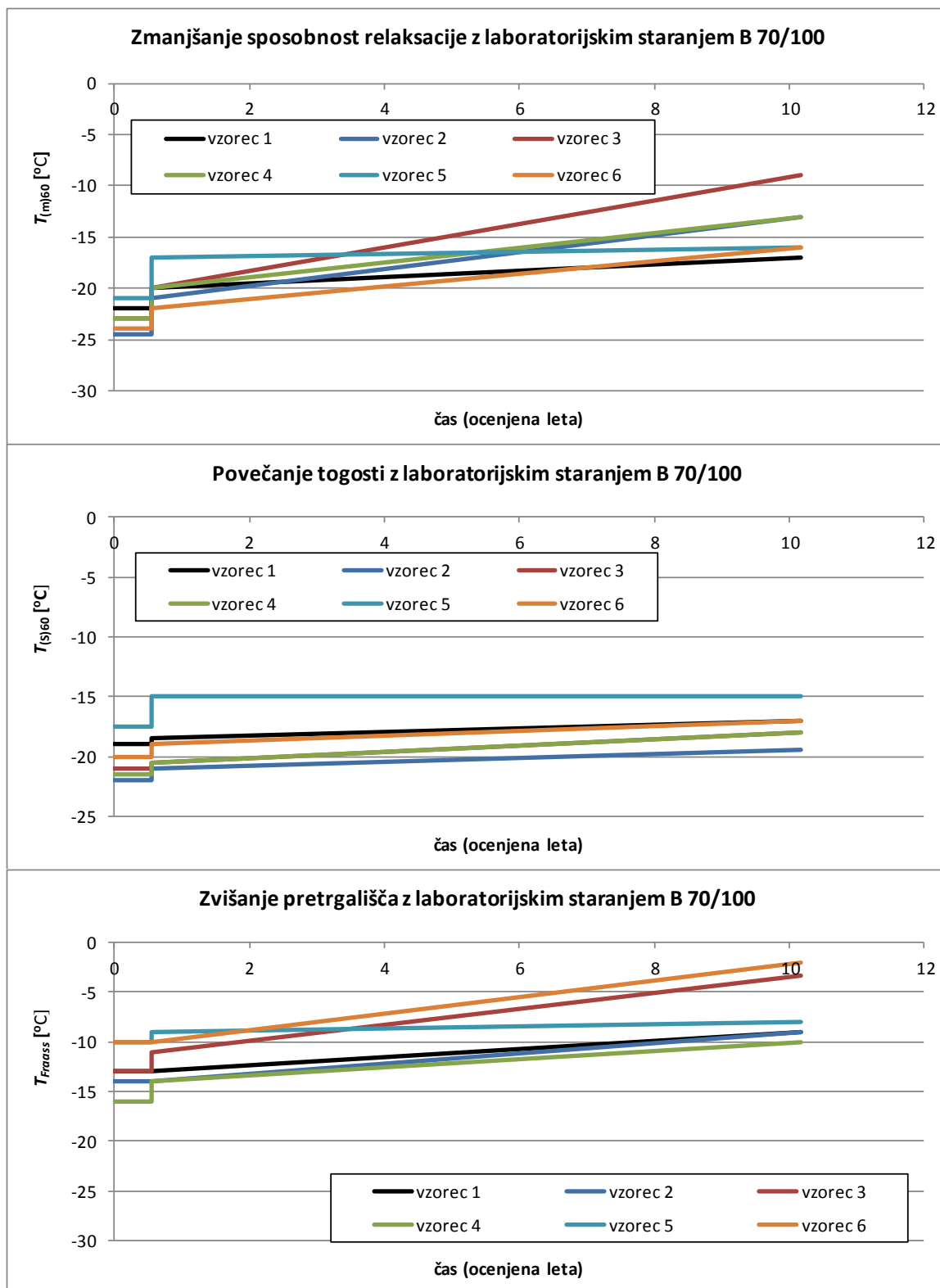
Na sliki 4-7 so na zgornjem časovnem grafu prikazane okvirne temperaturne obremenitve asfalta v prvih dvanajstih letih uporabe. Dobljene rezultate preiskav, ki vplivajo na obnašanje bitumna pri nizkih temperaturah - zmeščišče T_{Fraass} ter temperatura pri znani togosti $T_{(S)60}$ ter temperatura pri znani vrednosti (m) $T_{(m)60}$, smo za šest vzorcev povprečili ter jih prikazali na spodnjem časovnem diagramu na sliki 4-7. Predpostavili smo, da se lastnosti bitumna, ki ustrezajo laboratorijskemu staranju spremenijo v desetih letih [31]. Sprememba karakteristik je prikazana na grafu linearno. Dejansko spreminjanje lastnosti bitumnov v času uporabe ni linearno in je odvisno od dejanske oksidacije bitumna, ki je višja pri visokih temperaturah zraka.



Slika 4-7 Sprememba karakteristik bitumna B 70/100 zaradi staranja

Povprečni rezultati preiskav na šestih vzorcih bitumna kažejo, da obe preiskavi (BBR in Fraass) jasno pokažeta, da se mejna temperatura, pri kateri bodo nastale razpoke zaradi nizkih temperatur, z leti zvišuje. Na sliki 4-8 so prikazani rezultati teh treh preiskav za posamezne vzorce bitumna B 70/100.

Predvidevali smo, da obstaja povezava med spremembo T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ pri staranju, saj gre pri obeh preiskavah za upogib vzorca bitumna. Vendar pa rezultati preiskav na slikah 4-9 do 4-13 (v razdelku 4.3 Ugotovljene korelacije) jasnih povezav ne kažejo.



Slika 4-8 Spreminjanje mejnih temperatur B 70/100 z laboratorijskim staranjem

Če upoštevamo še zveze (4-1), (4-2) in (4-3), dobimo karakteristike bitumna B 70/100, ki so pomembne za obnašanje pri nizkih temperaturah zraka (preglednica 4-2).

$$T_{(S)mejna} = T_{(S)60} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$T_{(m)mejna} = T_{(m)60} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$T_{(S,m)mejna} = \text{višja od } T_{(m)mejna} \text{ in } T_{(S)mejna} \dots\dots\dots (4-3)$$

Preglednica 4-2 Karakteristike bitumna B 70/100 pomembne pri nizkih temperaturah

	nestarani	po RTFOT	po RTFOT+PAV	nestarani	po RTFOT	po RTFOT+PAV	razlika*
oznaka vzorca	T_{Fraass} °C	T_{Fraass} °C	T_{Fraass} °C	$T_{(S,m)mejna}$ °C	$T_{(S,m)mejna}$ °C	$T_{(S,m)mejna}$ °C	$T_{(S,m)mejna}$ °C
1	-13	-13	-9	-29,0	-28,5	-27,0	1,5
2	-14	-14	-9	-32,0	-31,0	-23,0	8,0
3	-13	-11	-3	-31,0	-30,0	-19,0	11,0
4	-16	-14	-10	-31,5	-31,5	-23,0	8,5
5	-10	-9	-8	-27,5	-25,0	-25,0	0,0
6	-10	-10	-2	-30,0	-29,0	-26,0	3,0
povprečje	-13	-12	-7	-30	-29	-24	5

* razlika med $T_{(S,m)mejna}$ po kratkotrajnem staranju in $T_{(S,m)mejna}$ po dolgotrajnem staranju

Preiskava BBR nam da zelo nazorne podatke o spremembah karakteristik bitumna po laboratorijskem staranju. Ugotovimo lahko, da je vzorec bitumna številka 5 takoj po vgradnji najmanj primeren za nizke temperature, saj je njegova mejna temperatura najvišja (-25 °C). Mejne temperature preostalih vzorcev se gibljejo med -29 °C in -28,5 °C.

Z leti simulirane uporabe pa se vzorci bitumna različno hitro starajo oziroma otrdevajo. Na koncu simulirane življenjske dobe oziroma po dolgotrajnem staranju je vzorec bitumna 3 najmanj primeren za nizke temperature, saj je njegova mejna temperatura najvišja (-19 °C). Pospešeno staranje je zelo vplivalo na karakteristike tega bitumna pri nizkih temperaturah.

Vzorec 1 je najbolj primeren za nizke temperature, saj je bila njegova mejna temperatura takoj po vgradnji zelo nizka (-28,5 °C) in je po več letih simulirane uporabe najnižja (-27 °C).

Vzorec 6 je zelo primeren za nizke temperature, saj je bila njegova mejna temperatura takoj po vgradnji zelo nizka (-29 °C) in je tudi po več letih simulirane uporabe zelo nizka (-26 °C).

Vzorec 5 je primeren za nizke temperature, sicer je bila njegova mejna temperatura takoj po vgradnji relativno visoka (-25 °C) vendar pa je enaka tudi po več letih simulirane uporabe.

Vzorci 2, 3 in 4 so bili po kratkotrajnem staranju primerni za nizke temperature, dolgotrajno staranje pa je najbolj vplivalo na njihove karakteristike pri nizkih temperaturah (od -19 °C do -23 °C).

4.3 Ugotovljene korelacije s preiskavo pretrgališča Fraass

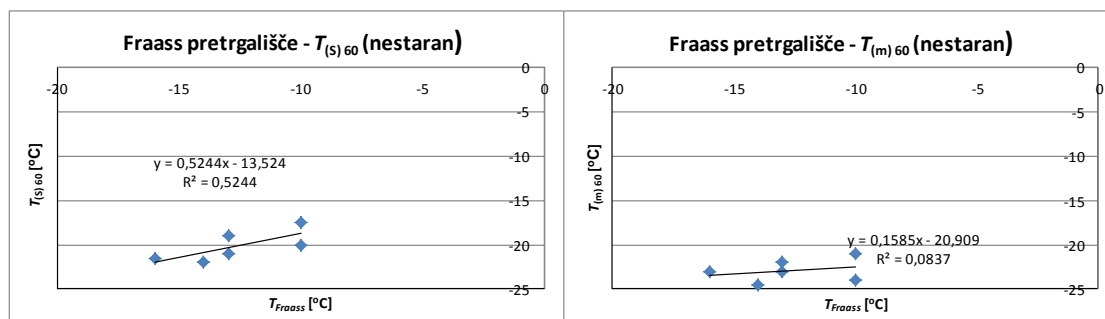
4.3.1 Preiskave pretrgališča po Fraass-u in BBR

Za ugotavljanje karakteristik bitumna pri nizkih temperaturah je bila v tridesetih letih prejšnjega stoletja patentirana preiskava pretrgališča po Fraass-u, ki pa ima več pomanjkljivosti. Zato je bila razvita nova preiskava – določevanje upogibne togosti z BBR. Ta metoda je standardizirana od leta 2005, vendar se v Sloveniji še ne uporablja pogosto. Preiskava pretrgališča po Fraass-u nestaranih bitumnov je bila obvezna preiskava bitumnov glede na JUS standarde ter tudi glede na SIST EN 12591. V AASHTO [12] pa je preiskava BBR obvezna preiskava na dolgotrajno staranih bitumnih (po RTFOT in PAV), ne pa tudi na nestaranih in kratkotrajno staranih bitumnih.

V laboratorijih za asfalte in bitumne imamo na razpolago bazo podatkov o temperaturah pretrgališča po Fraass-u na nestaranih bitumnih. Zato bi bila zanima korelacija med rezultati BBR preiskave in pretrgališča po Fraass-u za nestarane bitumne. V okviru naloge smo poskusili ugotoviti te korelacije za šest preiskanih vzorcev. V preglednici 4-3 so prikazani rezultati preiskav nestarane bitumna, na sliki 4-9 pa ugotovljene povezave. Ugotovimo lahko, da med T_{Fraass} in $T_{(m)60}$ te korelacije ni, med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ pa je ugotovljena šibka korelacija za nestarane bitumne B 70/100.

Preglednica 4-3 Rezultati preiskav nestarane bitumna B 70/100

oznaka	pen	T_{PK}	T_{Fraass}	$T_{(S)60}$	$T_{(m)60}$
vzorca	mm/10	°C	°C	°C	°C
1	84	45,8	-13	-19,0	-22,0
2	77	47,4	-14	-22,0	-24,5
3	78	46,4	-13	-21,0	-23,0
4	70	48,3	-16	-21,5	-23,0
5	79	45,8	-10	-17,5	-21,0
6	81	46,4	-10	-20,0	-24,0
<i>povprečje</i>	78	47	-13	-20	-23

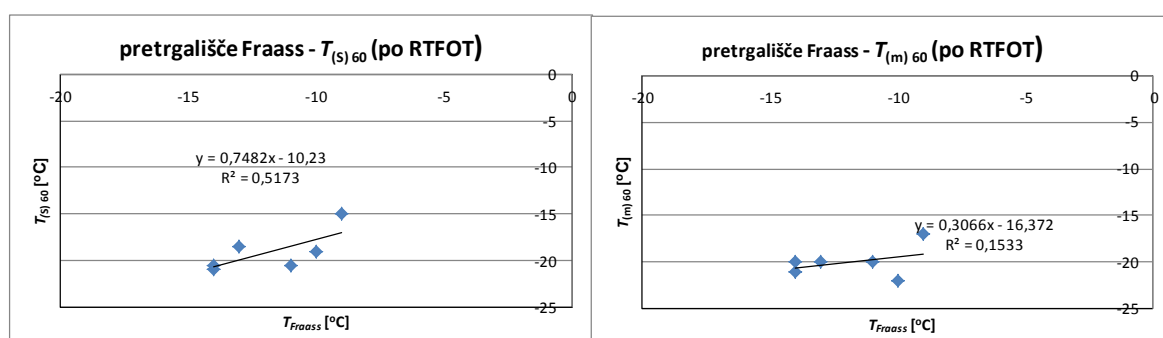


Slika 4-9 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za nestarani bitumen

V preglednici 4-4 ter na sliki 4-10 so rezultati preiskav kratkotrajno (po RTFOT) staranih vzorcev bitumna.

Preglednica 4-4 Rezultati preiskav kratkotrajno staranega bitumna B 70/100

oznaka vzorca	pen mm/10	T_{PK} °C	T_{Fraass} °C	$T_{(S)60}$ °C	$T_{(m)60}$ °C
1	51	50,8	-13	-18,5	-20,5
2	44	58,2	-14	-21,0	-21,0
3	39	56,9	-11	-20,5	-20,0
4	47	54,8	-14	-21,5	-23,0
5	50	51,3	-9	-15,0	-17,0
6	45	52,8	-10	-19,0	-22,0
<i>povprečje</i>	46	54	-12	-19	-21



Slika 4-10 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za kratkotrajno starani bitumen

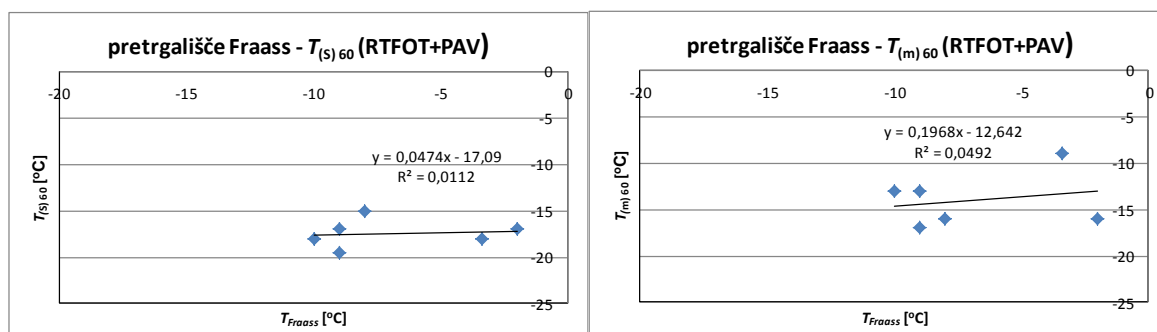
Če primerjamo temperature pretrgališča po Fraass-u, mejnih temperatur $T_{(S)60}$ in $T_{(m)60}$ nestaranih (preglednica 4-3) in kratkotrajno staranih vzorcev (preglednica 4-4), lahko ugotovimo, da laboratorijsko kratkotrajno staranje ne povzroči pomembnih sprememb lastnosti bitumna pri nizkih temperaturah. Pretrgališča po Fraass-u se v povprečju zviša za eno stopinjo, mejna temperatura $T_{(S)60}$ se poveča za 0,8 °C in $T_{(m)60}$ za 2,9 °C. Ugotovimo lahko, da med T_{Fraass} in $T_{(m)60}$ korelacije ni, med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ pa je šibka korelacija za kratkotrajno starane bitumne.

Če primerjamo penetracijo ter temperature zmečkaišča (T_{PK}) z nestaranimi vzorci, lahko ugotovimo, da laboratorijsko kratkotrajno staranje, ki simulira vgradnjo asfalta, povzroči ugodne spremembe pri obnašanju bitumnov pri visokih temperaturah, saj bitumen otrdi. Temperatura zmečkaišča (T_{PK}) se je povišala za 8,2 °C, obnašanje pri nizkih temperaturah pa je nepomembno spremenjeno, zato bi iz rezultatov teh preiskav lahko sklepali, da vgradnja dobro vpliva na obnašanje asfalta z bitumnom B 70/100.

Preglednica 4-5 Rezultati preiskav dolgotrajno staranega bitumna B 70/100

oznaka vzorca	pen mm/10	T_{PK} °C	T_{Fraass} °C	$T_{(S)60}$ °C	$T_{(m)60}$ °C
1	30	59,2	-9	-17,0	-17,0
2	27	70,8	-9	-19,5	-13,0
3	22	70,5	-3	-18,0	-9,0
4	29	63,6	-10	-18,0	-13,0
5	29	56,4	-8	-15,0	-16,0
6	23	63,6	-2	-17,0	-16,0
<i>povprečje</i>	27	64	-7	-17	-14

V preglednici 4-5 ter na sliki 4-11 so rezultati preiskav dolgotrajno (po RTFOT+PAV) staranih vzorcev bitumna.



Slika 4-11 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za dolgotrajno starani bitumen

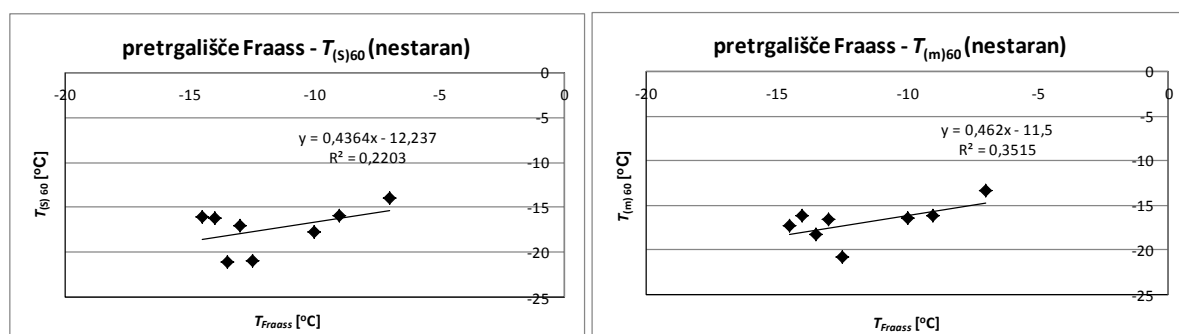
Če primerjamo temperature pretrgališča po Fraass-u ter mejne temperature $T_{(S)60}$ in $T_{(m)60}$ z nestaranimi vzorci, lahko ugotovimo, da laboratorijsko dolgotrajno staranje povzroči pomembne spremembe v lastnostih bitumna pri nizkih temperaturah. Pretrgališča po Fraass-u se v povprečju zviša za 5,8 °C, mejna temperatura $T_{(S)60}$ se poveča za 2,8 °C in $T_{(m)60}$ za 8,9 °C. Med T_{Fraass} in $T_{(m)60}$ ter $T_{(S)60}$ za dolgotrajno starane bitumne korelacij nismo ugotovili.

Pregledali smo tudi rezultate preiskav iz literature [16]. V preglednici 4-6 so prikazani rezultati preiskav osmih nestaranih cestogradbenih bitumnov B 35/50. Bitumni B_1 , B_2 in B_3 so običajni cestogradbeni bitumni, B_4 , B_{11} , B_{12} , B_{13} in B_{14} pa so različno modificirani (s parafini, s fosforjevo kislino, z linearno SBS, z zamreženo SBS). S slike 4-12 je razvidno, da so korelacije T_{Fraass} in $T_{(m)60}$ ter $T_{(S)60}$ za nestarane bitumne zelo šibke.

Te bitumne so dolgotrajno starali po modificiranem postopku. Postopka RTFOT niso izvedli, pospešeno staranje PAV pa je potekalo pri temperaturi 100 °C in 2,1 MPa vendar 25 ur oziroma 5 ur več kot je standardiziran postopek. V preglednici 4-6 so prikazani rezultati preiskav dolgotrajno staranih bitumnov iz literature [16]. S slike 4-13 je razvidno, da so korelacije med T_{Fraass} in $T_{(m)60}$ zelo šibke za dolgotrajno starane bitumne, oziroma jih ni za $T_{(S)60}$.

Preglednica 4-6 Rezultati preiskav nestarane bitumna [16]

vzorec	Pen	T_{PK}	T_{Fraass}	$T_{(S)60}$	$T_{(m)60}$
	mm/10	°C	°C	°C	°C
B_1	38	53,6	-9,0	-15,9	-16,2
B_2	44	56,4	-12,5	-20,9	-20,8
B_3	40	54,0	-14,5	-16,0	-17,3
B_4	36	60,7	-13,5	-21,1	-18,3
B_{11}	30	67,4	-7,0	-13,9	-13,4
B_{12}	28	62,8	-14,0	-16,2	-16,1
B_{13}	39	55,8	-10,0	-17,7	-16,5
B_{14}	35	64,3	-13,0	-17,0	-16,6

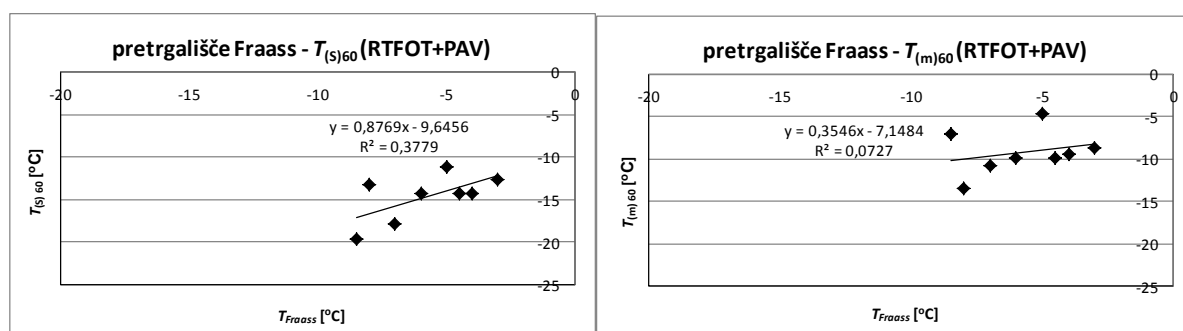


Slika 4-12 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za nestaran bitumen (vir [16])

Preglednica 4-7 Rezultati preiskav dolgotrajno staranega bitumna [16]

vzorec	Pen mm/10	T_{PK} °C	T_{Fraass} °C	$T_{(S)60}$ °C	$T_{(m)60}$ °C
B ₁	16	66,6	-3,0	-12,7	-8,6
B ₂	17	75,6	-7,0	-17,9	-10,7
B ₃	17	66,8	-8,0	-13,2	-13,4
B ₄	17	77,0	-8,5	-19,7	-7,1
B ₁₁	13	83,5	-5,0	-11,1	-4,6
B ₁₂	12	87,5	-4,5	-14,3	-9,9
B ₁₃	18	69,4	-4,0	-14,3	-9,4
B ₁₄	16	75,2	-6,0	-14,3	-9,8

Če primerjamo rezultate v preglednici 4-6 in 4-7 lahko ugotovimo, da se je pretrgališča po Fraass-u zvišalo za 5,2 °C, mejna temperatura $T_{(S)60}$ za 2,1 °C in $T_{(m)60}$ za 6,7 °C. Pretrgališče po Fraass-u in $T_{(m)60}$ sta se pomembno zvišala glede na karakteristike nestarani bitumnov. Ugotovimo lahko, da so ugotovitve podobne kot pri preiskavah, izvedenih v okviru te naloge na bitumnih, uporabljenih v slovenskem prostoru.



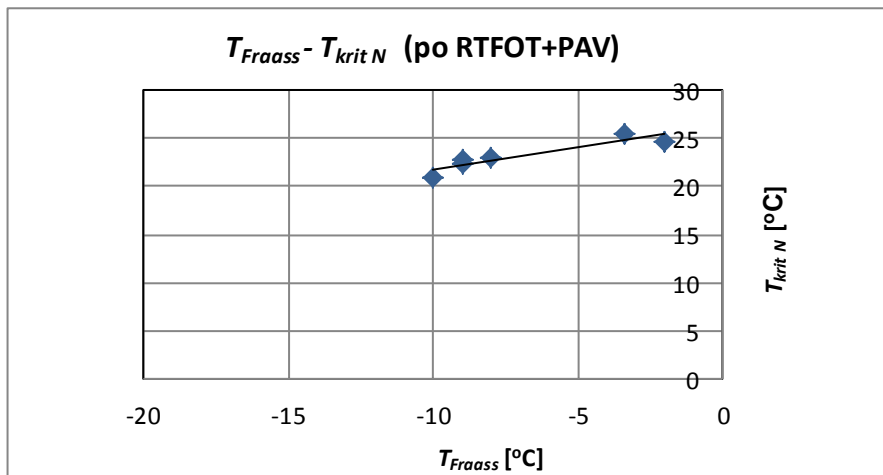
Slika 4-13 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{(S)60}$ oziroma $T_{(m)60}$ za dolgotrajno starani bitumen (vir [16])

4.3.2 Preiskave pretrgališča po Fraass-u in DSR

Pri srednjih temperaturah okolja (nižjih od 40 °C) je bitumen manj elastičen, zato lahko nastanejo razpoke asfalta zaradi utrujanja, če so prometne obtežbe velike. Te karakteristike dolgotrajno staranega bitumna ugotavljamo s preiskavo DSR. V AASHTO [12] je postavljen kriterij razpok zaradi utrujanja – mejna temperatura za dolgotrajno starani bitumen (po RTFOT+PAV) in sicer

$$T_{krit N} \quad pri \quad G^* \cdot \sin \delta \leq 5000 \text{ kPa} \dots\dots\dots (4-5)$$

na podlagi katerega z upoštevanjem povezav podanih v preglednici oziroma 'Table 1' v AASHTO M 320 [12] določimo najnižjo temperaturo uporabe. V preglednici 4-4 in na sliki 4-14 so prikazane sovisnosti med T_{Fraass} in mejno temperaturo glede na kriterij utrujanja $T_{krit N}$ za dolgotrajno starani bitumen. Ugotovimo lahko, da je korelacija med T_{Fraass} in $T_{krit N}$ za dolgotrajno starani bitumen B 70/100 relativno dobra.



Slika 4-14 Korelacije med T_{Fraass} in $T_{krit N}$ za dolgotrajno starani bitumen

4.4 Najnižja temperatura uporabe bitumna B 70/100 po AASHTO

Kakovosti šestih vzorcev bitumna B 70/100 različnih proizvajalcev smo ovrednotili po ameriških specifikacijah Standard specification for Performance-Graded asphalt binder - AASHTO M 320 [12]. Ta specifikacija podaja zahteve za obnašanje bitumnov za asfalte. Bitumni se razvrščajo v razrede glede na temperaturno območje, kjer bo obnašanje tega bitumna v asfaltni zmesi ustrezno. Podrobnejši opis načina razvrščanja bitumnov v razrede je v razdelku 3.3. S preiskavami na dolgotrajno staranem bitumnu in z upoštevanjem kriterijev, podanih v AASHTO [12], dobimo najnižje projektne temperature uporabe. Pri vrednotenju uporabnosti moramo upoštevati dva kriterija:

- kriterij 1: UTRUJANJE
s preiskavo DSR smo določili $T_{krit N}$, nato smo s pomočjo korelacij, podanih v AASHTO M 320 (Table 1) za PG58, izračunali najnižjo temperaturo uporabe $T_{(N)mejna}$ po enačbi 4-5.
- kriterij 2: TOGOST
s preiskavo BBR smo določili $T_{(m,S)mejna}$ (nižja od temperatur $T_{(S)60} -10\text{ °C}$ in $T_{(m)60} -10\text{ °C}$).

$$T_{(N)mejna} = 2 \cdot T_{krit N} - 66 \dots \dots \dots (4-5)$$

Merodajna je višja od temperatur dobljenih po kriteriju 1 in 2. V preglednici 4-8 je prikazano ovrednotenje karakteristik bitumna B 70/100 glede na nizke temperature uporabe.

Preglednica 4-8 Najnižje temperature uporabe z upoštevanjem AASHTO M 320 [12]

	rezultat	kriterij 1	rezultat	rezultat	kriterij 2		PG grade
oznaka vzorca bitumna	po RTFOT+PAV G* sinδ DSR kriterij razpok zaradi utrujanja maks 5.000 kPa DSR	AASHTO M320 DSR kriterij razpok zaradi utrujanja najnižja projektna iz 'Table 1' PG58 (enačba 4-5)	po RTFOT+PAV S ₆₀ kriterij razpok pri nizkih temperaturah BBR	po RTFOT+PAV vrednost m ₆₀ kriterij razpok pri nizkih temperaturah BBR	po RTFOT+PAV zahteva AASHTO M320 višja od obeh temperatur -10°C	višja od temperatur po kriteriju 1 in 2	AASHTO M320 kriterij razpok pri nizkih temp. najnižja projektna temp. asfalta
	$T_{krit N}$	$T_{(N)mejna}$	$T_{(S)60}$	$T_{(m)60}$	$T_{(S,m)mejna}$		
B 70/100	°C	°C	°C	°C	°C	°C	kategorija (°C)
1	22,7	-21	-17,0	-17,0	-27	-21	-22
2	22,5	-21	-19,5	-13,0	-23	-21	-22
3	25,6	-15	-18,0	-9,0	-19	-15	-16
4	20,9	-24	-18,0	-13,0	-23	-23	-22
5	23,1	-20	-15,0	-16,0	-25	-20	-16
6	24,7	-17	-17,0	-16,0	-26	-17	-16
<i>povprečje</i>		-19,5			-23,8	-19,3	

Ugotovimo lahko, da je pri petih od šestih bitumnov B 70/100 odločilen kriterij za najnižjo projektno temperaturo uporabe dobljen s preiskavo DSR. Preiskava nam da kvalitativni kriterij za oceno uporabnosti bitumnov zaradi utrujanja. Zaključimo lahko, da bitumni B 70/100 niso primerni za ceste z zelo težko prometno obremenitvijo. Na manj obremenjenih cestah pa so ti bitumni uporabni za nižje temperature okolja, eden celo do -23 °C. Smiselno bi bilo določiti klimatska območja v Sloveniji in skladno s temi območji določiti minimalno temperaturo uporabe.

Za preliminarno postavitev mejnih vrednosti smo izbrali naslednji način: izločili smo najslabši rezultat nekega parametra (za RTFOT+PAV starani bitumen), izračunali nato povprečno vrednost petih preiskanih vzorcev in standardno deviacijo rezultatov teh petih vzorcev, upoštevali spodnje enačbe (4-6) do (4-9) ter vrednosti zaokrožili. Za preiskavo BBR smo izbrali parametra $T_{(S)60}$ in $T_{(m)60}$ in upoštevali:

$$T_{(S)MIN} = \bar{T}_{(S)60} + 2 \cdot \sigma_{(S)60} \quad \dots\dots\dots (4-6)$$

$$T_{(m)MIN} = \bar{T}_{(m)60} + 2 \cdot \sigma_{(m)60} \quad \dots\dots\dots (4-7)$$

$T_{(S)MIN}$ minimalna zahtevana temperatura v °C
 $T_{(m)MIN}$ minimalna zahtevana temperatura v °C
 δ standardna deviacija rezultatov petih preiskanih vzorcev v °C

Preglednica 4-9 Določite mejnih vrednosti za dolgotrajno starani bitumen

vzorec bitumna	upoštevani rezultati za določitev kriterijev		upoštevani rezultati za določitev kriterijev	
	$T_{(S)60}$	$T_{(m)60}$	$G^* \cdot \sin \delta_{(T=15^\circ\text{C})}$	$G^* \cdot \sin \delta_{(T=25^\circ\text{C})}$
B 70/100	°C	°C	kPa	kPa
1	-17	-17	10870	3708
2	-19,5	-13	9547	3872
3	-18	ni upoštevan	12709	ni upoštevan
4	-18	-13	8264	3064
5	ni upoštevan	-16	12122	3631
6	-17	-16	ni upoštevan	4765
<i>povprečje</i>	-17,9	-15	10702	3808
<i>st dev</i>	1,02	1,87	1827	615
	$T_{(S)MIN}$	$T_{(m)MIN}$	$G^* \cdot \sin \delta_{(T=15^\circ\text{C})MIN}$	$G^* \cdot \sin \delta_{(T=25^\circ\text{C})MIN}$
	-15	-11	8000 do 14000	3000 do 5000

$$T_{(S)MIN} = -17,9 + 2 \cdot 1,02 = -15,86 \quad \text{izberemo prvo višjo celo vrednost } -15^\circ\text{C}$$

$$T_{(m)MIN} = -15,0 + 2 \cdot 1,87 = -11,26 \quad \text{izberemo prvo višjo celo vrednost } -11^\circ\text{C}$$

Za preiskavo DSR smo izbrali parameter $G^* \cdot \sin \delta$ pri 15 °C in 25 °C za pet od šestih vzorcev in upoštevali:

$$G^* \cdot \sin \delta_{(T=15)MIN} = \overline{G^* \cdot \sin \delta_{(T=15)}} \pm 2 \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (4-8)$$

$$G^* \cdot \sin \delta_{(T=25)MIN} = \overline{G^* \cdot \sin \delta_{(T=25)}} \pm 2 \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (4-9)$$

$$G^* \cdot \sin \delta_{(T=15)MIN} = 10702 \pm 2 \cdot 1827 \quad \text{pričakovano območje 8000 kPa do 14000 kPa}$$

$$G^* \cdot \sin \delta_{(T=25)MIN} = 3808 \pm 2 \cdot 615 \quad \text{pričakovano območje 3000 kPa do 5000 kPa}$$

Zgoraj izbrane preliminarne mejne vrednosti za dolgotrajno starani bitumen B 70/100 so prikazane v preglednici 5-1.

4.5 Najvišja temperatura uporabe B 70/100 po AASHTO

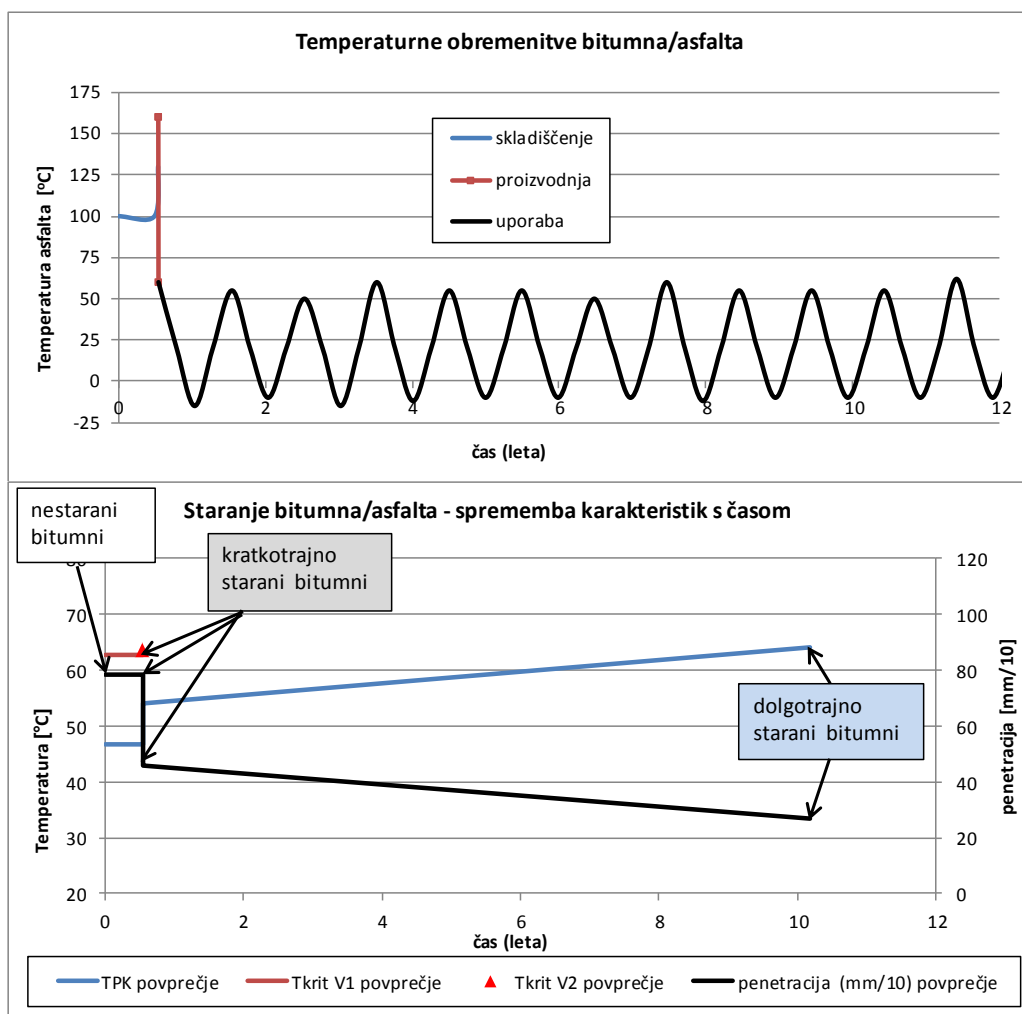
Vpliv staranja na obnašanje B 70/100 pri visokih temperaturah ni predmet te naloge, vendar kljub temu zaradi celovitosti vedenja o obnašanju bitumnov te vrste podajamo tudi rezultate teh preiskav. V AASHTO M 320 [12] je postavljen kriterij najvišje mejne temperature uporabe, dobljen s preiskavo DSR in sicer za nestarani bitumen

$$T_{krit\ V1} \text{ pri } G^*/\sin\delta = 1,0 \text{ kPa} \dots\dots\dots(4-10)$$

in kriterij za mejno temperaturo za kratkotrajno starani bitumen (po RTFOT)

$$T_{krit\ V2} \text{ pri } G^*/\sin\delta = 2,2 \text{ kPa} \dots\dots\dots(4-11)$$

Na sliki 4-15 so na zgornjem časovnem grafu shematsko prikazane temperaturne obremenitve asfalta med vgradnjo in v naslednjih desetih letih. Na spodnjem grafu slike 4-15 so prikazane spremembe karakteristik cestogradbenega bitumna B 70/100, ki so pomembne za obnašanje asfalta pri visokih temperaturah okolja (prikazane so povprečne vrednosti preiskav šestih vzorcev, ki smo jih laboratorijsko starali).

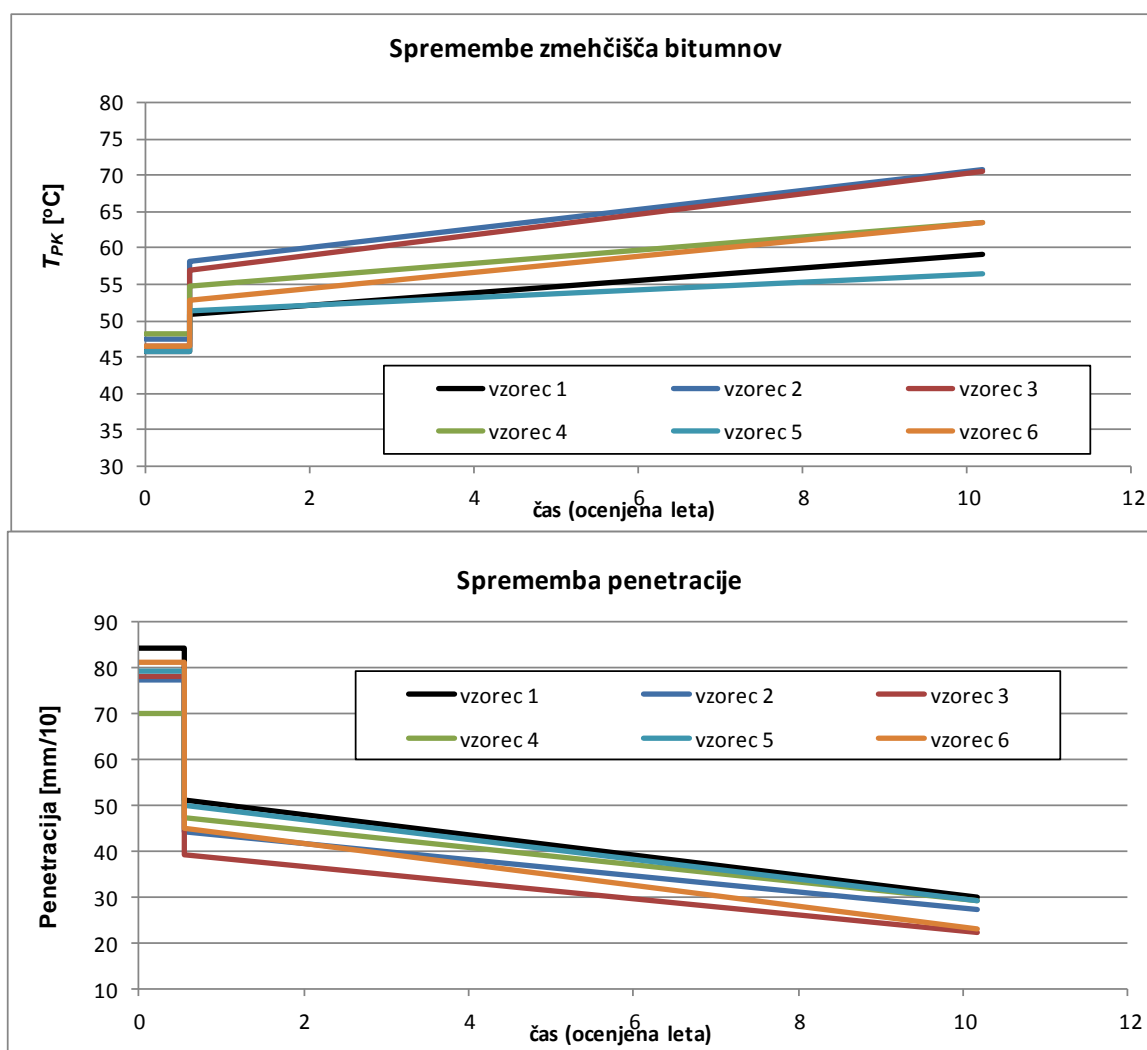


Slika 4-15 Sprememba karakteristik bitumna B 70/100 pri visokih temperaturah

Običajno izvajamo preiskavo zmečkščiča (T_{PK}), penetracije (glej preglednico 3-3) nestaranih in kratkotrajno staranih bitumnov. Na grafu pa so tudi rezultati preiskav DSR $T_{krit V1}$ in $T_{krit V2}$. Teh preiskav običajno ne izvajamo na dolgotrajno staranih bitumnih, saj se odpornost na visoke temperature z otrjevanjem povečuje.

Kot je bilo pričakovano, se je zmečkščič bitumnov pomembno zvišalo po kratkotrajnem staranju, ki simulira vgradnjo, kar ugodno vpliva na odpornost na visoke temperature. Rezultati preiskave DSR oziroma povprečje temperatur šestih vzorcev $T_{krit V1}$ povprečje za nestarani in $T_{krit V2}$ povprečje za kratkotrajno starani bitumen imata enako vrednost (slika 4-15). Preiskava DSR ugodni vpliv vgradnje pokaže posredno, saj sta kriterija, pri katerih odčitamo mejno temperaturo, različna. Kot je bilo pričakovano, se je penetracija tako po kratkotrajnem kot po dolgotrajnem staranju znižala, saj je bitumen postal bolj tog.

Na sliki 4-16 so rezultati preiskav zmečkščiča (T_{PK}) in penetracije za vsak vzorec preiskanega bitumna. S slike vidimo, da sta z leti uporabe najmanj otrdela vzorca 1 in 5, iz česar lahko posredno sklepamo, da se najbolj obnašata pri nizkih temperaturah. Iz rezultatov preiskav T_{PK} in penetracije pa ni jasnih zaključkov o primernosti teh bitumnov za nizke temperature.



Slika 4-16 Sprememba penetracije in zmečkščiča B 70/100 pri visokih temperaturah

5 ZAKLJUČKI

5.1 Povzetek rezultatov preiskav

Asfaltne zmesi so največkrat uporabljeni materiali za zgornji ustroj voziščnih konstrukcij. Mehansko fizikalne lastnosti asfaltnih zmesi so zelo odvisne od lastnosti in obnašanja bitumnov, ki predstavljajo bistveno komponento v sestavi asfaltnih zmesi. Karakteristike posamezne vrste bitumna morajo omogočati, da projektirana asfaltna zmes nudi ustrezno odpornost tako proti plastičnim deformacijam pri visokih temperaturah kot odpornost proti razpokam pri nizkih temperaturah ter odpornost proti utrujanju pod vplivom prometnih obremenitev tudi po več letih uporabe. Zato so preiskave lastnosti vhodnih in dolgotrajno staranih bitumnov zelo pomembne za oceno obnašanja asfaltnih plasti v teku eksploatacije vozišča in celotne življenjske dobe voziščne konstrukcije.

V Sloveniji se najpogosteje uporabljajo tri vrste bitumnov za cestogradnjo, eden izmed njih je B 70/100. Poleg osnovnih lastnosti bitumnov (temperatura zmečičišča, penetracija pri 25 °C, temperatura pretrgališča) je pomembno tudi ugotoviti spremembe lastnosti bitumnov pri staranju. Novejši laboratorijski postopki omogočajo simuliranje kratkotrajnega in dolgotrajnega staranja v laboratoriju. Ugotavljanje kakovosti staranih bitumnov je pomembno z vidika ocenjevanja trajnosti asfaltnih plasti, v katerih bo uporabljen ta bitumen. Staranje bitumnov je oksidacijski proces, ki je prisoten že v teku proizvodnje na asfaltnem obratu ter pri vgradnji in tudi kasneje v asfaltni plasti tekom eksploatacije vozišča. Laboratorijsko staranje bitumnov in asfaltov je zamuden in drag proces. Količine materiala, ki ga je treba starati, so pri bitumnih manjše, kot če staramo asfalte, zato so se v svetu uveljavile predvsem metode za laboratorijsko staranje bitumnov.

Ugotavljanje obnašanja vhodnih oziroma nestaranih bitumnov pri nizkih temperaturah uporabe (≤ 0 °C) se izvaja že dolga leta s preiskavo imenovano Fraass, ki pa ima več pomanjkljivosti. Zato se je razvila preiskava 'Ugotavljanje upogibne togosti' oziroma BBR (Bending Beam Rheometer), ki je bila v Sloveniji standardizirana leta 2005. Metoda je priporočena za preiskave predvsem dolgotrajno staranih bitumnov. V Združenih Državah Amerike je v veljavi AASHTO M 320 [12], v katerem so že postavljene mejne vrednosti, s katerimi ovrednotimo tudi vpliv staranja bitumnov na njihovo obnašanje pri nizkih temperaturah. V Sloveniji, kakor tudi v evropskem prostoru, zahtev za mejne vrednosti parametrov, ki jih določamo z metodo BBR, še nimamo. Mejne vrednosti bo treba postaviti za vsako vrsto bitumnov za cestogradnjo (običajnih cestogradbenih ali s polimeri modificiranih bitumnov).

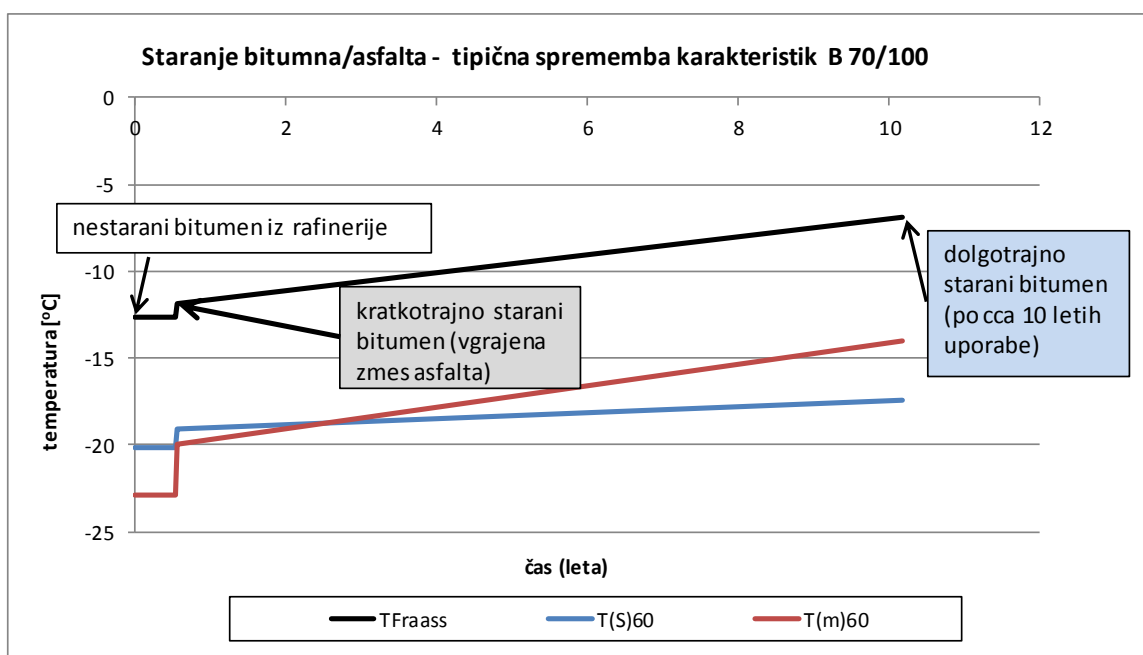
Z obširnimi laboratorijskimi preiskavami šestih vzorcev bitumna B 70/100 smo ugotovili spremembe nekaterih pomembnih karakteristik pri staranju, povzročeni s laboratorijskimi postopki. Preiskave togosti cestogradbenih bitumnov po metodi BBR se v Sloveniji praviloma ne izvajajo, tako da so bili bitumni B 70/100 v okviru te naloge preiskani prvič. Izbrali smo vzorce bitumnov, ki se uporabljajo za gradnjo cest v Sloveniji.

Na podlagi izkušenj vemo, da oksidacija, prometne obremenitve in klimatske obremenitve povzročijo staranje oziroma otrjevanje bitumnov. Karakteristike bitumna se spremenijo predvsem v času proizvodnje in vgradnje asfalta, ko je le-ta podvržen visokim temperaturam. V tem času je izhlapevanje bolj hlapnih komponent bitumna zaradi visokih temperatur veliko,

prav tako pa oksidacija, saj bitumen obviije vroč kameni agregat. Karakteristike bitumna se spreminjajo tudi v celotnem času uporabe predvsem zaradi oksidacije, UV sevanja, temperaturnih sprememb in utrujanja pri prometnih obremenitvah.

Poškodbe asfalta nastajajo predvsem v času zelo visokih in zelo nizkih temperatur zraka oziroma posledično vozišča. Pri zelo dolgotrajnih visokih temperaturah zraka lahko nastajajo kolesnice, ko temperatura asfalta preseže temperaturo zmečkaišča bitumna. Pri nizkih temperaturah pod lediščem pa so cestogradbeni bitumni bolj togi in nastajajo razpoke. Ker bitumni z leti postajajo vse bolj togi, se nevarnost nastanka razpok z leti povečuje, nevarnost nastanka kolesnic pa se z leti staranja bitumna zmanjšuje.

Sodobna oprema omogoča laboratorijsko staranje bitumnov, s katerim simuliramo staranje pri proizvodnji in staranje vgrajenega bitumna, da lahko ovrednotimo karakteristike bitumnov pri nizkih temperaturah. Preiskave smo najprej izvedli na nestaranih vzorcih bitumna, nato smo uporabili postopek imenovan RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) ali kratkotrajno staranje ter preiskave ponovili. Postopek RTFOT simulira spremembe bitumenskih veziv pri proizvodnji, transportu na gradbišče in vgradnji asfaltnih zmesi. Nazadnje smo na kratkotrajno staranih bitumnih uporabili še postopek PAV (Pressure Ageing Vessel) oziroma pospešeno staranje. Bitumen, staran po obeh postopkih, obravnavamo kot dolgotrajno starani bitumen, ki simulira proizvodnjo, vgradnjo ter večletno uporabo bitumna v asfaltni plasti. Ponovili smo navedene preiskave ter merili reološke karakteristike z napravo DSR. Rezultate raziskav smo analizirali in ugotavljali možne korelacije.



Slika 5-1 Spremembe karakteristik bitumna B 70/100 z laboratorijskim staranjem

Na sliki 5-1 so prikazane spremembe nekaterih karakteristik cestogradbenega bitumna B 70/100, ki so pomembne za obnašanje pri nizkih temperaturah. Prikazane so tipične spremembe temperature pretrgališča (T_{Fraass}), temperatura pri togosti 300 MPa ($T_{(S)60}$) ter temperatura pri vrednosti $m = 0,300$ ($T_{(m)60}$). Rezultate preiskav nestaranih bitumnov, kratkotrajno staranih in dolgotrajno staranih bitumnov B 70/100 smo za šest vzorcev povprečili. Predpostavili smo, da se lastnosti bitumna, ki ustrezajo laboratorijskemu

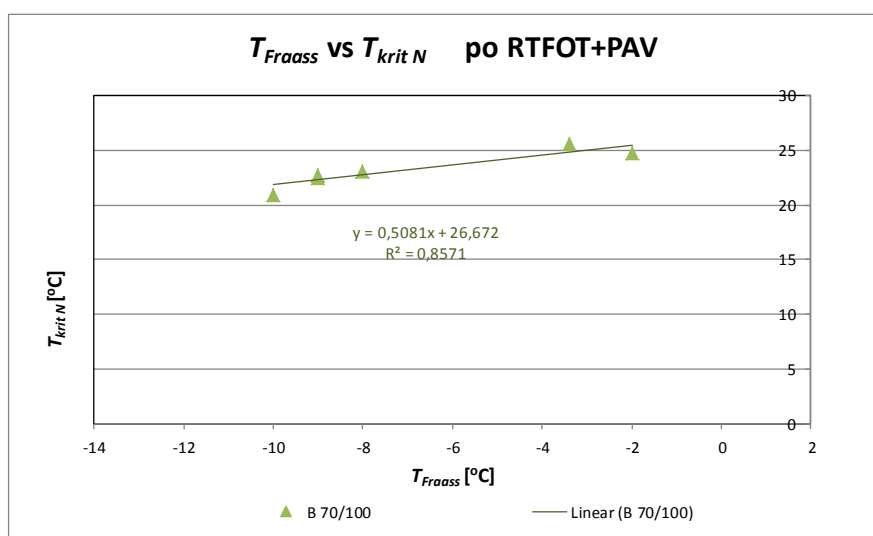
dolgotrajnemu staranju, spremenijo v 10 letih [36]. Prikazana je sprememba karakteristike, ki se je uporabljala do sedaj za vrednotenje odpornosti na nizke temperature T_{Fraass} , ter novejši količini $T_{(S)60}$ ter $T_{(m)60}$.

Mejne temperature $T_{(S)60}$ ter $T_{(m)60}$ so za vsak vzorec ugotovljene na laboratorijsko staranih vzorcih bitumna z upoštevanjem ameriških specifikacij AASHTO M 320 [12] oziroma zvez in mejnih vrednosti, ki so postavljene v teh predpisih. Evropski standardi takih mejnih vrednosti še ne predpisujejo, vendar pa je v pripravi nova izdaja standarda EN 12591 'Specifikacije za cestogradbene bitumne'. Predvideva se, da bo v noveliranem standardu predvideno ugotavljanje karakteristik tudi z nekaterimi novejšimi preiskavami – 'Bending Beam Rheometer' – BBR, 'Dynamic shear Rheometer' – DSR in 'Multiple Stress Creep and Recovery Test' – MSCRT.

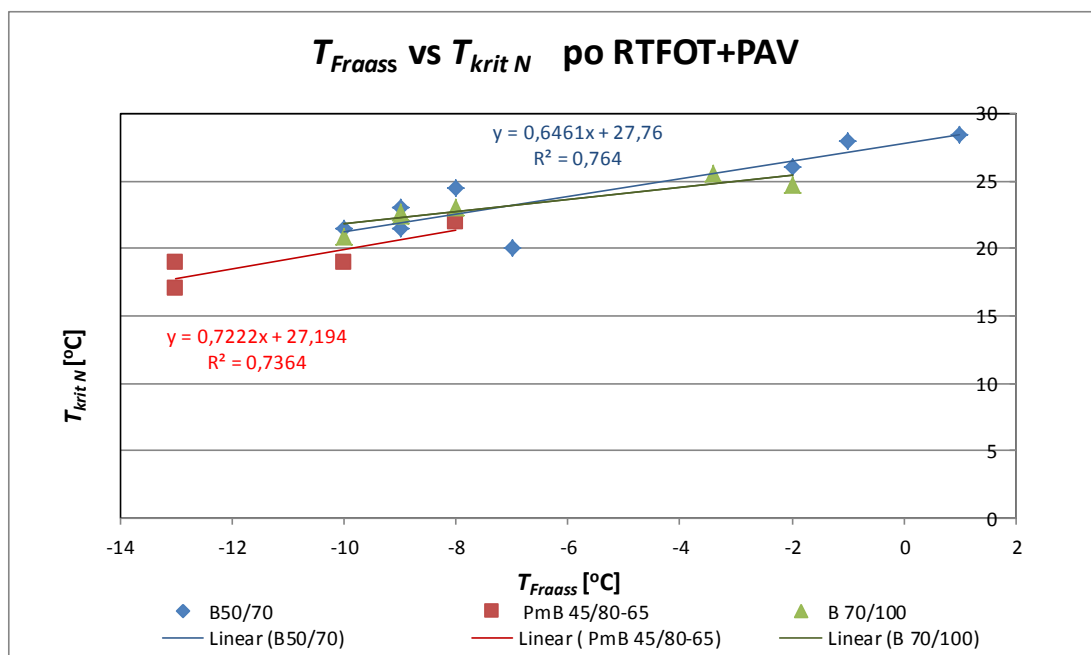
5.2 Ugotovljene korelacije

Raziskave so pokazale, da za nestarane, kratkotrajno starane in dolgotrajno starane bitumne B 70/100 ni bilo mogoče ugotoviti zanesljivih korelacij med pretrgališčem po Fraass-u T_{Fraass} in rezultati preiskave BBR - mejni temperaturi pri togosti 300 MPa $T_{(S)60}$ ali mejni temperaturi pri vrednosti $m = 0,300$ $T_{(m)60}$. Najboljša korelacija ($R^2=0,857$) je bila ugotovljena pri preiskavi DSR med T_{Fraass} in mejno vrednostjo glede na kriterij utrujanja $T_{krit N}$ za dolgotrajno starane bitumne B 70/100, ki je prikazana na sliki 5-2.

Upoštevali smo tudi arhivske podatke Laboratorija za asfalte in bitumenske proizvode ZAG Ljubljana [37] in [38]. V letih 2014 in 2015 smo v laboratoriju izvedli preiskave po laboratorijskem staranju na cestogradbenih bitumnih B 50/70 (osem vzorcev) in s polimeri modificiranih bitumnih PmB 45/80-65 (pet vzorcev). Na sliki 5-3 so prikazane dobljene korelacije med T_{Fraass} in $T_{krit N}$ za vse tri vrste bitumnov po dolgotrajnem laboratorijskem staranju. Dobljene korelacije so za B 50/70 ($R^2 = 0,764$) in PmB 45/80-65 ($R^2 = 0,736$) nekoliko slabše kot za B 70/100.



Slika 5-2 Korelacija med T_{Fraass} in $T_{krit N}$ za B 70/100



Slika 5-3 Korelacija med T_{Fraass} in mejno vrednostjo glede na kriterij utrujanja $T_{krit N}$

5.3 Ocena temperaturnega območja uporabe bitumnov B 70/100

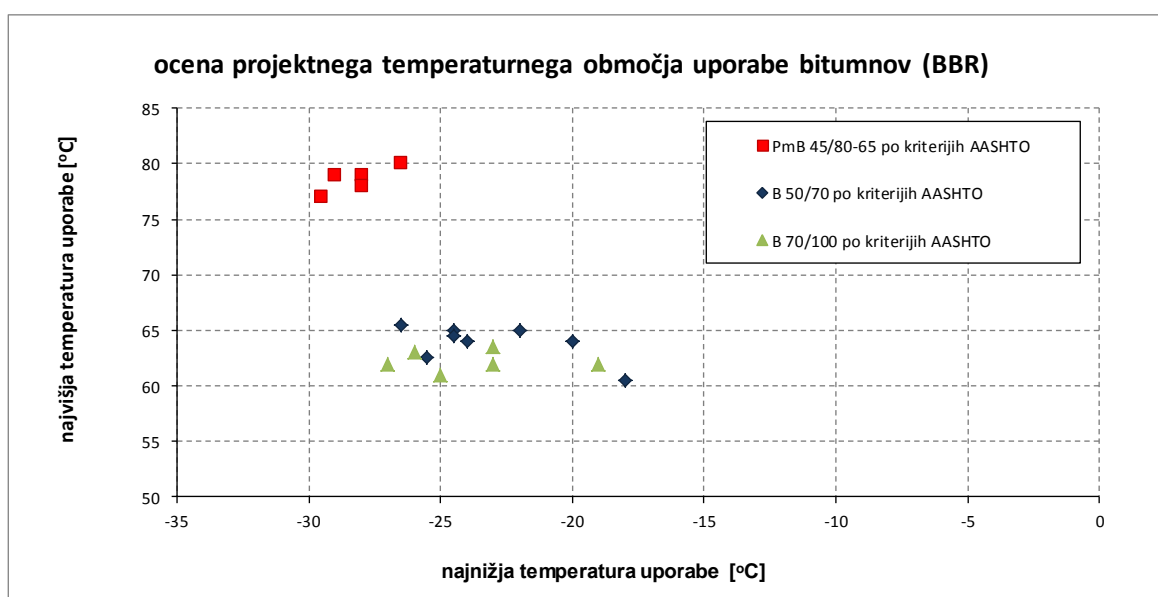
V okviru magistrske naloge smo prvič ovrednotili karakteristike cestogradbenih bitumnov B 70/100 po dolgotrajnem staranju ter tako osnovali skromno bazo podatkov. Z izvedenimi preiskavami v okviru naloge smo lahko ovrednotili najnižje sprejemljive temperature okolja v daljšem času uporabe asfalta, pri katerih ne bodo nastale razpoke zaradi nizkih temperatur. Upoštevali smo zahteve, ki so podane v AASHTO M 320 [12], saj kriterijev v evropskih ali slovenskih predpisih zaenkrat ni. Kriteriji za določanje mejnih temperatur so podani v razdelku 3.3, določanje najnižjih temperatur uporabe pa je opisano v razdelku 4.4. V razdelku 4.5 je opisano tudi vrednotenje območja uporabe B 70/100 za visoke temperature, ki pa ni bilo predmet naloge.

Mejne temperature za posamezni vzorec bitumna smo zbrali tako za nizke temperature uporabe kot tudi za visoke temperature uporabe in so prikazane na sliki 5-4 in 5-5. Na grafu so prikazani tudi rezultati preiskav na kratkotrajno in dolgotrajno staranih bitumnih B 50/70 in PmB (izvedenih v letih 2014 in 2015). Preiskali smo osem vzorcev B 50/70 [37] in pet vzorcev PmB 45/80-65 [38]. Laboratorijsko staranje je potekalo za vse vrste bitumnov po enakih postopkih, uporabili smo iste kriterije za vrednotenje. Na sliki 5-4 so prikazana temperaturna območja uporabe z upoštevanjem samo rezultatov preiskave BBR, ki okarakterizirajo togost oziroma elastičnost bitumna. Na sliki 5-5 pa so prikazana temperaturna območja uporabe z upoštevanjem rezultatov preiskave BBR in DSR, ki okarakterizirajo odpornost bitumna na utrujanje. Ocena projektnega temperaturnega območja uporabe posameznega vzorca bitumna na podlagi smiselnega upoštevanja specifikacij AASHTO [12] za cestogradbeni bitumen B 50/70, B 70/100 ter PmB 45/80-65 nam pokaže naslednje:

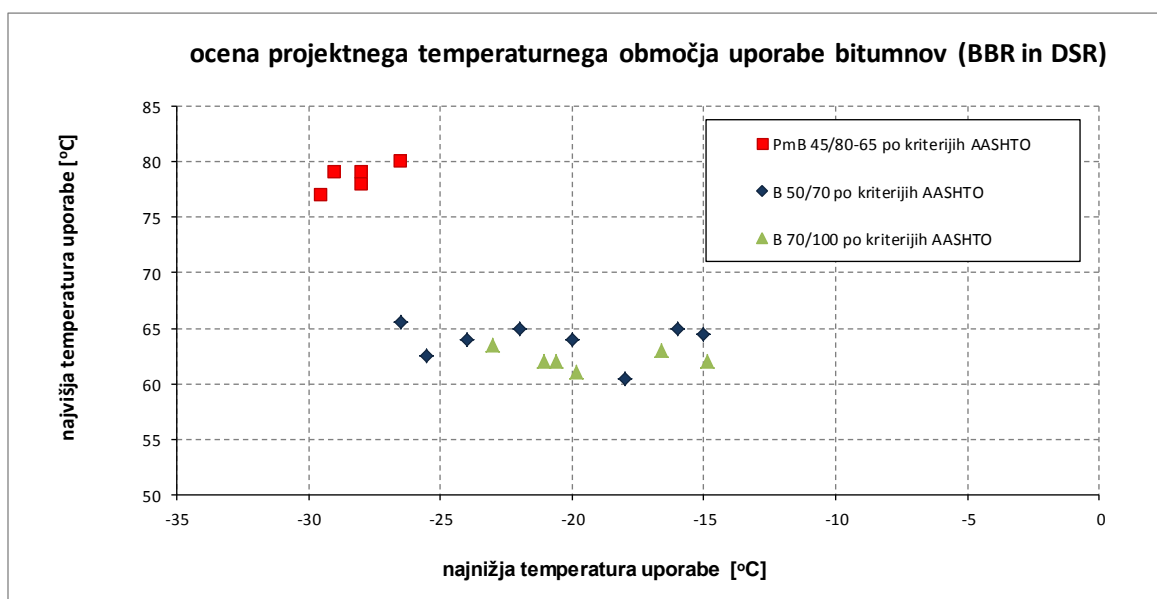
- S polimeri modificirani cestogradbeni bitumni imajo bistveno večje temperaturno območje uporabe. Uporabni so pri pomembno nižjih temperaturah okolja v primerjavi

z običajnimi cestogradbenimi bitumni. Karakteristike vzorcev po laboratorijskem staranju kažejo, da se tudi po dolgotrajnem staranju vseh pet preiskanih vzorcev obnaša ustrezno vsaj do $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature asfalta. Pri vseh petih vzorcih bitumnov je bil najstrožji kriterij dobljen glede na togost oziroma dobljen s preiskavo BBR.

- Uporabnost nekaterih preiskanih bitumnov B 70/100 pri nizkih temperaturah je zelo dobra, če upoštevamo samo rezultate preiskave BBR (slika 5-4). Glede na karakteristike je en vzorec ustrezal za temperature do $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ tudi po dolgotrajnem staranju. Vendar pa je bil pri petih od šestih bitumnov najstrožji kriterij dobljen glede na utrujanje oziroma s preiskavo DSR. Glede na utrujanje in togost je najnižja temperatura uporabe za preiskane bitumne od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (slika 5-5).
- Uporabnost nekaterih preiskanih vzorcev bitumnov B 50/70 pri nizkih temperaturah je dobra, tudi če upoštevamo kriterij utrujanja. Glede na karakteristike je en vzorec po dolgotrajnem staranju ustrezal celo za temperature do $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature asfalta (slika 5-4). Pri štirih od osmih bitumnov pa je bil najstrožji kriterij dobljen glede na utrujanje s preiskavo DSR. Glede na kriterij utrujanja je bila pri teh štirih vzorcih najnižja temperatura uporabe od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (slika 5-5).
- Takoj po vgradnji se vseh pet s polimeri modificiranih bitumnov obnaša ustrezno do najmanj $76\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature asfalta glede na kriterije specifikacij AASHTO [12] (upoštevati moramo, da te mejne temperature veljajo za 7-dnevno obdobje zaporednih dni z visokimi temperaturami). Glede na rezultate meritev temperature površine asfalta [28] na lokaciji Most čez Muro, temperature površine vozišča dosežejo zaenkrat največ $62\text{ }^{\circ}\text{C}$, v sedmih zaporednih dnevih pa je bila v letu 2015 dosežena temperatura $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (slika 4-4). Od treh vrst preiskanih bitumnov je uporabnost B 70/100 najslabša pri visokih temperaturah, kot je bilo tudi pričakovano. Mejne visoke temperature vseh šestih preiskanih bitumnov so v območju od $61\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ (slika 5-4 in 5-5). Vzorci bitumnov B 50/70 so bili glede na proizvajalca različno uporabni pri visokih temperaturah (mejne temperature osmih preiskanih bitumnov so bile v območju od $61\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $66\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Slika 5-4 Ocena temperaturnega območja uporabe glede na kriterij BBR (AASHTO)



Slika 5-5 Ocena temperaturnega območja uporabe glede na kriterij DSR in BBR (AASHTO)

Na sliki 5-5 je prikazana ocena temperaturnega območja uporabe glede na dva kriterija; DSR in BBR. Ugotovimo lahko, da je bil pri petih od šestih bitumnov B 70/100 odločilen kriterij za najnižjo projektno temperaturo uporabe dobljen s preiskavo DSR, ki nam da kvalitativni kriterij za oceno uporabnost bitumnov zaradi utrujanja. Zaključimo lahko, da bitumni B 70/100 niso primerni za ceste z zelo težko prometno obremenitvijo in veliko gostoto prometa. Na manj obremenjenih cestah pa je večina preiskanih bitumnov uporabna za temperature asfalta nižje od $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.4 Predlog kriterijev za bitumne B 70/100

Preiskave, s katerimi laboratorijsko staramo bitumne in vrednotimo karakteristike pri nizkih temperaturah, so novejšje. Preiskave so sicer standardizirane, vendar še ni podatkov o primerni ponovljivosti in obnovljivosti teh preiskav. Zato tudi ne moremo vedeti, s kakšno natančnostjo smo uspeli določiti posamezne parametre in posledično temperaturno območje uporabe bitumnov. Z raziskavami v tej nalogi smo potrdili, da z laboratorijsko opremo, ki je na razpolago, in z upoštevanjem kriterijev za togost $T_{(S)60}$ in relaksacijo $T_{(m)60}$ ter utrujanje $T_{krit N}$ pri nizkih temperaturah in s $T_{krit V1}$ ter $T_{krit V2}$ pri visokih temperaturah lahko določimo temperaturno območje uporabe bitumna.

S preiskavami smo zagotovili skromno bazo podatkov o karakteristikah teh bitumnov po staranju. Želeli smo podati predlog kriterijev za karakteristike bitumnov B 70/100 pri nizkih temperaturah po laboratorijskem staranju. Preden se lahko taki predlogi uveljavijo v slovenskih predpisih (TSC ali SIST) je potrebno raziskati zveze med obnašanjem teh bitumnov in obnašanjem vzorcev posameznih vrst asfalta, narejenih s temi bitumni, pri nizkih temperaturah. Iz literature lahko ugotovimo, da je možno postaviti korelacije med karakteristikami bitumnov pri nizkih temperaturah in lastnostmi asfaltov pri nizkih temperaturah. Upoštevati pa je treba, da so lastnosti asfaltov pri nizkih temperaturah odvisne tudi od vsebnosti bitumna v asfaltni zmesi in od količnika votlin v zmesi. Asfaltna zmesi z

večjim deležem votlin (na primer drenažni asfalt PA) so zato manj odporne na nizke temperature kot zmesi z manjšim deležem votlin (na primer bitumen z mastiksom SMA).

Na podlagi literature [29] lahko ugotovimo, da sta kriterija $T_{(S)60}$ ter $T_{(m)60}$ primerna za napovedovanje mejne temperature pretrga pri ohlajevalnih testih (TSRST) asfaltnih preskušancev. Za določitev teh korelacij bo treba izvesti ohlajevalne preskuse na zadostnem številu vzorcev različnih asfaltnih zmesi, narejenih z istim bitumnom, ki jih uporabljamo v Sloveniji.

Kljub vsemu navedenemu smo na podlagi izvedenih preiskav oblikovali predlog kriterijev za posamezne parametre, ki jih dobimo s standardiziranimi preiskavami.

Preglednica 5-1 Predlog kriterijev za B 70/100 po laboratorijskem staranju

lastnost bitumna B 70/100	Standard/metoda	enota	zahteva	bitumen
penetracija pri 25°C	EN 1426	0,1 mm	70 do 100	nestarani
zmehčišče T_{PK}	EN 1427	°C	43 do 51	nestarani
plamenišče	EN ISO 2592	°C	≥ 230	nestarani
topnost	EN 12592	% (m/m)	≥ 99,0	nestarani
indeks penetracije	annex A	/	-1,5 do +0,7	nestarani
dinamična viskoznost pri 60°C	EN 12596	Pa.s	≥ 90	nestarani
pretrgališče po Fraass-u	EN 12593	°C	≤ -10	nestarani
kinematična viskoznost pri 135°C	EN 12595	mm ² /s	≥ 230	nestarani
po RTFOT	EN 12607-1			
ohranjena vrednost penetracije	EN 12607-1 in EN 1426	%	≥ 46	po RTFOT
zvišanje zmehčišča (po RTFOT)	EN 12607-1 in EN 1427	°C	≤ 9	po RTFOT
sprememba mase (po RTFOT)	EN 12607-1	% (m/m)	≤ 0,8	po RTFOT
temperatura pri togosti lezenja 300 MPa	EN 14771	°C	<-17	po RTFOT
temperatura pri m vrednost m = 0,300	EN 14771	°C	<-13	po RTFOT
po RTFOT+PAV	EN 12607-1 + EN 14769			
$G^* \cdot \sin\delta$ (pri 1,59 Hz) pri 15°C	EN 14770	kPa	8000 do 14000	po RTFOT+PAV
$G^* \cdot \sin\delta$ (pri 1,59 Hz) pri 25°C	EN 14770	kPa	3000 do 5000	po RTFOT+PAV
temperatura pri togosti lezenja 300 MPa	EN 14771	°C	<-15	po RTFOT+PAV
temperatura pri m vrednost m = 0,300	EN 14771	°C	<-11	po RTFOT+PAV

Menimo, da je smiselno preiskati togost bitumnov po kratkotrajnem staranju, kakor tudi po dolgotrajnem staranju. Zlasti pri običajnih cestogradbenih bitumnih je treba izvesti tudi preiskavo DSR za ugotavljanje odpornosti proti utrujanju na dolgotrajno staranih bitumnih. V preglednici 5-1 je podan predlog preiskav, ki naj bi se izvajale na B 70/100 za oceno temperaturnega območja uporabe. Podane so tudi zahteve za karakteristike bitumna (po RTFOT+PAV), ki pa so zaenkrat preliminarne in jih je treba validirati z nadaljnjimi raziskavami bitumnov ter dejanskega obnašanja asfalta pri nizkih temperaturah za običajne vrste asfaltnih zmesi.

VIRI

Standardi

- [1] SIST EN 12591:2009. Bitumen in bitumenska veziva – Specifikacije za cestogradbene bitumne.
- [2] SIST EN 1426:2015. Bitumen in bitumenska veziva - Določanje penetracije z iglo.
- [3] SIST EN 1427:2015. Bitumen in bitumenska veziva - Določanje znehčiča - Metoda prstana in kroglice.
- [4] SIST EN 12593:2007. Bitumen in bitumenska veziva - Določanje pretrgališča po Fraassu.
- [5] SIST EN 12607-1:2007. Bitumen in bitumenska veziva – Določanje odpornosti proti otrjevanju pod vplivom toplote in zraka – 1. del: metoda RTFOT.
- [6] SIST EN 14769:2012. Bitumen in bitumenska veziva – Pospešeno staranje v tlačni posodi (PAV).
- [7] SIST EN 14771:2012. Bitumen in bitumenska veziva – Ugotavljanje upogibne togosti – Reometer z nosilcem, obremenjenim na upogib (BBR).
- [8] SIST EN 14770:2012. Bitumen in bitumenska veziva-Ugotavljanje kompleksnega strižnega modula in faznega kota (DSR).
- [9] SIST EN 12697-46: 2012. Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 46. del: Odpornost asfaltne plasti proti razpokam pri nizkih temperaturah z enosnimi nateznimi preskusi.
- [10] SIST EN 12697-6:2012. Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 6. del: Ugotavljanje gostote bitumenskih preskušancev.
- [11] TSC 06.300/06.400:2009. Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti, Tehnična specifikacija za javne ceste (soglasje ministra 24.7.2009).
- [12] AASHTO M 320-10. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.
- [13] SIST EN 14023:2010. Bitumen in bitumenska veziva - Okvirna specifikacija za bitumne, modificirane s polimeri.
- [14] SIST 1035:2008. Bitumen in bitumenska veziva - Cestogradbeni, s polimeri modificirani bitumni - Zahteve in pravila za uporabo SIST EN 14023.

Članki, podatki

- [15] Soenen H. in Vanelstraete A. 2003. Performance indicators for low temperature cracking, Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials.

[16] A.L Babadopoulos, L. F., Le Guern, M., Chailleux E., Dreessen, S. 2012. Relationships between low temperature properties of asphalt binders. V: 2nd International Symposium on, Asphalt Pavements et Environnement, Transportation Research Board, of The National Academies, Oct 2012, France. 3 (01/10/2012), 10p, bibliogr. (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00849446>).

[17] Bahia, H.U. in Anderson, D.A. 1995. The Pressure Aging Vessel (PAV): A Test to Simulate Rheological Changes Due to Field Aging. ASTM Special Technical Publication 1241, Hardin, J.C., ed. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.

[18] Büchler, S., Renken, P. in Mollenhaer, K. 2008. Relation between rheological bitumen characteristics and the resistance of asphalt against fatigue and cold temperatures. V: 4th Euroasphalt&Eurobitumen congress, May 2008, Denmark, loč.pag.

[19] Büchler, S., Mollenhauer, K. in Renken, P 2009. Ageing of stone mastic asphalt and evaluation of cracking resistance. London. Taylor & Francis Group, 339-348.

[20] Leutner, R., Lobach, T. in Renken, P. 2007. Effect of RA in asphalt mixes for binder courses with PmB - Einfluss der zugabe von Ausbauasphalten in Asphaltbindermischgut mit PmB 45. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 954, 2007.

[21] Renken, P. 2007. Quality of porous asphalt layers – Optimierung und Qualitätssicherung Offenporiger Asphaltdeckschichten Teil II. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik.

[22] Hase, M. in Oelkers, C. 2008. The influence of low temperature behaviour of polymer modified binders and of cryogenic tensile stress in asphalt on the life cycle of traffic areas. V: 4th Euroasphalt&Eurobitumen congress, May 2008, Denmark.

[23] Hajj, E. Y., Loria, L. G. in Sebaaly, P. E. 2012. Estimating effective performance grade of asphalt binders in high-RAP mixtures using different methodologies: Case study. TRB2012.

[24] Butt, A. A., Tasdemir, Y. in Edwards, Y. 2009. Environmental friendly wax modified mastic asphalt. Environmentally Friendly Roads (ENVIROAD).

[25] Loria, L. G., Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., Barton, M., Kass, S. in Liske, T. 2011. Performance evaluation of asphalt mixtures with high RAP content. TRB2011.

[26] Lu, X., Isacson, U. in Ekblad, J. 2003. Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures. Materials and Structures. Vol. 36. December 2003. 652-656.

[27] Henigman, S. Ljubič. A. et al. 2016. Asphalt. 3. izdaja. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 404 str.

[28] Korošec, M. 2016. Baza arhivskih podatkov DARS,d.d. – rezultati meritev zraka in temperature na Mostu čez Muro. Osebna komunikacija. (18. 4. 2016).

[29] Tušar, Marjan. Valentin, J. et al, (2015), Functional Durability-related Bitumen Specification (FunDBitS), Deliverable No D1 April 2015, Identified correlations between bitumen and asphalt properties (Interim Report) draft report, Sporočilo za: Mojca Ravnikar Turk 30. 09. 2015. Osebna komunikacija.

[30] Błażejowski, K., Olszacki, J. in Peciakowski H., 2014. Bitumen Handbook, Orlen Asphalt. http://www.ornel-asfalt.pl/pl/informacjetechniczne/portaliwiedzy/documents/poradnik_eng_ostateczny.pdf (Pridobljeno 22. 12. 2015.)

[31] Hribar, D. 2014. Analiza vpliva nizkih temperatur na značilnosti bitumeniziranih zmesi za obrabne plasti na voziščih. Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Hribar): loč.pag.

Dopis

[32] Dolinar, M. in Bergant, K. (2014). Agencije Republike Slovenije za Okolje, številka: 35901-5/2014-2 z dne 14.2.2014, Zadeva: Odgovor na poziv k preveritvi klimatskih podatkov in obtežb iz Evrokodov.

Spletne strani

[33] Absolutna najnižja temperatura zraka s povratno dobo 50 let obdobje 1951-2005. 2005. <http://www.arso.gov.si/vreme/podnebe/karte/karta4020.html> (Pridobljeno 22. 4. 2016.)

[34] Absolutna najvišja temperatura zraka s povratno dobo 50 let obdobje 1951-2005. 2005. http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/image/sl/by_variable/temperature/absolute-max-air-temperature_50-years_51-05.png (Pridobljeno 22. 4. 2016.)

[35] The bitumen industry in Europe, 2016, <http://www.eurobitume.eu/bitumen/what-bitumen> (Pridobljeno 22. 3. 2016.)

[36] Pressure Aging Vessel, 2015, <http://www.pavementinteractive.org/article/dynamic-shear-rheometer/> (Pridobljeno 10. 12. 2015.)

Tehnična dokumentacija ZAG Ljubljana

[37] Ravnikar Turk, M., Ipavec, A. in Bohinc, D., 2014. Poročilo št. P 420/12-760-8 o preiskavah originalnih in laboratorijsko staranih bitumnov tipa B 50/70 prisotnih na slovenskem trgu v letu 2013, Ljubljana, ZAG: loč.pag.

[38] Ravnikar Turk, M., Ipavec, A. in Bohinc, D. 2015. Poročilo ZAG št. P 420/12-760-11 o preiskavah originalnih in laboratorijsko staranih bitumnov tipa PmB prisotnih na slovenskem trgu v letih 2014 in 2015, Ljubljana, ZAG: loč.pag.

[39] Ravnikar Turk, M. in Kmet, M. 2016. Poročilo št. P 692/15-760-86 o preiskavi odpornosti proti razpokam pri nizkih temperaturah z enoosnimi nateznimi preskusi za vzorec asfaltne zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A2, Ljubljana, ZAG: loč.pag.

[40] Kmet, M. 2015. Baza arhivskih podatkov – rezultati preiskav asfaltov glede odpornosti na nizke temperature Laboratorija za asfalte in bitumenske proizvode ZAG Ljubljana. Sporočilo za: Mojca Ravnikar Turk 15. 10. 2015. Osebna komunikacija.

[41] Bohinc, D. 2015 Baza arhivskih podatkov – rezultati preiskav bitumnov Laboratorija za asfalte in bitumenske proizvode ZAG Ljubljana. Sporočilo za: Mojca Ravnikar Turk 13. 11. 2015. Osebna komunikacija.