



**Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny  
w Szczecinie**

**Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska**

**Wpływ rodzaju i ilości lepiszcza na wybrane parametry  
niskotemperaturowe mieszanki mastyksowo-grysowej  
o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA**

Rozprawa doktorska

mgr inż. Bartosz Błażej Budziński

Promotor:

dr hab. inż. Paweł Mieczkowski, prof. ZUT

Szczecin, 2021 r.

**Dla K i F**

# SPIS TREŚCI

<b>SPIS OZNACZEŃ I SKRÓTÓW UŻYTYCH W PRACY</b> .....	<b>6</b>
<b>STRESZCZENIE</b> .....	<b>7</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>9</b>
<b>1. WSTĘP</b> .....	<b>11</b>
1.1. TEMATYKA PRACY .....	11
1.2. PROBLEM NAUKOWY .....	11
1.3. TEZY BADAWCZE.....	12
1.4. CEL PRACY .....	12
1.5. ZAKRES PRACY .....	13
<b>2. PRZEGLĄD LITERATURY</b> .....	<b>14</b>
2.1. KLASYCZNE I INNOWACYJNE MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE STOSOWANE NA OBIEKTACH MOSTOWYCH.....	14
2.1.1. Wymagania stawiane nawierzchniom mostowym.....	14
2.1.2. Klasyczne mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane do warstw ochronnych..	15
2.1.3. Koncepcja mieszanek SMA-MA .....	19
2.1.4. Przykłady zastosowania mieszanek SMA-MA.....	21
2.1.5. Projektowanie składu mieszanki SMA-MA .....	25
2.1.6. Propozycja wymagań dotyczących mieszanek SMA-MA.....	27
2.2. OCENA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH W NISKICH TEMPERATURACH .....	29
2.2.1. Modele reologiczne MMA.....	29
2.2.2. Opis modeli reologicznych użytych w pracy .....	31
2.2.3. Czynniki wpływające na parametry niskotemperaturowe mieszanek mineralno- asfaltowych .....	35
2.2.4. Metody badania MMA w niskich temperaturach .....	37
<b>3. CZĘŚĆ BADAWCZA</b> .....	<b>42</b>
3.1. PLAN BADAŃ .....	42

3.1.1.	Badania podstawowe lepiszczy asfaltowych .....	42
3.1.2.	Badanie mieszanek MMA użyte w pracy .....	43
3.1.3.	Plan badań mieszanek mineralno-asfaltowych .....	48
3.2.	MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE PODDANE BADANIOM .....	50
3.3.	ZASTOSOWANA APARATURA BADAWCZA .....	54
3.4.	PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ .....	55
3.5.	WYBRANE TESTY STATYSTYCZNE WYKORZYSTANE W PRACY .....	59
3.5.1.	Analiza wariancji ANOVA.....	59
3.5.2.	Test W Shapiro -Wilka .....	61
3.5.3.	Test Levene'a.....	62
3.5.4.	Test HSD Tukeya.....	63
3.5.5.	Porównanie nachylenia prostych regresji .....	63
<b>4.</b>	<b>WYNIKI BADAŃ I ANALIZA .....</b>	<b>65</b>
4.1.	BADANIE ROZCIĄGANIA PROSTEGO UTST .....	65
4.2.	BADANIE TSRST.....	68
4.3.	BADANIE PEŁZANIA TCT.....	75
4.3.1.	Określenie parametrów reologicznych MMA na podstawie pełzania .....	75
4.3.2.	Zależność czasu relaksacji od rodzaju lepiszcza w badaniu TCT .....	83
4.3.3.	Zależność czasu relaksacji od zawartości lepiszcza w badaniu TCT .....	89
4.3.4.	Zależność czasu relaksacji w badaniu TCT od temperatury badania .....	92
4.3.5.	Podsumowanie wyników badań w teście TCT .....	94
4.4.	BADANIE RELAKSACJI RT.....	95
4.4.1.	Czas relaksacji w badaniu RT.....	95
4.4.2.	Zależność czasu relaksacji od rodzaju lepiszcza asfaltowego w badaniu RT ....	98
4.4.3.	Zależność czasu relaksacji od zawartości lepiszcza w badaniu RT.....	103
4.4.4.	Zależność czasu relaksacji w badaniu RT od temperatury badania.....	106
4.4.5.	Podsumowanie wyników badań w teście RT .....	108
4.5.	OCENA ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY WYKONYWANYM TESTAMI.....	110

4.5.1.	Zależność czasów relaksacji uzyskanych w testach TCT i RT.....	110
4.5.2.	Zależność między czasem relaksacji w testach TCT i RT i parametrami badania TSRST 112	
4.5.3.	Podsumowanie porównań pomiędzy poszczególnymi testami.....	113
<b>5.</b>	<b>PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....</b>	<b>115</b>
5.1.	WNIOSKI KOŃCOWE .....	115
5.2.	KIERUNEK DALSZYCH BADAŃ.....	115
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>117</b>
	<b>POWOŁANIA NORMATYWNE .....</b>	<b>126</b>
	<b>SPIS RYSUNKÓW .....</b>	<b>127</b>
	<b>SPIS TABEL .....</b>	<b>130</b>

## SPIS OZNACZEŃ I SKRÓTÓW UŻYTYCH W PRACY

TCT – ang. Tensile Creep Test	UCTST – Uniaxial Cyclic Tensile Stress Test
TSRST – ang. Thermal Stress Restrained Speciment Test	$\Delta$ – gradient temperatury w badaniu TSRST
RT – ang. Relaxation Test	$d\varepsilon$ – przyrost odkształcenia w badaniu UTST
MA – ang. Mastic asphalt	$\varepsilon_{failure}$ – odkształcenia graniczne
SMA-MA – mieszanka mastyksowo-grysowa o zwiększonej zawartości mastyksu	$T_{failure}$ – temperatura zniszczenia
$\beta t$ – naprężenia graniczne	$\sigma_{cry,failure}$ – naprężenia przy zniszczeniu
MMA – mieszanka mineralno-asfaltowa	$m$ – masa
LBSK – lateks butadienowo-styreno-karboksyłowy	$\rho_b$ – gęstość objętościowa MMA
PMB – ang. polymer modified bitumen (asfalt modyfikowany polimerami)	$B$ – Zawartość lepiszcza całkowitego
WTS <sub>AIR</sub> – ang. Wheel Tracking Speed	$\rho_{mb}$ – gęstość MMA
PRD <sub>AIR</sub> – ang. Proportional Rut Depth	DTS-30 – serwo-hydrauliczny system badawczy
$V$ – zawartość wolnych przestrzeni	HiMA – ang. Highly Modified Asphalt
ITSR – Indirect tensile strength ratio	UTSST – ang. Uniaxial Thermal Stress-Strain Test
$D$ – spływność lepiszcza	ATCA – ang. Asphalt Thermal Cracking Analyser
$\eta$ – współczynnik lepkości	$t$ – czas
$\varepsilon$ – odkształcenia	$T$ – temperatura
$\sigma$ – naprężenia	$t_r$ – czas relaksacji
BBCT – ang. Bending Beam Creep Test	SCB – ang. Semi-Circular Bending Test
IDT – ang. Indirect Tensile Test	BBR – ang. Beanding Beam Rheometr

## **STRESZCZENIE**

### **Wpływ rodzaju i ilości lepiszcza na wybrane parametry niskotemperaturowe mieszanki mastyksowo-grysowej o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA**

W niniejszej rozprawie doktorskiej podjęto się oceny mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych na obiektach mostowych pod kątem ich odporności na niskie temperatury. W Polsce do warstw ochronnych na obiektach mostowych można stosować zgodnie z zapisami dokumentów technicznych wyłącznie asfalty lane. W ostatnich latach, opracowana w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie innowacyjna mieszanka mastyksowo-grysowa o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA przeznaczona do warstwy ochronnej, pozwala osiągnąć lepsze parametry, skrócić czas związany z wbudowywaniem na obiektach mostowych oraz ułatwić sam etap aplikacji.

Jednym z działań podejmowanych na etapie projektowania i wykonawstwa nawierzchni na obiektach mostowych jest zapewnienie jej bezawaryjnego funkcjonowania w jak najdłuższym okresie. Wiąże się to przede wszystkim z koniecznością ograniczenia wszelkiego rodzaju robót na tego typu obiektach inżynierskich, które mogą w znaczny sposób ograniczyć możliwości przemieszczania się pojazdów samochodowych. Z tego względu warstwy nawierzchniowe powinny być trwale i odporne na uszkodzenia, skutkujące brakiem ciągłości struktury, co może prowadzić do korozji płyty pomostu. Jest to szczególnie istotne w aspekcie charakterystyki pracy płyty obiektu mostowego, narażonej na oddziaływania od ruchu pojazdów oraz oddziaływań klimatyczno-pogodowych.

Ocenie poddano mieszanki stosowane w warstwach ochronnych. Były to przede wszystkim innowacyjne mieszanki mastyksowo-grysowe o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA oraz tradycyjny asfalt lany (MA). Poddano ocenie mieszanki z różnym lepiszczem asfaltowym oraz w przypadku mieszanki SMA-MA dodatkowo o różnej jego zawartości. Przeprowadzono badania w szerokim zakresie temperatur ujemnych wykorzystując kilka, różniących się od siebie testów w schemacie rozciągania prostego. Skupiono się na opisie dwóch parametrów, tj. odporności na spękania niskotemperaturowe oraz relaksacji naprężeń. Odporność na spękania niskotemperaturowe oceniono w teście TSRST (Thermal Stress Restrained Speciment Test). Właściwości reologiczne mieszanek oceniono poprzez czas relaksacji naprężeń w testach

TCT (Tensile Creep Test) oraz RT (Relaxation Test). Do opisu teoretycznego parametrów niskotemperaturowych zastosowano modele reologiczne Burgersa oraz Maxwella. Ocenę w oparciu o testy RT oraz TCT prowadzono dla trzech temperatur:  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ . Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analiz stwierdzono, że kluczowym parametrem wpływającym na zachowanie się mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach jest rodzaj lepiszcza asfaltowego. Udowodniono, że mieszanki mastyksowo-grysowe o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA cechują się lepszymi parametrami niż mieszanki typu asfalt lany. Jest to wynikiem zastosowania znacznie bardziej miękkich asfaltów w przypadku mieszanek SMA-MA. Wpływ zawartości lepiszcza asfaltowego nie został jednoznacznie określony. Na podstawie analiz można stwierdzić, że istnieje optymalna zawartość lepiszcza pod kątem zachowania się mieszanki SMA-MA w niskich temperaturach.



## SUMMARY

### **Effect of the type and amount of binder on certain low-temperature properties of Stone Mastic Asphalt containing an increased amount of bituminous mastic (SMA-MA)**

This doctoral dissertation deals with evaluation of low-temperature resistance of asphalt mixtures designed for construction of bridge pavements. In accordance the Polish guidelines, only mastic asphalts are an acceptable material for construction of protective layers on bridges. In the recent years an innovative SMA mixture for this application was developed at the West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland, referred to by the acronym SMA-MA, which contained an increased amount of bituminous mastic. Its advantages include better performance parameters, faster placement on bridges and easier application.

One of the challenges during design and construction of bridge pavements is to ensure problem free operation for as long as possible. For obvious reasons, it is of primary importance to minimise, as far as practicable, any works that could significantly disrupt traffic carried by such bridges. For this reason, surface courses designed for bridges must feature superb durability and resistance to damage to ensure continuity of protection of the bridge deck from corrosion. The specific exposure conditions, including traffic loading and harsh weather make it an even more important issue.

The material under analysis were mixtures designed for construction of protective layers. Generally these were innovative SMA mixtures containing a higher amount of mastic, referred to by the acronym SMA-MA and a conventional mastic asphalt (MA). The test specimens contained different types and, in the case of SMA-MA, also different amounts of bituminous binders. The specimens were subjected to a wide range of temperatures below freezing, applied in a few different uniaxial tension tests. The focus was on describing two parameters: resistance to low-temperature cracking and stress relaxation ability. The Stress Restrained Specimen Test (TSRST) was used to determine the first of them. Rheological properties were determined by measuring stress relaxation times in the Tensile Creep Test (TCT) and Relaxation Test (RT). Maxwell and Burgers models were used for theoretical description of the low-temperature properties under analysis. The evaluation based on the results of RT and TCT tests was performed for three temperatures:  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ . The test results and analyses led to the

conclusion that the type of bituminous binder is the primary factor determining the low-temperature performance of the asphalt mixtures under analysis. Generally these were innovative SMA mixes containing a higher amount of mastic, referred to by the acronym SMA-MA and a conventional mastic asphalt (MA) mixture. This is due to much softer bitumens used in SMA-MA mixes. On the other hand, the effect of the amount of bitumen has not been determined definitely. The analysis performed as part of this research allow us to conclude that there is an optimum content of bitumen in terms of low-temperature performance of SMA-MA mixtures.

# **1. WSTĘP**

## **1.1. TEMATYKA PRACY**

Rozbudowa infrastruktury drogowej oraz remonty istniejących dróg przyczyniają się do rozwoju techniki drogowej. Technika drogowa napędzana jest w głównej mierze potrzebą znalezienia rozwiązań tańszych, szybszych w realizacji i przyjaznych środowisku. Nie inaczej sytuacja wygląda w przypadku obiektów mostowych. Na obiektach mostowych dodatkowym czynnikiem, który należy uwzględnić, jest trwałość nawierzchni. Powinna być ona jak największa, a wszelkie konieczne remonty powinny być przeprowadzane możliwie w jak najkrótszym czasie. Wyłączenie obiektu z eksploatacji, nawet na krótki okres, może prowadzić do paraliżu układu drogowego miasta, regionu, a w przypadku autostrad i dróg ekspresowych ponadnarodowych korytarzy transportowych.

Niniejsza rozprawa porusza zagadnienia związane z warstwami ochronnymi obiektów mostowych, które są częścią nawierzchni drogowej. Zabezpieczają one warstwę hydroizolacji przed wszelkiego rodzaju uszkodzeniami mechanicznymi (na etapie realizacji), a w trakcie użytkowania obiektu stanowią dodatkową warstwę hydroizolacyjną, zapewniającą ciągłość struktury w całym okresie użytkowania. Z tego względu muszą to być mieszanki o niestandardowych właściwościach w zakresie rozpraszania naprężeń (przede wszystkim w niskich, ujemnych temperaturach), zapewniających jednocześnie odporność na deformacje trwałe w okresie letnim. Rozprawa obejmuje swoim zakresem zagadnienia wykorzystania innowacyjnych mieszanek mastykowo-grysowych o zwiększonej zawartości mastyksu (SMA-MA), stosowanych do warstw ochronnych obiektów mostowych. Pozwalają one na skrócenie czasu realizacji budowy nowych i remontów już istniejących obiektów mostowych przy zapewnieniu odpowiedniej trwałości. W pracy skupiono się na ocenie i porównaniu parametrów niskotemperaturowych mieszanek mastykowo-grysowych o zwiększonej zawartości mastyksu (SMA-MA) w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz jego ilości. Przeprowadzono również analizę porównawczą mieszanek SMA-MA z asfaltem lanym pod kątem ich odporności na działanie niskich temperatur.

## **1.2. PROBLEM NAUKOWY**

Mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane na obiektach mostowych do warstwy ochronnej to w głównej mierze asfalt lany. Do ich produkcji wykorzystuje się głównie lepiszcza asfaltowe o niskiej penetracji. Przekłada się to między innymi na ryzyko powstawania uszkodzeń w niskich (ujemnych) temperaturach. W pracy poruszono problem wpływu

oddziaływania niskich temperatur na innowacyjną mieszankę mastykowo-grysową o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA w porównaniu do tradycyjnego asfaltu lanego. W przypadku nawierzchni mostowych istnieje potrzeba odmiennego podejścia do projektowania konstrukcji w stosunku do nawierzchni wykonywanych poza obiektem. Wpływ niskich temperatur w połączeniu z odkształceniami samego obiektu mostowego przyczynić może się negatywnie na trwałość nawierzchni mostowej.

W pracy określono cechy niskotemperaturowe mieszanek wykonywanych zarówno w laboratorium jak i w wytwórni mas bitumicznych. W pracy przyjęto, że badania będą prowadzone w przedziale  $-10$  do  $-25^{\circ}\text{C}$  (skrajnie do  $-40^{\circ}\text{C}$ ). Przyjęcie takich temperatur symuluje zarówno mroźne zimy jak i sytuacje ekstremalne, które mogą prowadzić do uszkodzenia nawierzchni, nawet przy jednokrotnym wystąpieniu ekstremalnego zjawiska pogodowego (pęknięcia niskotemperaturowe). W pracy, skupiono się na oznaczeniu czasu relaksacji naprężeń oraz wzroście naprężeń powstających w wyniku skurczu materiału w badaniu TSRST.

### **1.3. TEZY BADAWCZE**

W oparciu o przegląd literatury oraz doświadczenia własne sformułowano dwie tezy badawcze:

- TEZA 1:** Rodzaj lepiszcza asfaltowego istotnie wpływa na parametry reologiczne mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do warstw ochronnych.
- TEZA 2:** Mieszanka mastykowo-grysowa o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA jest mieszanką o większej odporności na uszkodzenia indukowane termicznie w stosunku do klasycznych asfaltów lanych stosowanych do warstwy ochronnej nawierzchni mostowych.

### **1.4. CEL PRACY**

Celem rozprawy doktorskiej jest określenie wpływu ilości, a w szczególności rodzaju lepiszcza asfaltowego w mieszankach mineralno-asfaltowych stosowanych na obiektach mostowych na ich odporność na niskie temperatury. Celem pośrednim jest porównanie mieszanek SMA-MA i asfaltów lanych (MA) w kontekście odporności na działanie niskich temperatur.

## 1.5. ZAKRES PRACY

Zakres pracy doktorskiej obejmuje:

1. przegląd literatury zagranicznej i krajowej w zakresie m. in. nawierzchni asfaltowych na obiektach mostowych, w szczególności w aspekcie warstw ochronnych, modeli reologicznych opisujących zachowanie się mieszanek mineralno-asfaltowych oraz sposobie oceny mieszanek mineralno-asfaltowych w ujemnych temperaturach;
2. oznaczenie podstawowych parametrów lepiszczy asfaltowych, użytych do wykonania próbek SMA-MA;
3. opracowanie recepty bazowej mieszanki SMA-MA 8 z asfaltem drogowym PMB 45/80-65 i przygotowanie próbek, które poddano badaniom;
4. przygotowanie próbek laboratoryjnych mieszanek SMA-MA z innymi rodzajami asfaltu (50/70, HiMA 65/105-80) i zróżnicowaną zawartością lepiszcza PMB 45/8-65 (z rozrzutem  $\pm 0,5\%$ );
5. pozyskanie mieszanki asfaltu lanego wytworzonego w skali technicznej (Wytwórnia mieszanek mineralno-asfaltowych – WMB) i wykonanie próbek;
6. wykonanie badań mieszanek mineralno-asfaltowych w schemacie rozciągania prostego,
7. wykonanie analiz, testów statystycznych w oparciu o uzyskane wyniki badań;
8. sformułowanie podsumowania i wniosków;
9. przygotowanie niniejszej rozprawy.

## **2. PRZEGLĄD LITERATURY**

### **2.1. KLASYCZNE I INNOWACYJNE MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE STOSOWANE NA OBIEKTACH MOSTOWYCH**

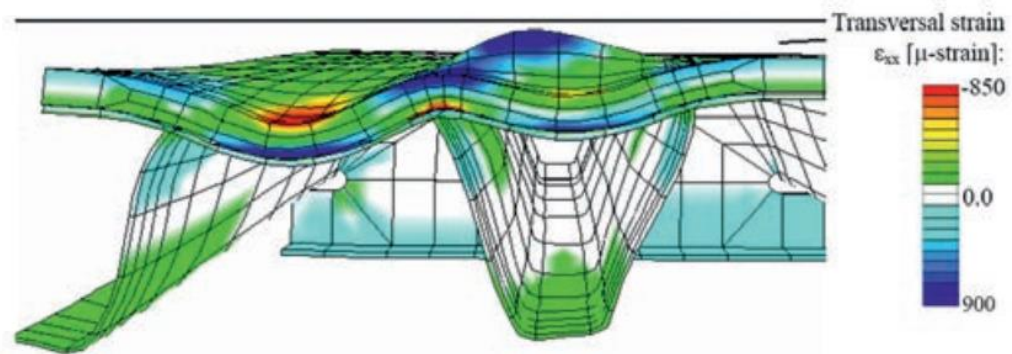
#### **2.1.1. Wymagania stawiane nawierzchniom mostowym**

Nawierzchnie mostowe pracują w inny sposób niż typowe nawierzchnie na podłożu gruntowym. W odniesieniu do nawierzchni wykonywanych poza obiektami mostowymi istnieje szereg kryteriów projektowych, pozwalających na wymiarowanie konstrukcji nawierzchni w sposób optymalny [1–3]. W przypadku nawierzchni mostowych brak jest jednoznacznych kryteriów projektowych [4,5], a klasyczne metody projektowania okazują się nieodpowiednie dla tego typu zastosowań [6]. Rzeczywista trwałość nawierzchni mostowych okazuje się niższa [7] niż nawierzchni prowadzonych poza obiektem. Metody projektowania stosowane obecnie uwzględniają zmęczenie nawierzchni wywołane ruchem drogowym pomijając zmęczenie termiczne [8]. Również projektanci obiektów mostowych nie podchodzą do problemu trwałości nawierzchni mostowych w odpowiedni sposób, skupiając się głównie na aspektach konstrukcyjnych i nośności samego obiektu mostowego. Na obiektach są szczególne warunki obciążenia [9,10], które nie występują w konstrukcjach na podłożu gruntowym. Są to m.in. możliwe duże amplitudy odkształceń pionowych (od obciążeń pojazdami) i poziomych (od wahań temperatur), jak również drgania samego obiektu. Do głównych funkcji nawierzchni mostowych można zaliczyć [11–14]:

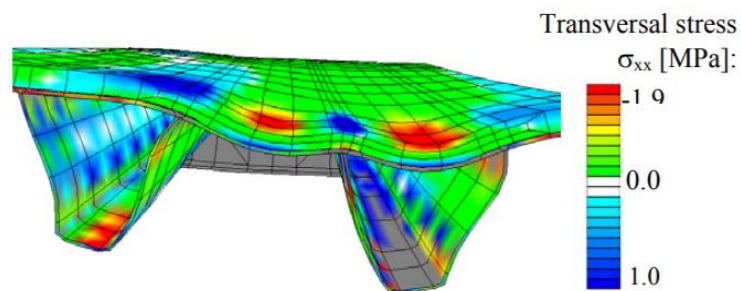
- rozkładanie obciążenia na płytę pomostu,
- tłumienie efektów dynamicznych od obciążeń ruchowych,
- przejmowanie odkształceń płyty pomostu wywołanych zmianami temperatury w przedziale od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+70^{\circ}\text{C}$ ,
- zapewnienie odpowiedniej szczepności międzywarstwowej, w tym wytrzymałości na odrywanie warstw hydroizolacji od płyty pomostu,
- zapewnienie równości, szczelności, szorstkości, odporności na ścieranie, wpływy reologiczne i powstawanie kolein,
- ograniczenie wrażliwości mieszanek mineralno-asfaltowych na wpływ niskich i wysokich temperatur.

Nawierzchnie mostowe wykonywane są w głównej mierze jako nawierzchnie asfaltowe, z reguły o dwóch warstwach z mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA). W przypadku nawierzchni na obiektach betonowych odkształcenia i naprężenia nie przekraczają tych notowanych na drogach w naziomiu [15]. Inne efekty obserwuje się na obiektach stalowych

z płytą ortotropową, gdzie odkształcenia i naprężenia są znacznie większe, osiągające wartości rzędu  $850 \mu\epsilon$  [14–18]. Rozkład odkształceń w stalowej płycie pomostu przedstawiono na Rys. 2-1, natomiast rozkład naprężeń w stalowej płycie pomostu przedstawiono na Rys. 2-2. Płyty ortotropowe wybierane są często do realizacji ze względu na swoją niższą masę, szczególnie przy obiektach o dużej rozpiętości [14,17]



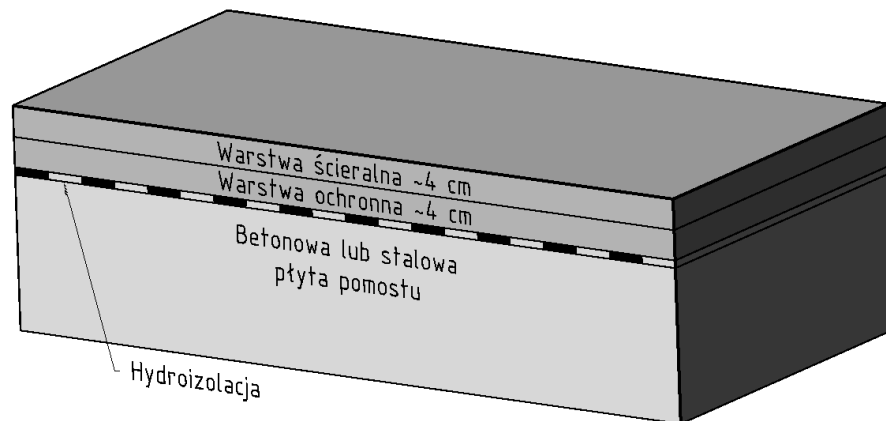
Rys. 2-1 Odkształcenia stalowej płyty ortotropowej pomostu pod obciążeniem 14,5-tonowej osi z kołami bliźniaczymi [19]



Rys. 2-2 Naprężenia stalowej płyty ortotropowej pomostu pod obciążeniem 14,5-tonowej osi z kołami bliźniaczymi [19]

### 2.1.2. Klasyczne mieszanki mineralno-asfaltowe stosowane do warstw ochronnych

W Polsce stosowano różne rozwiązania w zakresie nawierzchni mostowych [20,21]. Na chwilę obecną na obiektach mostowych wykorzystuje się głównie materiały związane lepiszczem asfaltowym [4,10,21,22]. Tradycyjna nawierzchnia na obiektach mostowych składa się najczęściej z warstwy hydroizolacyjnej, ochronnej (wiążącej) i ścieralnej (Rys. 2-3).



Rys. 2-3 Typowy układ warstw konstrukcji nawierzchni na obiekcie mostowym

Hydroizolacja stanowi istotną część nawierzchni mostowej i powinna [23–25]:

- być nieprzepuszczalna dla wody, pary wodnej i gazów;
- być odporna na działanie substancji chemicznych związanych z eksploatacją i utrzymaniem dróg;
- mieć gładką powierzchnię ułatwiającą spływ wody i wtopioną w lepiszcze osnowę wzmacniającą (jeśli wzmocnienie jest przewidziane);
- być wykonywana z materiałów o zbliżonych współczynnikach rozszerzalności cieplnej jak płyta pomostu;
- charakteryzować się elastycznością w szerokim zakresie temperatur (od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+60^{\circ}\text{C}$ );
- dobrze przylegać do podłoża oraz gwarantować dobre połączenie z warstwą ochronną lub warstwą wierzchnią (w przypadku nawierzchni jednowarstwowych);
- być odporna na uszkodzenia mechaniczne i temperaturę wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej stosowanej do warstwy ochronnej (rzędu  $160\text{--}240^{\circ}\text{C}$ ).

Warstwa hydroizolacyjna powinna mieć grubość co najmniej 5 mm w przypadku izolacji arkuszowych i co najmniej 2 mm w przypadku izolacji powłokowych (natryskowych) [11].

Najczęściej stosowanym materiałem hydroizolacyjnym w Polsce na obiektach mostowych były papy termozgrzewalne [26]. Stosowanie pap niesie ze sobą pewne ryzyka, które związane są między innymi z ich aplikacją (i połączeniem z podłożem) oraz procesem wbudowywania asfaltu lanego. Można do nich zaliczyć [27–29]:

- możliwość przepalenia papy termozgrzewalnej w trakcie jej aplikowania (ogrzewanie palnikiem gazowym warstwy spodniej papy – temperatura spalania gazów wynosi ok.  $700^{\circ}\text{C}$  do nawet  $1400^{\circ}\text{C}$ );



- powstawanie wybrzuszeń podczas układania warstwy ochronnej wskutek miejscowego braku szczepności podłoża z papą i wzrostu ciśnienia parcjalnego powietrza w pustkach;
- zniszczenie papy (degradacja strukturalna).

Obecnie, coraz częściej hydroizolację wykonuje się w technologii natryskowej, np. z metakrylanu metylu [30].

Do warstwy ścieralnej na obiektach mostowych stosuje się (zgodnie z polskimi wytycznymi WT-2:2014 [31]) beton asfaltowy AC S, asfalt lany MA, mastyks grysowy SMA, mieszanki o nieciąglym uziarnieniu BBTM. Wymagania w stosunku do tych warstw są takie same, jak w przypadku nawierzchni posadowionych na podłożu gruntowym.

Zgodnie z zapisami dokumentu technicznego WT-2:2014 do warstw ochronnych można stosować wyłącznie asfalt lany MA [31]. Asfalt lany jest znany na świecie od ponad 100 lat [32,33] i dość szeroko stosowany [34–36]. Pierwsze prace nad asfaltem lanym i jego zastosowaniem datuje się na początek XX wieku, praktycznie równocześnie w Anglii i Francji [37]. W Europie wymagania dotyczące asfaltu lanego zawarte są w normie EN 13108-6 [N1]. W każdym kraju opracowywane są wytyczne na podstawie tej normy, stanowiące lokalne wymagania odnośnie MA.

Parametry wytrzymałościowe asfaltów lanych są efektem przede wszystkim bardzo dużej lepkości (kohezji) części mastyksowej (mieszaniny lepiszcza, wypełniacza i drobnego piasku). W celu zwiększenia kohezji mastyksu często wykorzystuje się twarde asfalty drogowe, charakteryzujące się niską penetracją i wysoką lepkością (kohezją) w zakresie temperatur eksploatacyjnych. Wadą tego typu rozwiązania może być podatność asfaltu lanego na pękanie w zakresie niskich temperatur. Z tego względu w okresie ostatnich kilkunastu lat coraz częściej do asfaltów lanych wykorzystuje się asfalty modyfikowane polimerami, które są znacznie bardziej odporne na tego typu zjawiska (bardziej miękkie asfalty bazowe). Asfalty modyfikowane są jednak wrażliwe na wysokie temperatury (powyżej 180-190°C) ze względu na możliwość degradacji polimeru [34,38]. To wymusza obniżenie temperatur produkcji asfaltów lanych z asfaltem modyfikowanym polimerami poprzez zastosowanie dodatków obniżających lepkość (np. woski F-T, woski Montana itp.) [39,40]. Dodatek wosku może przekładać się na pogorszenie parametrów niskotemperaturowych MA [41,42], wynikiem czego jest między innymi wzrost temperatury pęknięcia nawet o 5°C, oznaczonej w badaniu TSRST.

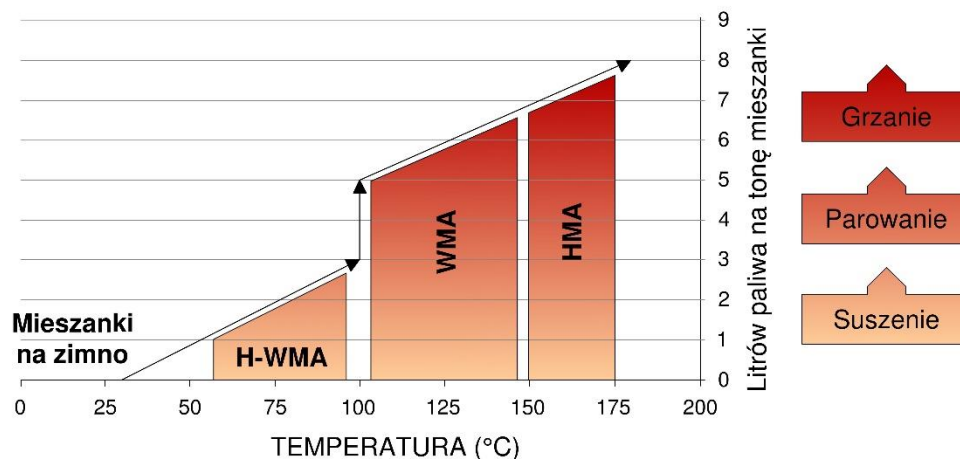
Mieszanka typu asfalt lany, obok niezaprzeczalnych zalet (samozagęszczalność, szczelność, żywotność), posiada również wady, do których można zaliczyć [43–47]:

- konieczność stosowania specjalistycznych układarek i środków transportu, co przy ograniczonej liczbie sztuk tego sprzętu oraz wydajności produkcji znacznie wydłuża czas trwania procesu inwestycyjnego w stosunku do rozwiązań na bazie typowych mieszanek mineralno-asfaltowych;
- wytwarzanie MA wymaga stosowania wysokich temperatur, co wpływa negatywnie na środowisko naturalne, a także zwiększa ryzyko przegrzania lepiszcza asfaltowego;
- stosowanie warstwy z asfaltu lanego może prowadzić na skutek skurczu materiału do powstawania spękań (podłużnych i poprzecznych) i rozwarstwień, szczególnie przy znacznych różnicach temperatur powietrza oraz braku możliwości wbudowywania mieszanki całą szerokością jezdni (z tzw. szwem technologicznym podłużnym);
- brak możliwości kontroli składu MA bezpośrednio po jego wyprodukowaniu ze względu na niejednorodność mieszanki (jest to związane m.in. z brakiem systemów podgrzewania wypełniaczy w wytwórniach mieszanek bitumicznych).

Ze względu na wysoką temperaturę wbudowywania asfaltu lanego rośnie ryzyko powstania pęcherzy [48–50] na układanej warstwie wskutek wzrostu ciśnienia w pustkach oraz małej adhezji pomiędzy podłożem (płytą pomostu) i warstwą hydroizolacji [51,52]. Wzrost temperatury wywołuje zwiększenie przede wszystkim ciśnienia pary wodnej i w niewielkim stopniu ciśnienia suchego powietrza. Znaczne wzrosty ciśnienia pary wodnej zauważalne są powyżej temperatury 100°C [43]. Dodatkowo, izolacje arkuszowe nie są odporne na przegrzanie. Papy po wygrzewaniu w temperaturze 200°C ulegają uszkodzeniom, a w wyższej temperaturze wygrzewania następuje ich całkowita degradacja strukturalna [29].

Wysoka temperatura ma również negatywny wpływ na pracowników brygad bitumicznych. Wiąże się to ze zwiększonym wydzielaniem kancerogennych oparów, pochodzących z lepiszcza asfaltowego [53,54] (w szczególności w trakcie wykonywania nawierzchni w tunelach). Wśród robotników pracujących przy układaniu szczególnie asfaltu lanego ryzyko raka płuc jest trzykrotnie większe w stosunku do ogółu społeczeństwa [55]. Z tego też względu należy poszukiwać rozwiązań obniżających temperaturę wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych [56,57].

Każda redukcja temperatury produkcji MMA przekłada się na zmniejszenie śladu węglowego oraz zmniejszenie energochłonności procesu [58] (Rys. 2-4). Ponadto zmniejsza się ilość oparów i gazów cieplarnianych emitowanych do atmosfery [59,60], w skrajnych przypadkach każde obniżenie o 11-12°C zmniejsza dwukrotnie ilość wycieków i gazów cieplarnianych [61].

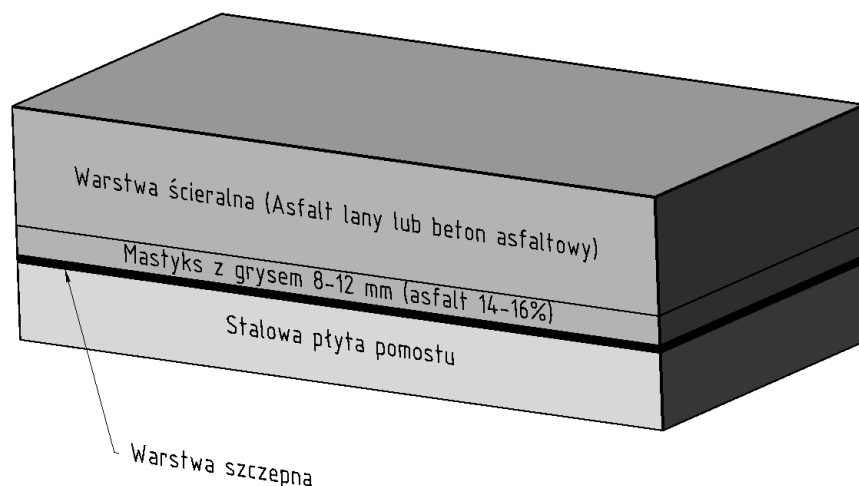


Rys. 2-4 Porównanie procesu energochłonności różnych technologii produkcji MMA [62,63]

Obniżenie temperatury wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych jest szczególnie istotne również w przypadku obiektów mostowych z płytą ortotropową. Wysoka temperatura wbudowywania nawierzchni oddziałuje negatywnie na połączenia stalowe, powodując powstanie naprężeń, a także przyczynia się do szybszego zmęczenia stalowej konstrukcji pomostu [64,65].

### 2.1.3. Koncepcja mieszanek SMA-MA

W latach 90 XX w. na Politechnice Szczecińskiej (obecnie ZUT) podjęto próby zastosowania nowej mieszanki, która zapewniłaby funkcjonalność i trwałość nawierzchni obiektów mostowych [66]. Opracowano wtedy koncepcje mieszanki mastyksowo-grysowej o zwiększonej zawartości lepiszcza asfaltowego i wypełniacza (SMA-MA) [67]. Mieszanki te należy uznać za rozwinięcie niemieckiej technologii z lat 60/70-tych XX wieku. Stosch [49] przedstawił 5 konstrukcji typowych stosowanych na obiektach mostowych z płytą stalową. Do warstwy ochronnej, pełniącej jednocześnie funkcję warstwy hydroizolacyjnej, Stosch zaproponował między innymi mastyks stabilizowany grysem wbudowany na specjalnej warstwie szepnej, zabezpieczającej płytę przed korozją (Rys. 2-5).



Rys. 2-5 Konstrukcja o warstwie z mastyksu na powłoce wiążącej wg Stoscha

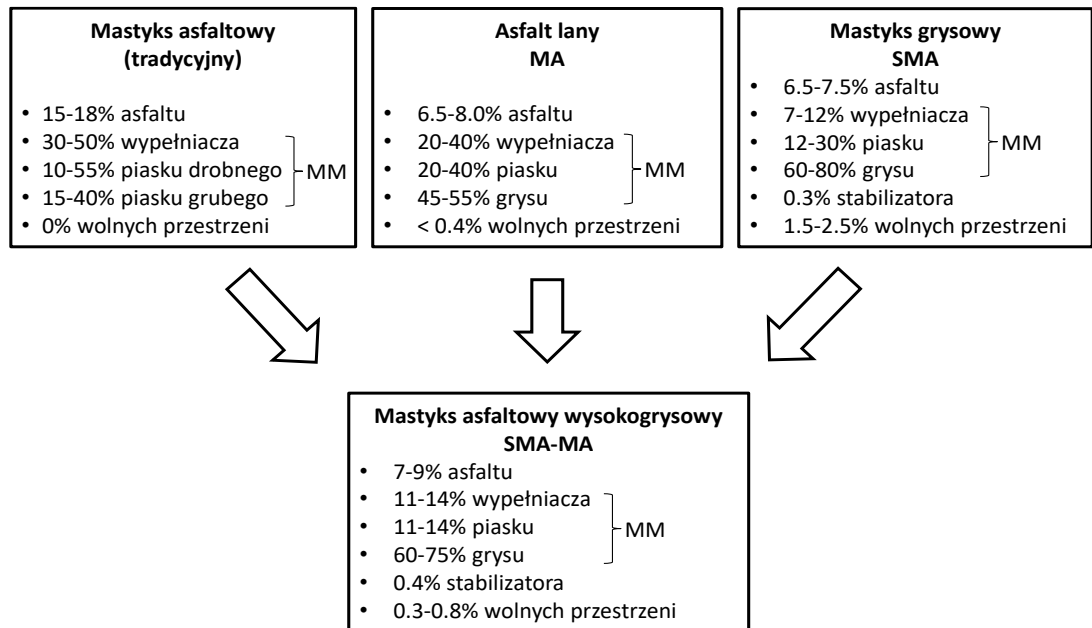
Mastyks izolacyjny jest materiałem, w którego skład wchodzi około 14-16% lepiszcza oraz wypełniacz i piasek. Charakteryzuje się on dobrymi właściwościami izolacyjnymi, jednak brak mu odpowiedniej odporności na deformacje trwałe. Z tego względu zastosowano dodatek frakcji grysów o uziarnieniu #8/12 mm, który miał zapewnić wzrost odporności na odkształcenia lepkoplastyczne od obciążeń od kół pojazdów samochodowych.

Obecnie, poziom oddziaływań od pojazdów samochodowych na nawierzchnię znacznie się zwiększył. Mając to na uwadze rozwiązania stosowane w latach 60/70-tych XX wieku mogą skutkować powstawaniem deformacji trwałych, co przy obiektach mostowych ze względu na bezpieczeństwo i znaczne utrudnienia w ruchu (w przypadku remontów) nie powinno mieć miejsca. Rozwiązywaniem tego problemu mogą być mieszanki typu SMA-MA. Głównymi zaletami technicznymi mieszanek SMA-MA są między innymi [67,68]:

- możliwość wykorzystania klasycznych rozkładarek MMA,
- zakres temperatur technologicznych nie odbiega od typowych dla betonów asfaltowych AC czy mieszanek SMA (niższych niż w przypadku asfaltów lanych od 40-60°C),
- mniejsze ryzyko przegrzania lepiszcza w trakcie wbudowywania,
- wysoka szczelność warstwy,
- odporność na zmęczenie dzięki zastosowaniu zwiększonej zawartości asfaltu (głównie modyfikowanego) o średniej penetracji.

Mieszanki SMA-MA łączą korzystne cechy mastyksu, asfaltu lanego oraz typowych mieszanek mastykowo-grysowych SMA. Można to przedstawić graficznie (Rys. 2-6). Dzięki temu otrzymuje się materiał szczelny i elastyczny, a do tego odporny na deformacje trwałe [67,69] o dobrych parametrach reologicznych, szczególnie w niskich temperaturach

[70]. Mieszanki tego typu, dzięki znacznemu udziałowi frakcji grysowych, pozwalają na wprowadzenie do lepiscza (a tym samym i do jego mieszaniny z kruszywem) znacznej ilości polimeru. Jego zwiększony udział poprawia właściwości sprężysto-elastyczne warstwy, redukując wpływ naprężeń rozciągających i ścinających wywołanych zmianą temperatury oraz ruchem [66]. Grubość warstw waha się od 1,5 cm do 3,5 cm (maksymalnie 4,0 cm), a zalecane uziarnienia to 5 lub 8 mm (w wyjątkowych sytuacjach dla warstwy o grubości 4.0 cm można zastosować uziarnienie do 11 mm).

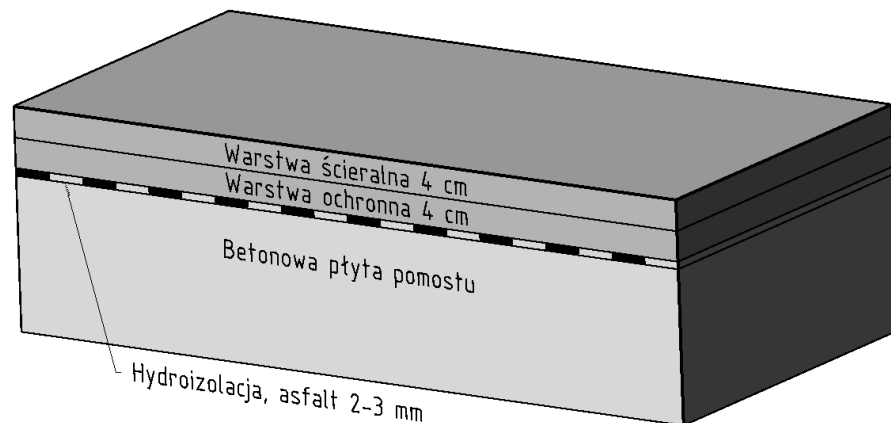


Rys. 2-6 Koncepcja mieszanek SMA-MA [71]

#### 2.1.4. Przykłady zastosowania mieszanek SMA-MA

Mieszanki SMA-MA na chwilę obecną znalazły zastosowanie głównie na terenie województwa zachodniopomorskiego [43], ale również podjęto próby wdrożenia tej technologii na moście Grota Roweckiego w Warszawie (niestety z niepowodzeniem ze względu na obawy Nadzoru Technicznego) [72]. Jedną z pierwszych udanych realizacji był remont mostu Cłowego w Szczecinie w 1998 roku [66,73,74]. Zrezygnowano wtedy z tradycyjnej izolacji z papy termozgrzewalnej na rzecz warstwy powłokowej z asfaltu drogowego (rozłożonej metodą natryskową) grubości ok. 2-3 mm, stanowiącej hydroizolację płyty pomostu. Zabezpieczono tą warstwę typową mieszanką mastyksowo-grysową SMA, ale o podwyższonej zawartości asfaltu drogowego 50/70 (modyfikowanego polimerem). Pozwoliło to obniżyć zawartość wolnych przestrzeni do poziomu około 0,5%. Frakcja grysowa stanowiła około 70% zawartości. Asfalt drogowy 50/70 został zmodyfikowany podczas produkcji mieszanki na Wytwórni Mas Bitumicznych lateksem butadieno-styreno-

karboksylowym (LBSK 4555). Modyfikacja pełniła dodatkową funkcję, tj. stabilizowała lepizzcze na powierzchni ziarn kruszywa, ograniczając jego spływność. Grubość warstwy wynosiła 4 cm (Rys. 2-7). Zagęszczanie warstwy SMA prowadzono do momentu, w którym na powierzchnię zostało wyciśnięte lepizzcze (mastyks). Wbudowana mieszanka SMA stanowiła warstwę ochronną dla powłoki z lepizzcza asfaltowego (warstwy szepno-hydroizolacyjnej). Wierzchnią warstwę (ścieralną) stanowił beton asfaltowy o grubości 4 cm. Łączna grubość warstw nawierzchni wyniosła 8 cm. Tak wykonana nawierzchnia mostowa była z powodzeniem użytkowana do 2016 roku, kiedy to obiekt mostowy został rozebrany na skutek awarii przęsła (uszkodzenie elementów sprężających płytę pomostu) [75].



Rys. 2-7 Wykonana konstrukcja nawierzchni na Moście Cłowym w Szczecinie (realizacja w roku 1998)

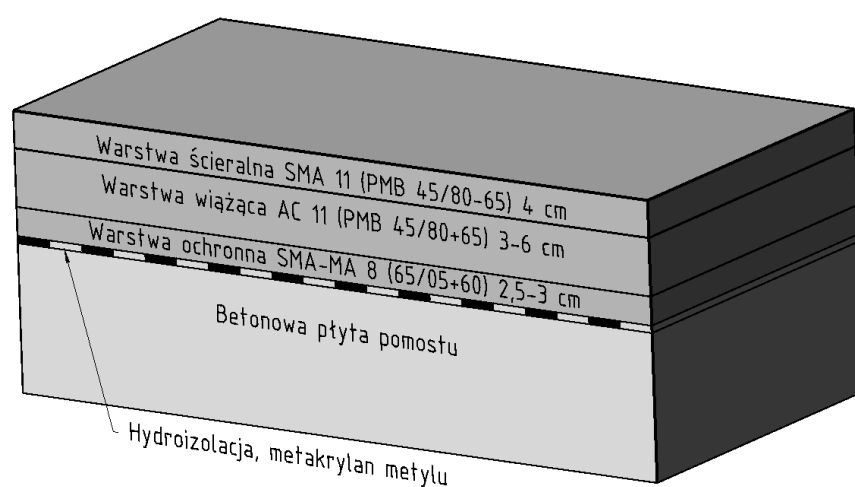
W końcu lat 90 XX wieku na Politechnice Szczecińskiej (obecnie ZUT) prowadzone były badania nad mieszanką do warstw ochronnych (SMA-MA). Skutkiem tego były zmiany polegające na ograniczeniu zawartości piasku łamanego i zwiększeniu ilości wypełniacza oraz lepizzcza (mastyksu). Przy projektowaniu mieszanek tego typu dużą uwagę poświęcano podatności na zagęszczenie, co znalazło się w późniejszych wymaganiach odnośnie składu i zawartości wolnej przestrzeni w próbkach formowanych przy obniżonej energii zagęszczania.

Inne przykłady zastosowania mieszanki SMA-MA na przestrzeni lat to między innymi: most długi w Szczecinie (realizacja 2000 r.), wiadukt akademicki w Szczecinie (2001 r.), wiadukt drogowy w Policach (realizacja 2013 r.), wiadukt drogowy nad drogą S3 (węzeł Tczewska – realizacja 2014 r.), Most nad rzeką Dzierżęcinką w Koszalinie (2014 r.).

Jedną z większych inwestycji ostatnich lat, na której zastosowano mieszankę SMA-MA, był remont arterii łączącej lewobrzeżną i prawobrzeżną część Szczecina (zwanej Trasą Zamkową). W latach 2017-2018 dokonano kompleksowego remontu nitki wjazdowej do miasta. Nitka ta składa się z dwóch mostów nad rzeką Odrą i Parnicą oraz wiaduktu nad wyspą

Łasztownia [76]. Jednym z elementów poddanych przebudowie była nawierzchnia asfaltowa. Po 30 latach eksploatacji (rok budowy 1987) nawierzchnia była w bardzo złym stanie i wymagała kompleksowej odbudowy. Stary układ warstw na obiekcie składał się z jednej warstwy typowego mastyksu i dwóch warstw betonu asfaltowego o uziarnieniu do 11 mm. Mając na uwadze zakres prac, a także brak możliwości wyłączenia nawierzchni z eksploatacji na dłuższy czas, podjęto decyzję o zastosowaniu innowacyjnego rozwiązania jakim jest mieszanka SMA-MA. Zakres prac bitumicznych obejmował wykonanie nowej nawierzchni na długości 1818 m na 3-4 pasach ruchu.

Zaprojektowana konstrukcja składała się z 3 warstw asfaltowych (Rys. 2-8) [77], ułożonych na hydroizolacji wykonanej z płynnej żywicy (metakrylanu metylu), aplikowanej metodą natryskową na odpowiednio przygotowanym podłożu (wypiaszkowana i oczyszczona płyta betonowa). Zabezpieczeniem hydroizolacji była warstwa mastyksu grysowego SMA-MA 8 o grubości 2,5-3,0 cm. Do wyrównania niwelety płyty pomostu zastosowano beton asfaltowy do warstwy ścieralnej AC 11 S PmB 45/80-65, wbudowany w warstwie o grubości od 3,0 cm do 6,0 cm. Warstwą ścieralną była wykonana w technologii standardowego mastyksu grysowego SMA 11 PmB 45/80-65. Grubość warstwy ścieralnej wynosiła 4 cm.



Rys. 2-8 Konstrukcja nawierzchni na obiekcie mostowym „Trasa Zamkowa”

Warstwę ochronną wykonano z mieszanki SMA-MA 8. Zastosowano asfalt modyfikowany polimerami PmB 65/105-60 (zgodnie z PN-EN 14023:2011 [N2]) w ilości 9,1% (m/m). Rozkładano ją klasycznymi rozściełaczami wykorzystywanymi przy wbudowywaniu MMA. Prace były wykonywane etapami (kolejne pasy ruchu) ze względu na konieczność zapewnienia ruchu na obiekcie mostowym (Rys. 2-9). Do zagęszczania stosowano walce stalowe, które poruszały się do momentu wyciśnięcia mastyksu (Rys. 2-10). Uzyskiwano to po 2-3 przejściach walca pracującego statycznie (bez włączonej oscylacji). Miejsca połączeń

technologicznych (w kierunku poprzecznym i podłużnym) zabezpieczano specjalną taśmą bitumiczną (mineralno-asfaltowo-kauczukową). Kilku a w niektórych przypadkach kilkunastoletnia obserwacja obiektów mostowych z warstwami ochronnymi z mieszanki SMA-MA nie wykazała istnienia uszkodzeń nawierzchni na obiekcie.



Rys. 2-9 Wbudowywanie warstwy ochronnej z mieszanki mastksowo-grysowej o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA 8 PmB 65/105-60



Rys. 2-10 Warstwa SMA-MA 8 PmB 65/105-60 po zagęszczeniu (widoczny wyciśnięty mastyks)



### 2.1.5. Projektowanie składu mieszanki SMA-MA

Mieszanki mineralno-asfaltowe SMA-MA powinny łączyć w sobie cechy mieszanek o rozbudowanym szkielecie mineralnym (zbliżonym do typu kontaktowego) i mastyksów, czyli drobnoziarnistych mieszanek z podwyższoną ilością lepiszcza i wypełniacza. Teoretycznie powinno to zapewnić mieszance odpowiednią odporność na deformacje trwałe (duży kąt tarcia wewnętrznego szkieletu – frakcji grysowych) oraz szczelność. Są to podstawowe cechy stawiane mieszankom mineralno-asfaltowym do warstwy ochronnej na obiekcie mostowym. Wbudowywanie mieszanek mineralno-asfaltowych na płycie obiektu mostowego jest specyficzne ze względu na etap jej zagęszczania. Standardowo, celem poprawy efektywności zagęszczania walce stalowe wykorzystują wibracje, dostosowane pod względem częstotliwości i amplitudy do rodzaju mieszanki i grubości warstwy. Ułatwia to przemieszczanie się i zbliżanie ziaren między sobą oraz usuwanie powietrza ze struktury mieszanki mineralno-asfaltowej. W przypadku obiektów mostowych korzystanie z tego rodzaju rozwiązań jest bardzo ograniczone bądź też niemożliwe do wykorzystania ze względu na możliwość wystąpienia rezonansu płyty pomostu. W technice drogowej stosuje się również walce wykorzystujące oscylację w procesie zagęszczania. Ten rodzaj drgań można stosować na obiektach mostowych, przy czym dostępność walców oscylacyjnych jest bardzo ograniczona. Podobnie jest z walcami stalowymi trójbęnowymi (statycznymi), dedykowanymi do mieszanek SMA. Ich efektywność zagęszczania uzyskiwana jest dzięki bardzo dużym naciskom na tworzącą, dwukrotnie przewyższającym naciski występujące w walcach stalowych dwubębnowych (pracujących bez wibracji). Należy również zaznaczyć, że warstwy ochronne są wbudowywane w cienkich warstwach (2-3 cm), co znacząco skraca czas zagęszczania (szybkie wychładzanie), szczególnie przy specyficznych warunkach usytuowania płyt obiektów mostowych.

Ograniczona efektywność zagęszczania za pomocą walców była jednym z czynników (obok odporności na deformacje i szczelności) uwzględnianych przy projektowaniu mieszanki mineralno-asfaltowej SMA-MA. Wymagało to odpowiedniego doboru składników mieszanki, z jednej strony podatnych na zagęszczanie, z drugiej odpornych na koleinowanie i zabezpieczających płytę pomostu przed oddziaływaniem czynników środowiska (w tym głównie wody i środków odładzających).

Projektowanie składu mieszanki SMA-MA można podzielić na dwa główne etapy. Pierwszy (wstępny) jest ukierunkowany na ocenę jakościową składników mieszanki mineralno-asfaltowej i wstępne oszacowanie ich zawartości. W drugim etapie uściśla się skład mieszanki w oparciu o jej cechy fizyczne i wytrzymałościowe.

Na pierwszy etap składa się:

- dobór składników mineralnych pod względem ich właściwości oraz oszacowanie ich udziałów ilościowych (grys, piasek łamany, mączka wapienna) – ocena dotyczy również takich cech, jak kubiczność frakcji grysowych;
- dobór rodzaju lepiszcza asfaltowego i określenie jego wstępnej zawartości (w oparciu o średnią grubość błonki na powierzchni mieszanki mineralnej),
- przygotowanie próbek Marshalla zagęszczanych 2×50 uderzeń na stronę,
- wyznaczenie parametrów fizycznych mieszanki (gęstość, gęstość objętościowa, zawartość wolnych przestrzeni w MMA).

Jednym z ważniejszych elementów etapu pierwszego jest dobór ilościowy składników mieszanki SMA-MA. Analiza literatury i informacje uzyskane od producentów mieszanki SMA-MA pozwoliły Autorowi oszacować ich udział w mieszance, w podziale na grupy:

- |                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| – frakcja grysowa (pow. 2 mm)       | 67-73 %,   |
| – frakcja piaskowa (0,063-2,0 mm)   | 16-20 %,   |
| – frakcja wypełniaczowa (<0,063 mm) | 11-13 %,   |
| – lepiszcze asfaltowe               | 8,2-9,6 %. |

W drugim etapie przeprowadza się:

- korektę składu SMA-MA w zależności od wartości wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach (zmiana może dotyczyć składu mieszanki mineralnej oraz zawartości lepiszcza),
- przygotowanie trzech serii próbek (po 6 próbek) ze zróżnicowaną zawartością lepiszcza (z ustaloną na podstawie badań wstępnych i odchyłkami od niej po  $\pm 0,3\%$ ), zagęszczanych 2×35 (3 próbki) i 2×50 (3 próbki) uderzeń na stronę;
- wyznaczenie parametrów fizycznych mieszanek (gęstość, gęstość objętościowa, zawartość wolnych przestrzeni w MMA);
- w oparciu o uzyskane parametry wolnej przestrzeni i zagęszczalności przyjęcie optymalnej zawartości lepiszcza,
- wykonanie badań odporności na deformacje trwałe (samej mieszanki SMA-MA i w pakiecie z warstwą ścierną) oraz działanie wody (ITSR) mieszanki o optymalnym składzie.

Obok wspomnianych wyżej poszczególnych kroków etapu drugiego należy również wspomnieć o tym, że podczas przygotowywania próbek SMA-MA do badania odporności na deformacje trwałe (płyta zagęszczana w zagęszczarce walcowej) należy zwrócić uwagę

strukturę powierzchni próbki. Przy właściwie zaprojektowanej mieszance SMA-MA na całej powierzchni płyty powinien zostać wyciśnięty mastyks.

#### **2.1.6. Propozycja wymagań dotyczących mieszanek SMA-MA**

Wymagania dla mieszanek typu SMA-MA przedstawiono w tabeli (Tab. 2-1). W wymaganiach tych uwzględniono podatność do zagęszczania mieszanki oraz zaproponowano odmiennie podejście do badania odporności na deformacje trwałe (w stosunku do zapisów w WT-2014). Podatność do zagęszczania oceniano na podstawie zmian w wolnej przestrzeni w próbkach Marshalla przy zróżnicowanej pracy zagęszczania (35 i 50 uderzeń na stronę), ale również dokonywano makroskopowej oceny dotyczącej wpływu mastyksu na powierzchnię warstwy i jej jednorodności podczas zagęszczania w zagęszczarce walcowej. Podatność na deformacje trwałe oceniano dwuetapowo. Badania wykonywano w małym koleinomierzu. W pierwszej kolejności sprawdzano parametry warstwy ochronnej ( $WTS_{AIR}$ ,  $PRD_{AIR}$ ) o grubości 4 cm w temperaturze 45°C. Drugi etap dotyczył oceny układu warstwowego (warstwa ochronna + warstwa ścieralna) o grubości 8 cm (2 × 4 cm). Badanie wykonywano w 50°C. W przypadku układu warstwowego oceniać można zarówno mieszankę SMA-MA jak i MA (występujące w warstwie ochronnej) z identyczną mieszanką w warstwie ścieralnej. Wyniki badań [69] wskazują, że mieszanki typu SMA-MA wykazują zdecydowanie większą odporność na deformacje trwałe niż asfalty lane.

Tab. 2-1 Propozycja wymagań dla mieszanek typu SMA-MA w oparciu o analizę literatury i doświadczenia własne [26]

Właściwość	Warunki zagęszczenia wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	SMA-MA 5	SMA-MA 8	SMA-MA 11
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2x35 uderzeń	PN-EN 12697-8 [N3], p. 4	$V_{\max 1,5}$		
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.2, ubijanie, 2x50 uderzeń	PN-EN 12697-8 [N3], p. 4	$V_{\max 1,0}$		
Odporność na deformacje trwałe warstwy wiążącej (ochronnej) <sup>a)</sup>	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22 [N4], metoda B w powietrzu, PN-EN 13108029 D.1.6, 45°C <sup>d)</sup> 10 000 cykli	WTS <sub>AIR 0,50</sub> PRD <sub>AIR Deklarowane</sub>		
Odporność na deformacje trwałe pakietu warstw (ścieralnej i ochronnej) <sup>b)</sup>	C.1.20, wałowanie, $P_{98} - P_{100}$	PN-EN 12697-22 [N4], metoda B w powietrzu, PN-EN 13108029 D.1.6, 50°C <sup>d)</sup> 10 000 cykli	WTS <sub>AIR 0,15</sub> PRD <sub>AIR 9,0</sub>	WTS <sub>AIR 0,15</sub> PRD <sub>AIR 7,0</sub>	
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2x35 uderzeń	PN-EN 12697-12 [N5], przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania <sup>c)</sup> , badanie w 25°C	ITSR <sub>90</sub>		
Spływność lepiszcza	-	PN-EN 12697-18 [N6], p. 5	$D_{0,6}$		

a) Grubość płyty:

- 30 mm dla SMA-MA 5
- 40 mm dla SMA-MA 8
- 40 mm dla SMA-MA 11

b) Grubość płyty:

- dla pakietu warstw 7 cm (warstwa ochronna 3 cm SMA-MA 5 + warstwa ścieralna 4 cm, np. SMA 11)
- dla pakietu warstw 8 cm (warstwa ochronna 4 cm SMA-MA 8 + warstwa ścieralna 4 cm, np. SMA 11)

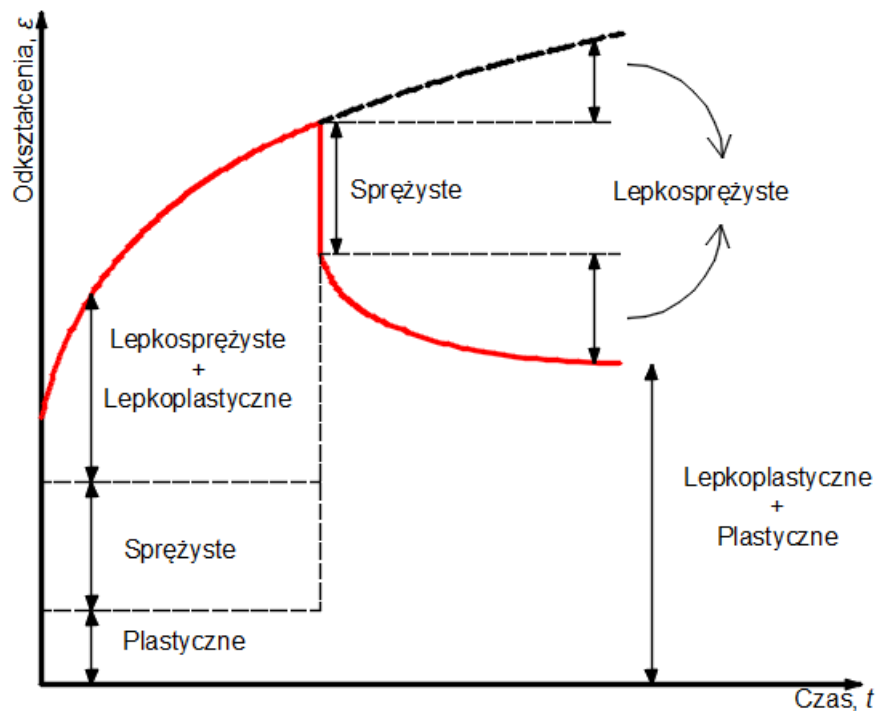
c) Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w zał. nr 1 do WT-2:2014

d) Temperatura badania zredukowana ze względu na niższą temperaturę nagrzewania się nawierzchni mostowej w okresie letnim w porównaniu do nawierzchni drogowej

## 2.2. OCENA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH W NISKICH TEMPERATURACH

### 2.2.1. Modele reologiczne MMA

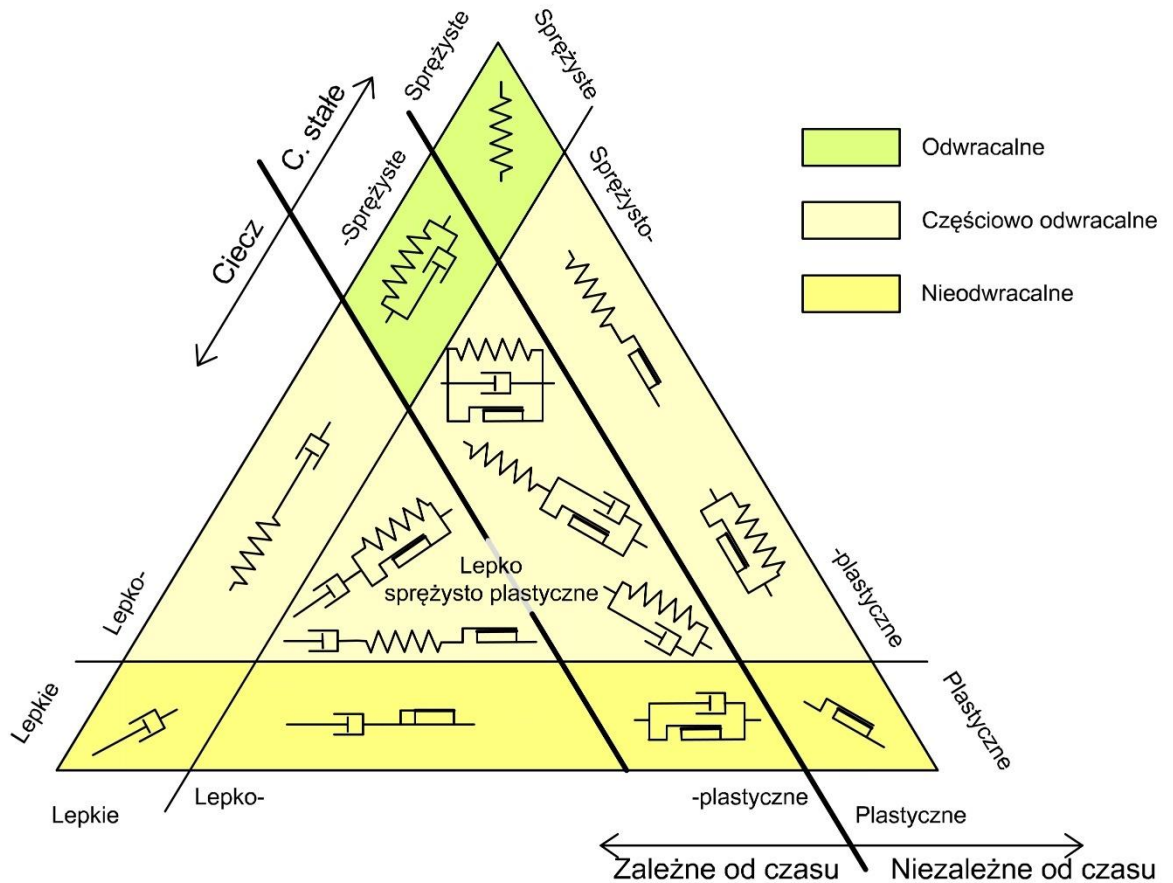
Ciało reologicznie proste to ciało, dla którego do opisu wystarczy jedna z trzech cech reologicznych, takich jak: sprężystość, lepkość bądź plastyczność. Każdy rzeczywisty materiał ma wszystkie cechy reologiczne [78], tym samym lepiszcza asfaltowe (a także mieszanki mineralno-asfaltowe) są ciałami reologicznie złożonymi. Deformacje pojawiające się w mieszankach mineralno-asfaltowych od przyłożonej siły są składową czterech odkształceń: sprężystych, plastycznych, lepkosprężystych, lepkoplastycznych. Odkształcenia sprężyste i plastyczne nie są zależne od czasu działania obciążenia w przeciwieństwie do odkształceń lepkosprężystych i lepkoplastycznych. Krzywą pełzania dla mieszanek mineralno-asfaltowych z zaznaczonymi rodzajami deformacji przedstawiono na Rys. 2-11.



Rys. 2-11 Wykres odkształceń w czasie dla MMA pod obciążeniem, przy przekroczeniu granicy plastyczności [79]

Do opisu asfaltów oraz mieszanek wykorzystuje się matematyczne modele reologicznie złożone, składające się z podstawowych modeli ciał doskonałych. Własności sprężyste definiowane są przez element doskonale sprężysty (Hook'a), właściwości lepkie przez element doskonale lepki (Newtona), natomiast cechy plastyczne przez element doskonale plastyczny (ciało St. Venant'a). Umownie ciała te reprezentowane są kolejno przez sprężynę, tłumik

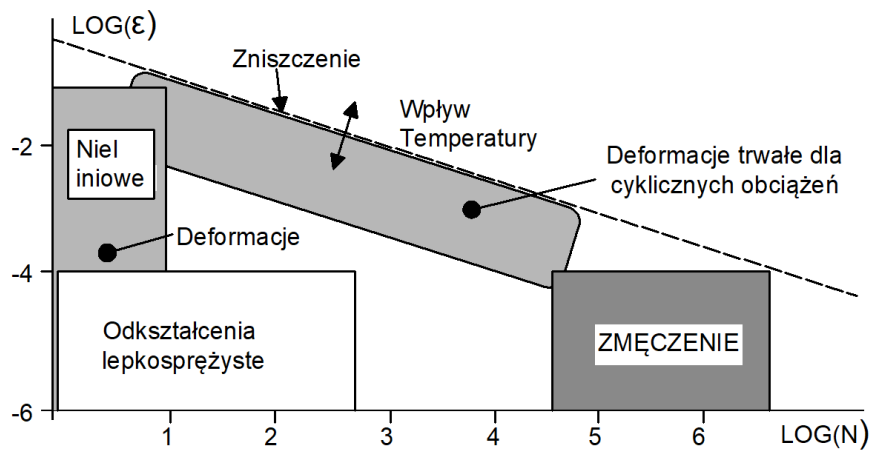
(cylinder wypełniony olejem) i suwak. Modele złożone powstają przez połączenie szeregowo i równoległe lub kombinację powyższych ciał idealnych. Na rysunku (Rys. 2-12) przedstawiono „trójkąt reologiczny”, zawierający zasadniczo wszystkie kombinacje podstawowych połączeń reologicznych.



Rys. 2-12 „Trójkąt reologiczny”, tłumaczenie własne na podstawie [80]

Podczas analizy zachowania materiałów zawierających lepiszcze asfaltowe należy uwzględnić czas jego obciążenia [81] oraz temperaturę materiału [82]. W trakcie przyłożenia stałego obciążenia (kontrolowane naprężenie) następuje wzrost odkształceń w czasie, natomiast w przypadku przyłożenia odkształcenia na stałym poziomie (kontrolowane odkształcenie) naprężenia zmniejszają się w czasie (relaksacja naprężeń). W praktyce, wykonanie próby pełzania (stan kontrolowanego naprężenia) jest znacznie łatwiejsze niż wykonanie próby relaksacji (stan kontrolowanego odkształcenia). Przeprowadzenie testów w stanie kontrolowanego odkształcenia wymaga bardziej zaawansowanej aparatury badawczej, umożliwiającej adaptacyjny do warunków obciążenia tryb pracy.

Przy ocenie mieszanek mineralno-asfaltowych kolejnym ważnym czynnikiem jest wielkość przyłożonego obciążenia, a także powtarzalność obciążeń (częstotliwość) oraz temperatura. Zmiana temperatury powoduje zmianę właściwości MMA, co cechuje materiały termoplastyczne [83]. Czynnikiem temperaturowy ma większy wpływ na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych (i asfaltów) niż czynnik ruchowy (wielokrotne obciążenia od ruchu pojazdów), ponieważ odpowiada m.in. za propagację spękań w niskich temperaturach [81]. Schemat zachowania MMA, co już zostało wspomniane wyżej, opisuje funkcja amplitudy i liczby cykli obciążeń (Rys. 2-13). Poszczególne granice pomiędzy typami zachowania MMA są umowne, natomiast przejście z jednego typu do drugiego odbywa się w sposób łagodny i ciągły [84].



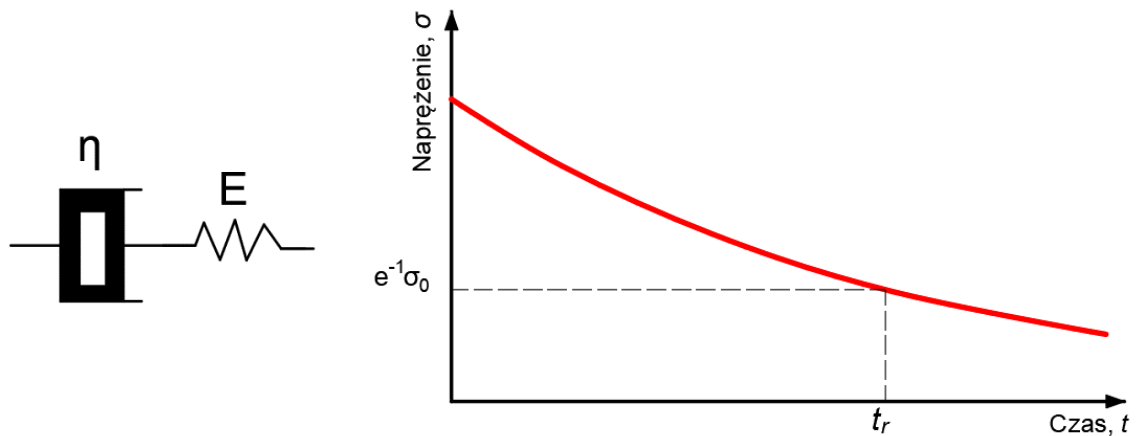
Rys. 2-13 Zjawiska towarzyszące mieszankom mineralno-asfaltowym [85]

### 2.2.2. Opis modeli reologicznych użytych w pracy

Po przeanalizowaniu dostępnych modeli reologicznych zdecydowano wykorzystać dwa z nich. Do opisu testów przy stałym obciążeniu wykorzystano model Burgers'a, natomiast model Maxwella został przyjęty do opisu relaksacji. Modele te powszechnie używane są przy charakteryzowaniu MMA i lepiszczy asfaltowych [86–94]. Modele te zostały wybrane z powodu małej liczby elementów, które należy wyznaczyć oraz dobry opis zjawisk (relaksacja i pełzanie MMA), do których mają zostać wykorzystane.

#### *Model Maxwella*

Wykres modelu Maxwella odzwierciedlający test relaksacji naprężeń (wraz z schematem modelu) przedstawiono na rysunku (Rys. 2-14).



Rys. 2-14 Model Maxwella w teście relaksacji

Model Maxwella, wykorzystywany do opisu zjawiska relaksacji, można przedstawić za pomocą równania (2.1) [95]:

$$\sigma(t) = \sigma(0)e^{-\frac{E}{\eta}t} \quad (2.1)$$

gdzie:

$\sigma(0)$  – naprężenie w czasie  $t = 0$  s,

$E$  – moduł sztywności (element Hooke'a),

$\eta$  – współczynnik lepkości (elementy Newtona).

Czas relaksacji  $t_r$  definiowany jest jako iloraz lepkości i modułu sztywności (2.2):

$$t_r = \frac{\eta}{E} \quad (2.2)$$

Po podstawieniu równania (2.2), równanie (2.1) przyjmuje postać (2.3) i (2.4):

$$\sigma(t_r) = \sigma(0)e^{-1} \quad (2.3)$$

$$\sigma(t_r) = \sigma(0) \cdot 0,368 \quad (2.4)$$

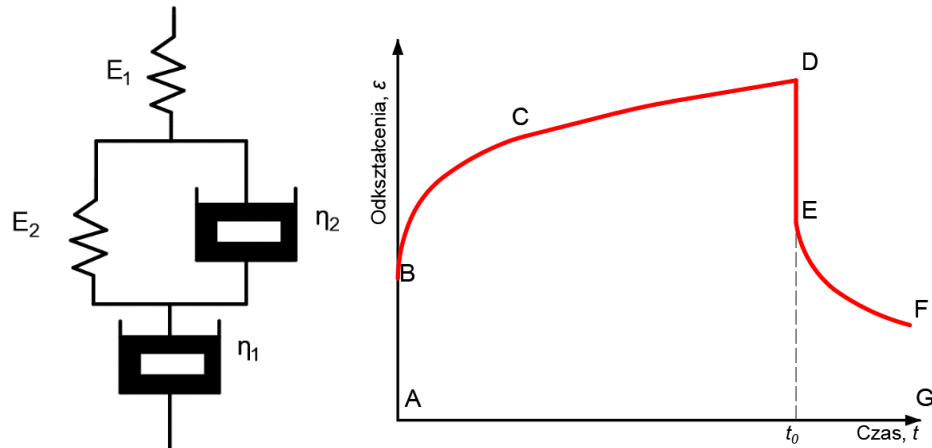
Z równań (2.3) i (2.4) wynika, że czas relaksacji w modelu Maxwella odpowiada czasowi, w jakim naprężenia w teście relaksacji osiągają 36,8% wartości naprężeń początkowych (spadek naprężeń o 63,2%).



Wykorzystanie modelu Maxwella do oceny czasu relaksacji naprężeń w badaniu RT pozwala w prosty sposób wyznaczyć poszukiwaną wartość ( $t_r$ ).

### Model Burgersa

W przypadku prowadzenia testów pełzania wykorzystano czteroelementowy model Burgersa. Model Burgersa wraz z wykresem próby pełzania przedstawiono na rysunku (Rys. 2-15).



Rys. 2-15 Próba pełzania z odciążeniem ciała Burgersa

Równanie konstytutywne modelu Burgersa ma postać (2.5) [95]:

$$\sigma + \left( \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon} \quad (2.5)$$

gdzie:

$\sigma$  – naprężenia,

$\varepsilon$  – odkształcenia.

Rozwiązanie równania (2.5) pozwala na wyznaczenie zmian odkształcenia w czasie pod wpływem działającego obciążenia (odciążenia) [86]. W przypadku testu pełzania zależność (2.5) dla czasu  $t < t_0$  przyjmuje postać (2.6):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0 t}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{t E_2}{\eta_2}} \right) \quad (2.6)$$

gdzie:

$E_1$  – moduł sztywności (element Hooke'a),

$\eta_1$  – współczynnik lepkości (elementy Newtona),

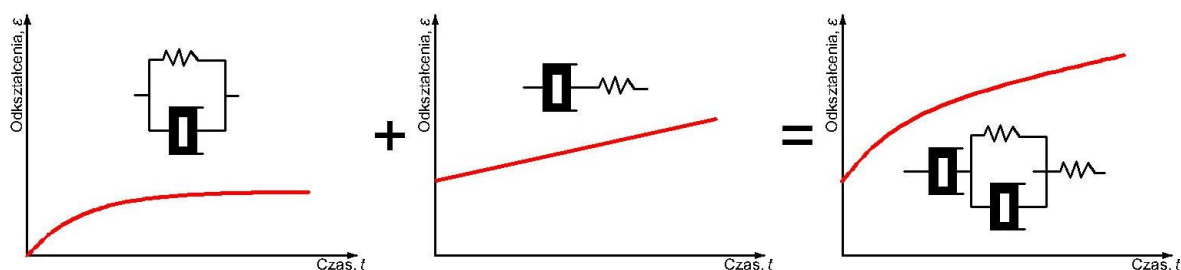
$E_2$  – moduł sztywności (element Kelvina-Voigta),  
 $\eta_2$  – współczynnik lepkości (element Kelvina-Voigta).

W przypadku odciążenia dla  $t > t_0$ , równanie (2.5) przyjmie postać (2.7):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0 t_0}{\eta_1} - \frac{\sigma_0}{E_2} e^{-\frac{t-t_0}{\eta_2}} \left( 1 - e^{-\frac{t_0}{\eta_2}} \right) \quad (2.7)$$

Oznaczenia jak we wzorze (2.6).

Odształcenia w modelu Burgersa są sumą modeli składowych Kelvina-Voigta i Maxwella – (Rys. 2-16).



Rys. 2-16 Składowe elementy Burgersa (model Kelvina-Voigta i Maxwella) w teście pełzania w fazie obciążenia

Parametr  $E_1$  reprezentuje odkształcenie sprężyste,  $\eta_1$  – płynięcie lepkie, natomiast  $E_2$  i  $\eta_2$  służą do opisu sprężystości opóźnionej. Wykres odkształceń w próbie pełzania (Rys. 2-15) w modelu Burgersa (po obciążeniu i odciążeniu) dzieli się na poszczególne etapy:

- etap A-B identyfikuje natychmiastowe odkształcenie sprężyste (element Hook'a z modelu Maxwella),
- etap B-D obejmuje swoim zakresem odkształcenia lepko-sprężyste, z czego:
  - zakres B-C – są to odkształcenia zdominowane przez elementy Kelvina-Voigta (do czasu retardacji);
  - zakres C-D – lepkie płynięcie (dominujące odkształcenia elementu Newtona z modelu Maxwella);
- po usunięciu obciążenia dochodzi do nawrotu sprężystego natychmiastowego (etap D-E),
- w etapie E-F dochodzi do opóźnionego nawrotu lepko-sprężystego,

- ostatni etap (F-G) dotyczy odkształcenia trwałego, będącego następstwem lepkiego płynięcia.

### **2.2.3. Czynniki wpływające na parametry niskotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych**

W nawierzchniach nieodpornych na działanie niskich temperatur (czy też wahań temperatury – częstych przejść przez 0°C) będzie dochodziło do powstawania spękań w warstwach asfaltowych indukowanych termicznie oraz/lub zmęczeniowych termicznych [22,96,97]. Układ spękań termicznych jest funkcją wielu czynników, takich jak: warunki klimatyczne, warunki i czas eksploatacji, rodzaj i grubość warstw bitumicznych, rodzaj podłoża oraz cechy lepko-sprężyste materiałów. Spękania indukowane termicznie mogą przybierać różne formy, m.in.: spękań blokowych, poprzecznych, nieregularnych.

Parametry mieszanek mineralno-asfaltowych są pochodną właściwości kruszywa i lepiszcza asfaltowego oraz wzajemnego udziału w mieszance tych składników (lepiszcze – agregat mineralny). W raporcie [98] opisano cztery czynniki materiałowe, mogące mieć wpływ na zachowanie się MMA w niskich temperaturach:

- 1) rodzaj lepiszcza asfaltowego – mieszanki wykonywane z użyciem lepiszcza asfaltowego o wyższej penetracji i niższej temperaturze mięknięcia cechują się mniejszą podatnością na powstawanie spękań indukowanych termicznie;
- 2) rodzaj kruszywa – kruszywa cechujące się dużą odpornością na ścieranie, dużą odpornością na działanie wody i mrozu oraz małą nasiąkliwością powodują zmniejszenie ryzyka powstawania spękań w niskich temperaturach;
- 3) zawartość lepiszcza asfaltowego – zmiana zawartości lepiszcza ma mały wpływ na parametry MMA w niskich temperaturach;
- 4) zawartość wolnych przestrzeni – wskaźnik zagęszczenia oraz zawartość wolnych przestrzeni nie wpływa znacząco na pękanie MMA w niskich temperaturach.

Ten sam raport [98] wskazuje również na czynniki środowiskowe, wśród których można wyróżnić:

- 1) temperaturę – większość spękań niskotemperaturowych powstaje w momencie, gdy temperatura otoczenia spada poniżej temperatury zeszklenia MMA (asfaltu);
- 2) prędkość spadku temperatury – szybszy spadek temperatury przyczynia się do większej podatności na pękanie;
- 3) wiek nawierzchni – starsze nawierzchnie są bardziej podatne na spękania w niskiej temperaturze (spowodowane jest to starzeniem lepiszcza asfaltowego).

Temperatura jest jednym z najważniejszych czynników środowiskowych, który wpływa na właściwości mechaniczne mieszanek mineralno-asfaltowych [99]. Kluczowy, ze względu na odporność na niskie temperatury, jest rodzaj lepiszcza asfaltowego oraz kruszywa [100–105]. Issacson i Zeng wskazują na wpływ pochodzenia lepiszcza asfaltowego oraz jego skład, wyrażony między innymi procentową zawartością asfaltenów i żywic w asfalcie, na jego parametry niskotemperaturowe w badaniu TSRST [101]. Zastosowanie asfaltu modyfikowanego lub wielorodzajowego poprawia parametry niskotemperaturowe MMA [106–112]. Wyniki badań [113] wskazują, że największy wpływ ma jednak asfalt bazowy, a nie produkt powstały po jego modyfikacji, np. polimerami. Mały wpływ zawartości lepiszcza na parametry niskotemperaturowe, w szczególności w badaniu TSRST, został wykazany w pracach [114–116]. Ten wpływ nie jest jednak jednoznaczny. Prace [117,118] wskazują na możliwy związek pomiędzy zawartością wolnych przestrzeni a odpornością na niskie temperatury. Zgodnie z wynikami badań pozytywnie na parametry niskotemperaturowe wpływa dodatek włókien aramidowych, stalowych i polimerowych [119–125], natomiast nie wykazano wpływu włókien celulozowych oraz włókien syntetycznych [120]. Zgodnie z wynikami badań [126,127] dodatek gumy również pozytywnie wpływa na odporność na spękania niskotemperaturowe. Dodatek asfaltu naturalnego (Trynidad) negatywnie wpływa na parametry niskotemperaturowe asfaltów lanych [128]. Wykorzystanie cementu lub wapna hydratyzowanego poprawia parametry niskotemperaturowe MMA [129]. Dodatek granulatu asfaltowego pogarsza właściwości niskotemperaturowe MMA [130,131].

Jedną z przyczyn powstawania pęknięć nawierzchni mostowych może być między innymi zmiana temperatury otoczenia oraz różnica w współczynnikach rozszerzalności cieplnej między użytymi materiałami (nawierzchni asfaltowej oraz podłoża pod nawierzchnią), które są elementami obiektu mostowego (beton, stal) [132]. Przekłada się to na odmienną pracę materiałów w połączeniu ze zmianą temperatur. W nawierzchniach mostowych dochodzi do ugięcia samej płyty pomostu. Znaczne odkształcenia rejestrowane są szczególnie w przypadku płyt stalowych ortotropowych, które są istotnie większe od odkształceń rejestrowanych na nawierzchniach poza obiektem mostowym (pkt. 2.1.1). Tym samym nawierzchnia musi być odporna na naprężenia pochodzące zarówno od ruchu, temperatury jak i odkształceń samego obiektu. Przykład uszkodzenia nawierzchni mostowej przedstawiono na fotografiach (Rys. 2-17). Widoczne pęknięcie warstwy ścieralnej było wynikiem nieciągłości w warstwie ochronnej (asfalcie lanym), powstałym wskutek skurczu. Przykład samodylatowania się warstwy asfaltu lanego w miejscach szwów technologicznych w niskich (ujemnych) temperaturach w okresie zimowym przedstawiono na fotografiach (Rys. 2-18).



Rys. 2-17 Przykłady uszkodzenia nawierzchni mostowej, pęknięcia podłużne oraz poprzeczne [46]



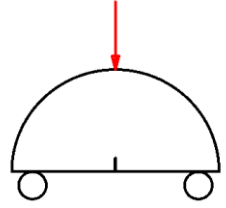
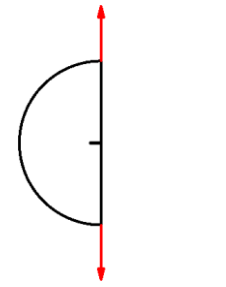
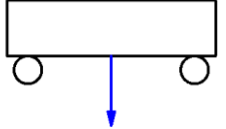
Rys. 2-18 Problem szwów technologicznych w warstwach ochronnych z asfaltu lanego [133]

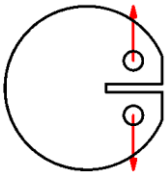
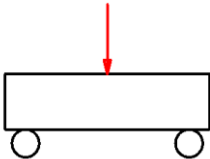
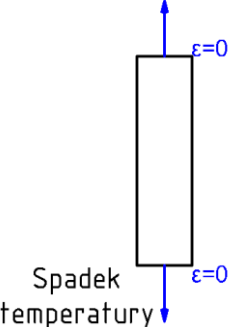
Podsumowując, zasadne jest dalsze poszukiwanie materiałów, które mogą być z powodzeniem stosowane na obiektach mostowych i będą cechować się dużą odpornością na wszelkiego rodzaju oddziaływania występujące w nawierzchniach mostowych.

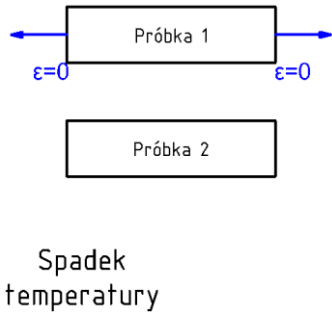

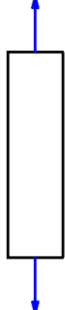
#### 2.2.4. Metody badania MMA w niskich temperaturach

Do scharakteryzowania zachowania się mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach ( $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ) wykorzystuje się różne testy i schematy obciążenia. Zestawienie wybranych badań w niskich temperaturach przedstawiono w tabeli (Tab. 2-2).

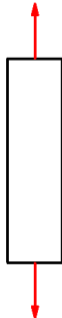
Tab. 2-2 Wybrane metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach

Metoda Badawcza	Charakterystyka	Przykłady Zastosowań metody	Wybrane uzyskiwane parametry	Uwagi	Schemat badania*
Semi Circular Bending SCB	Metoda zginania próbki półkolistej w celu wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie lub odporności na pękanie mieszanki mineralno-asfaltowej w celu oceny możliwości propagacji pęknięcia. W trakcie badania wykonywany jest pomiar siły oraz przemieszczenia z możliwością pomiaru szerokości rozwarcia pęknięcia	Marasteanu, i inni [102] Pszczółka, M.; Szydłowski, C. [100]	Maksymalna siła przy zniszczeniu $F_{max}$  Maksymalne odkształcenie $\epsilon_{max}$  Odporność na pękanie $KIc$	Badanie opisane w PN-EN 12697-44	
Fenix Test (opracowany w Hiszpani)	Modyfikacja metody SCB, różni się od testu SCB tym, że naprężenia rozciągające przykładane są prostopadle do krawędzi nacięcia	Pérez-Jiménez, F.; i inni [134]	j.w.	-	
Relaksacja naprężeń w belce zginanej	Zginanie w schemacie belki 3-punktowej, przykładanie stałego odkształcenia i pomiar spadku naprężenia	TP 151;[135]	Czas relaksacji, $t_r$	Badanie opisane w czeskiej normie TP 151	

Disk-Shaped Compact Tension Test DC(T)	Badanie polega na nieosiowym rozciąganiu próbki walcowej (prostopadle to tworzącej próbki), próbka jest nacięta,	Wagoner, M. i inni [136] Marasteanu, M.; i inni [102]	Energia pękania (Fracture Energy)	-	
Zginanie belki 3 punktowej	Wykorzystanie belki 3-punktowej do badania parametrów mieszanki mineralno-asfaltowej pozwala na zastosowanie różnych obciążeń (przyrost naprężeń, stałe naprężenia), badania można prowadzić na różnych wymiarach próbek	Jaczewski, M.; Judycki, J.; Jaskuła, P. [137] Sun, Y.; i inni [138] Pszczółka, M.; Szydłowski, [100] Judycki, J.; i inni [89] Zhao, L.; i inni [139] Wang B.; i inni [140]	W zależności od sposobu przyłożenia obciążenia:  odkształcenie przy zniszczeniu $\epsilon_{fail}$  wytrzymałość na zginanie $R_z$  krzywa pełzania	Wang B.; i inni [140], prowadził badania na naciętej próbce	
Bending Beam Rheometer BBR		Velasquez, R.; i inni [141] Judycki, J.; i inni [88] Sudbury, i inni [118]	Szytywność pełzania (Creep Stiffnes) flexural-creep stiffness  m-value	Badanie zaadaptowane z procedury badania lepiszczy asfaltowych, badanie opisane w ASTM D6648	
Thermal Stress Restrained Specimen Test TSRST	Opisane w punkcie 3.1.2	Pszczółka, M.; Szydłowski, C. [100] Judycki, J.; i inni [142] Jung, H.D. [98] Dias A.; i inni [143]	Naprężenia krytyczne Temperatura krytyczna	Badanie opisane w PN-EN 12697-46	

<p>UTSST (Uniaxial Thermal Stress-Strain Test) badanie w aparacie ATCA (Asphalt Thermal Cracking Analyser)</p>	<p>Pomiar analogiczny jak w badaniu TSRST + pomiar odkształceń w drugiej nieutwardzonej próbce oraz metoda zmodyfikowana na próbkach naciętych</p>	<p>Mandal, T.; Bahia, H. [144] Bahia, H.; i inni [145] Mensching, D.; i inni [146]</p>	<p>Jak w badaniu TSRST + pomiar odkształceń w drugiej próbce</p>	<p>-</p>	
<p>Pełzanie przy rozciąganiu prostym (TCT)</p>	<p>Opisane w punkcie 3.1.2</p>	<p>Dias A.; i inni [143]</p>	<p>Krzywa pełzania</p>	<p>Badanie opisane w PN-EN 12697-46</p>	
<p>Relaksacja naprężeń przy rozciąganiu prostym (RT)</p>	<p>Opisane w punkcie 3.1.2</p>	<p>Dias A.; i inni [143]</p>	<p>Czas relaksacji <math>t_r</math></p>	<p>Badanie opisane w PN-EN 12697-46</p>	



(Uniaxial Cyclic Tensile Stress Test – UCTST).	Odporność na zmęczenie w niskich temperaturach od kombinacji obciążeń kriogenicznych i mechanicznych w cyklicznym badaniu osiowego rozciągania	Dias A.; i inni [143]		Badanie opisane w PN-EN 12697-46	
--	--	-----------------------	--	----------------------------------	---

\*Kolor niebieski – kontrola odkształceń, kolor czerwony – kontrola naprężeń

### 3. CZĘŚĆ BADAWCZA

#### 3.1. PLAN BADAŃ

##### 3.1.1. Badania podstawowe lepiszczy asfaltowych

Zaplanowane i przeprowadzone badania lepiszczy asfaltowych (wykorzystanych w analizowanych mieszankach mineralno-asfaltowych) miały za zadanie określić ich podstawowe parametry. Posłużyły one również w dalszej części pracy do określenia zależności między nimi a właściwościami MMA w niskich temperaturach.

W pierwszym etapie wykonano badania penetracji, temperatury mięknięcia wg PiK oraz nawrotu sprężystego. Oznaczono parametry asfaltów wykorzystanych do przygotowania mieszanek SMA-MA i MA. Następnie wykonano ekstrakcje i odzyskano w wyparce obrotowej wyekstrahowane lepiszcza asfaltowe zgodnie z normą 12396-3 [N7] z użyciem tetrachloroetenu  $C_2Cl_4$ . W trzecim etapie przeprowadzono badania penetracji oraz temperatury mięknięcia wg PiK asfaltów wyekstrahowanych z przygotowanych próbek MMA. Dzięki temu podejściu uzyskano rzeczywiste parametry lepiszczy asfaltowych po starzeniu technologicznym. Zestaw badań lepiszczy asfaltowych przedstawiono w tabeli (Tab. 3-1).

Tab. 3-1 Schemat przeprowadzonych badań lepiszczy asfaltowych

<b>Etap</b>	<b>Opis etapu</b>	<b>Wykonane oznaczenia</b>	<b>Norma badawcza</b>
Etap 1	Badanie świeżych asfaltów	Penetracja w 25°C	PN-EN 1426 [N8]
		Temperatura mięknięcia	PN-EN 1427 [N9]
		Nawrót sprężysty	PN-EN 13398 [N10]
Etap 2	Odzyskiwanie lepiszcza asfaltowego	Odzysk lepiszcza asfaltowego	PN-EN 12697-3 [N11]
Etap 3	Badanie asfaltów wyekstrahowanych	Penetracja w 25°C	PN-EN 1426 [N8]
		Temperatura mięknięcia	PN-EN 1427 [N9]

Badaniom poddano następujące rodzaje asfaltów: asfalt drogowy 50/70, asfalty modyfikowane PMB 25/55-60 i PMB 45/80-65 oraz asfalt wysokomodyfikowany HiMA 65/105-80. Wyniki z przeprowadzonych oznaczeń zawarto w podrozdziale 3.2. Aparatura badawcza wykorzystana do badań została przedstawiona na zdjęciach (Rys. 3-1). Urządzenia wykorzystane do odzysku lepiszcza asfaltowego, tj. automatyczny ekstraktor ultradźwiękowy oraz wyparka obrotowa, zostały przedstawione na zdjęciach (Rys. 3-2).



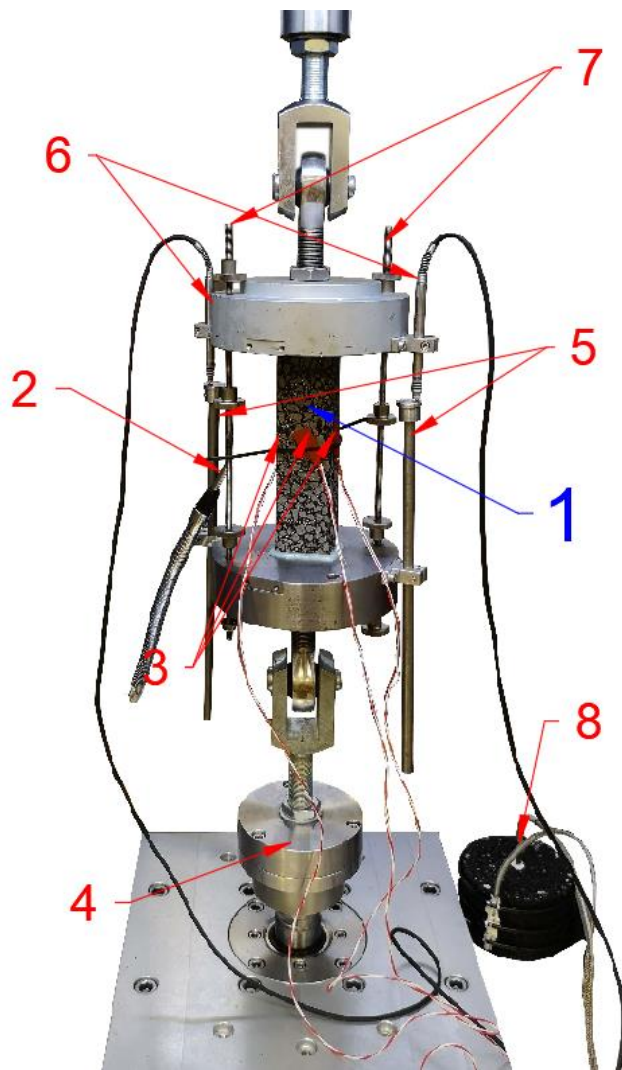
Rys. 3-1 Penetrometr półautomatyczny i automatyczny aparat R&B



Rys. 3-2 Ekstraktor i wyparka obrotowa użyta do odzyskania lepiscza asfaltowego

### 3.1.2. Badanie mieszanek MMA użyte w pracy

Do oceny mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do badań pod kątem ich właściwości niskotemperaturowych wykorzystano schemat rozciągania prostego. Wybór tej metody wynika przede wszystkim z faktu, że jest to jedna z metod dedykowanych do badania mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach. Badanie osiowego rozciągania zostało opisane w normach AASHTO TP10 [147] oraz PN-EN 12697-46 [148]. Badania w oparciu o normę europejską są wykorzystywane w Polsce do oceny spękań niskotemperaturowych betonów asfaltowych o wysokim module sztywności AC WMS [31] – badanie TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test). Badanie to zostało opracowane przez Monismith'a [149]. Zamontowana próbka wraz z oprzyrządowaniem została przedstawiona na zdjęciu (Rys. 3-3).



1. Próbką badawczą
2. Czujnik temperatury komory klimatycznej
3. Napróbkowe czujniki temperatury
4. Czujnik siły
5. Pręty inwarowe
6. Czujniki LDTV
7. Pręty zabezpieczające przed uszkodzeniem komory
8. Próbka ślepa z czujnikami temperatury

Rys. 3-3 Próbką zamontowana w systemie badawczym przygotowana do badania TSRST (3 czujniki temperatury).

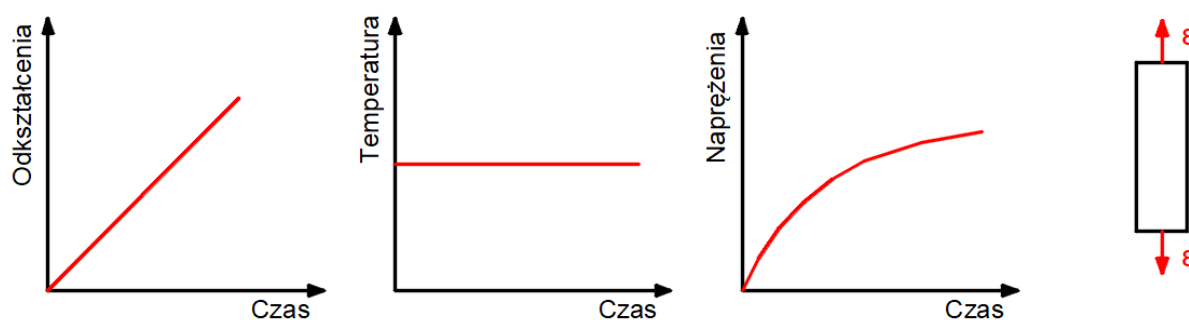
W pracy wykorzystano do badań mieszanek mineralno-asfaltowych łącznie cztery testy:

- UTST – wytrzymałość na rozciąganie w badaniu osiowego rozciągania,
- TSRST – badanie naprężeń termicznych w próbce usztywnionej,
- TCT – pomiar pełzania przy rozciąganiu,
- RT – badanie relaksacji naprężeń.

#### *Uniaxial Tension Stress Test UTST*

Badanie UTST służy do wyznaczenia warunków obciążenia w badaniu docelowym TCT oraz RT. Jest to badanie, w którym próbka jest rozciągana do momentu zniszczenia. Obciążenie przykładane do próbki jest zmienne i musi zapewnić stały przyrost odkształcenia próbki, wynoszący 0,625%/min.

Badanie prowadzono w trzech temperaturach badawczych:  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$  oraz  $-25^{\circ}\text{C}$ . Temperatury badania  $-10^{\circ}\text{C}$  oraz  $-25^{\circ}\text{C}$  są rekomendowane przez normę EN 12697-46 [148]. Badanie w temperaturze  $-15^{\circ}\text{C}$  wykonano w celu dokładniejszego zobrazowania zmian parametrów w badanym zakresie temperatur. Zasadę badania przedstawiono na rysunku (Rys. 3-4). W przypadku materiałów sztywnych, naprężenia podobnie jak odkształcenia, będą przyrastać w sposób liniowy. W badaniu notowano maksymalne odkształcenie oraz naprężenie.



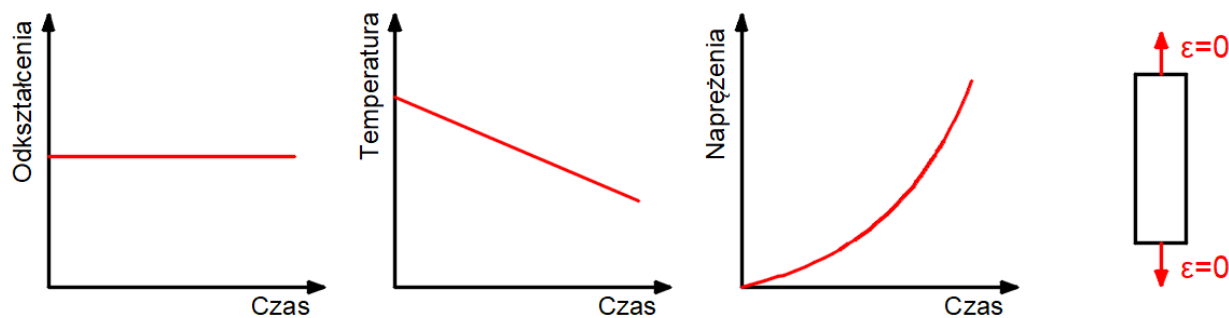
Rys. 3-4 Zasada badania UTST

#### *Thermal Stress Restrained Speciment Test – TSRST*

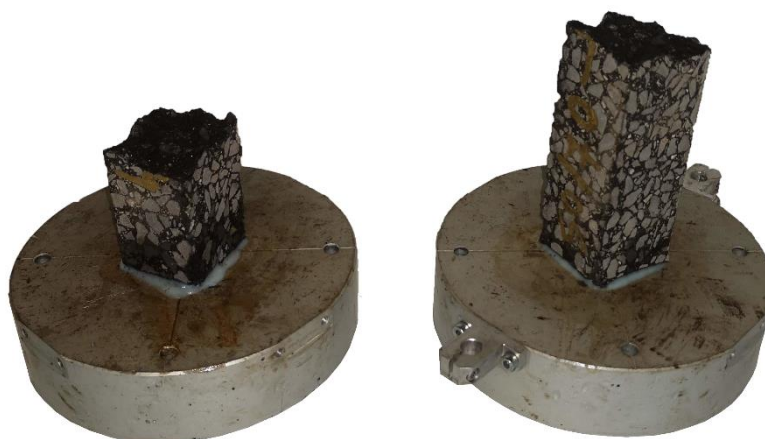
Badanie polegało na stopniowym ochładzaniu próbki przy gradiencie  $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$  z jednoczesnym zablokowaniem możliwości odkształcania się próbki wskutek skurczu (odkształcenia równe 0). Prędkość spadku temperatury ma kluczowe znaczenie na uzyskiwane wyniki [105,119]. Większy gradient temperatury skutkuje szybszym przyrostem naprężeń.

Zasadę badania przedstawiono na rysunku (Rys. 3-5). Badanie rozpoczyna się od temperatury  $20^{\circ}\text{C}$ . Notuje się zmiany (wzrosty) wartości naprężeń w czasie, minimalną temperaturę oraz naprężenie przy zniszczeniu. Przykład prawidłowego zniszczenia przedstawiono na Rys. 3-6.

W teście TSRST dochodzi do opóźnienia pomiędzy notowaną temperaturą powietrza w komorze klimatycznej a rdzeniem próbki. Opóźnienie to zależy od wielkości próbki poddanej badaniu, ale także od wielkości i kształtu komory klimatycznej oraz prędkości przepływu powietrza w komorze [150]. Przekłada się to m.in. na odtwarzalność wyników badania TSRST w różnych laboratoriach.



Rys. 3-5 Zasada badania TSRST



Rys. 3-6 Zniszczenie próbki w teście TSRST

### *Tensile Creep Test – TCT*

Badanie pełzania TCT polega na obciążeniu próbki stałym naprężeniem rozciągającym (Rys. 3-7). Rezultatem tego jest wykres odkształceń w czasie. Warunki obciążenia przyjęto na podstawie badania UTST: faza obciążenia – naprężenie  $1,5 \text{ MPa}^1$ , faza odciążenia – naprężenie  $0 \text{ MPa}$ . Naprężenia nie były różnicowane w zależności od temperatury badania, co pozwoliło na porównanie generowanych odkształceń w temperaturach:  $-10^\circ\text{C}$ ,  $-15^\circ\text{C}$  i  $25^\circ\text{C}$  (ten sam zakres temperaturowy, co w badaniu UTST). Jeden cykl, składający się z fazy obciążenia i odciążenia, trwał 21600 sekund, z czego: cykl obciążenia – 14400 sekund, cykl odciążenia – 7200 sekund. Na podstawie odkształcenia (w fazie obciążenia) w oparciu o metodę najmniejszych kwadratów wyznaczano parametry modelu Burgersa ( $E_1, E_2, \eta_1, \eta_2$ ).

W celu zmniejszenia liczby parametrów koniecznych do wyznaczenia z równania (2.6), parametr  $E_1$  wyznaczano z równania (3.1). Opisuje on zachowanie się materiału bezpośrednio po przyłożeniu

<sup>1</sup> Stanowi to około 25% wytrzymałość na rozciąganie, pkt 4.1

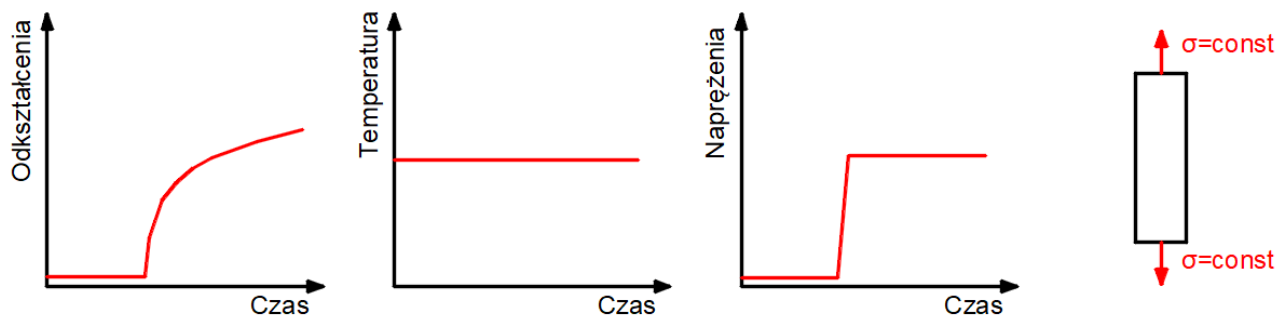
naprężenia (sprężyste odkształcenie natychmiastowe, element Hook'a w modelu Burgersa), tj. dla czasu  $t = 0$  sekund.

$$E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon(0)} \quad (3.1)$$

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczano każdorazowo czas relaksacji  $t_r$  z wzoru (3.2). Podejście takie zostało również zastosowane w innych pracach [87,151,152].

$$t_r = \frac{\eta_1}{E_1} \quad (3.2)$$

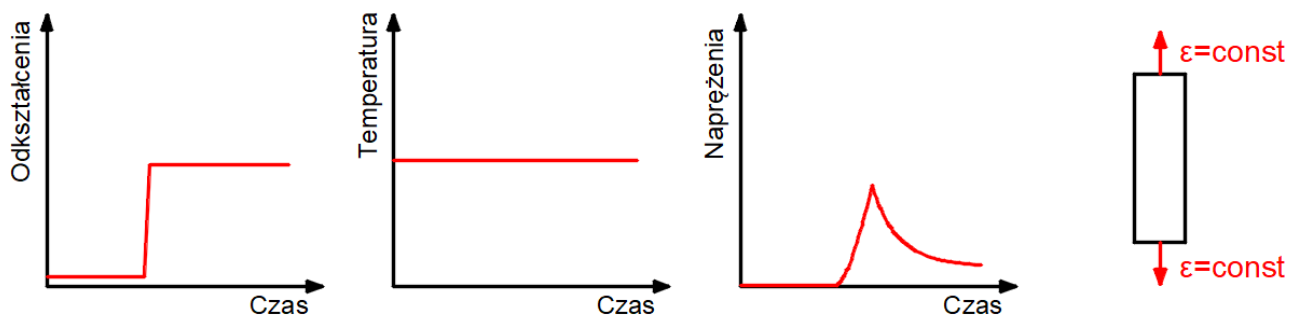
Oznaczenia zgodnie z wzorem (2.6)



Rys. 3-7 Zasada badania TCT

#### *Relaxation Test – RT*

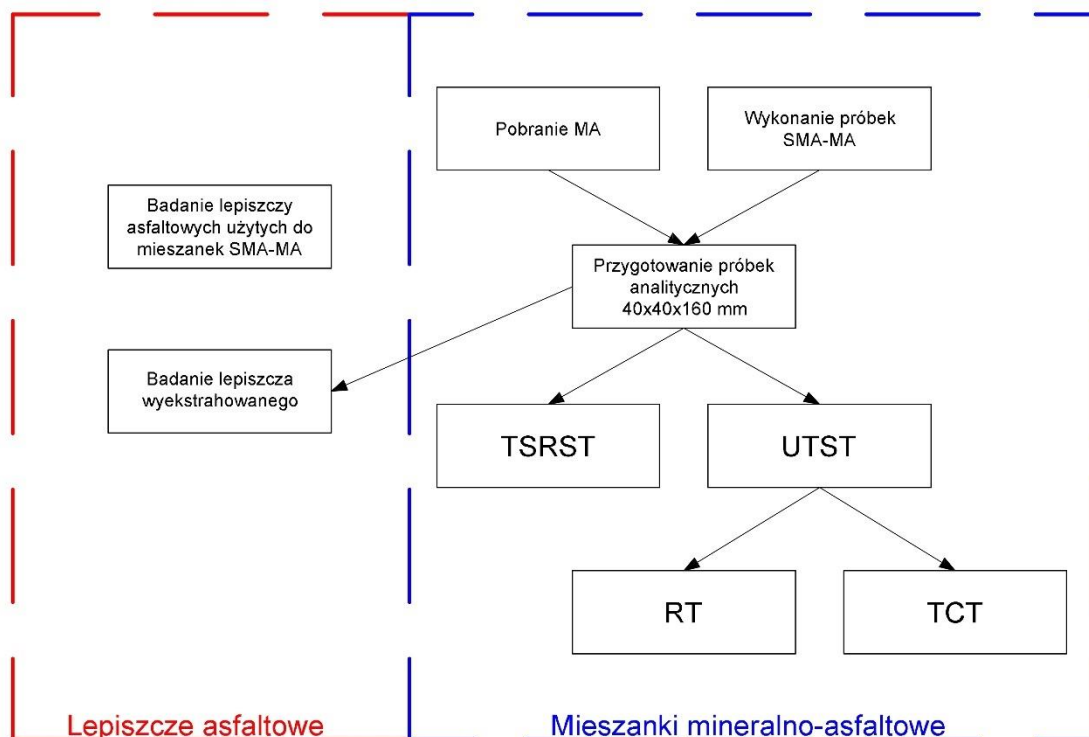
Badanie relaksacji naprężeń polega na przyłożeniu do próbki stałego odkształcenia i pomiarze zmian naprężeń w czasie (Rys. 3-8). Naprężenia w przypadku materiałów, w których zachodzi zjawisko relaksacji, będą się zmniejszały. Poziom odkształcenia przykładanego do próbek wynosił około 40% odkształcenia granicznego, uzyskiwanego w badaniu UTST, co każdorazowo przekładało się na naprężenia początkowe mniejsze niż 75% naprężeń maksymalnych uzyskiwanych w badaniu UTST. Wartość 75% stanowi wymaganie normy PN-EN 12690-46. Czas badania był uzależniony od temperatury badania i typu mieszanki. Mieścił się w zakresie od około 2000 sekund do ponad 100 000 sekund. Za główne kryterium oceny przyjęto osiągnięcie  $(1/e)\% = 36,8\%$  naprężeń początkowych. Wartość ta wynika bezpośrednio z reologicznego modelu Maxwella i jest zgodna z normą badawczą PN-EN 12697-46 [148].



Rys. 3-8 Zasada badania RT

### 3.1.3. Plan badań mieszanek mineralno-asfaltowych

Plan badań został przedstawiony w wersji stabelaryzowanej (Tab. 3-2) oraz w formie schematu (Rys. 3-9). W tabeli planowanych badań zawarto informacje o wykonanych oznaczeniach, ilości poszczególnych testów, otrzymanych parametrach oraz zawarto cel każdego badania. Pierwszy etap badań, czyli wykonanie testu UTST, był konieczny w celu wyznaczenia naprężeń i odkształceń przy zniszczeniu w każdej z temperatur prowadzonych oznaczeń. Otrzymane wyniki posłużyły do wykonana dalszych testów: TCT oraz RT.



Rys. 3-9 Schemat zaplanowanych badań



Tab. 3-2 Przeprowadzone badania wraz z otrzymanymi parametrami i wyjaśnieniem celowości przeprowadzenia badań

Oznaczenie	Liczba wykonanych oznaczeń	Przyłożone obciążenie	Otrzymane parametry	Cel wykonania oznaczenia
Thermal Stress Restrained Specimen Test – TSRST	3 dla każdej mieszanki (łącznie 18)	$\Delta = 10^{\circ}\text{C/h}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– temperatura przy zniszczeniu <math>T_{failure}</math>, <math>^{\circ}\text{C}</math></li> <li>– naprężenie przy zniszczeniu <math>\sigma_{cry, failure}</math>, mm/m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– określenie granicznych wartości przy zniszczeniu, wywołanych skurczem mieszanki mineralno-asfaltowej,</li> <li>– ocena przyrostu naprężeń w punktach charakterystycznych (-5, -10, -15, -20, -25<math>^{\circ}\text{C}</math>) na podstawie analizy przebiegu funkcji naprężeń w czasie,</li> </ul>
Uniaxial Tension Stress Test UTST	2 dla każdej mieszanki (łącznie 18)	$d\varepsilon = 0,625\%/min$ w temperaturze -10 $^{\circ}\text{C}$ , - 15 $^{\circ}\text{C}$ , - 25 $^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wytrzymałość na rozciąganie <math>\beta t</math>, MPa</li> <li>– graniczne odkształcenie przy zniszczeniu <math>\varepsilon_{failure}</math>, mm/m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– określenie warunków obciążenia w kolejnych testach, opartych na wartościach granicznych przy zniszczeniu (naprężenie, odkształcenie),</li> </ul>
Tensile Creep Test – TCT	9 dla każdej mieszanki (łącznie 54)	$\sigma = 1,5 \text{ MPa}$ w temperaturze -10 $^{\circ}\text{C}$ , - 15 $^{\circ}\text{C}$ , - 25 $^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wykres zależności odkształceń w czasie w próbie pełzania <math>\varepsilon(t)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wyznaczenie parametrów modelu Burgersa,</li> <li>– ocena materiałów na podstawie wykresów pełzania,</li> <li>– wyznaczenie czasu relaksacji w sposób pośredni.</li> </ul>
Relaxation Test - RT	9 dla każdej mieszanki (łącznie 54)	$\sim 40\% \varepsilon_{failure}$ w temperaturze -10 $^{\circ}\text{C}$ , - 15 $^{\circ}\text{C}$ , - 25 $^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– czas relaksacji <math>t_r</math>, wykres zależności naprężeń w czasie w próbie relaksacji <math>\sigma(t)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wyznaczenie czasu relaksacji w oparciu o model Maxwella</li> </ul>

### 3.2. MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE PODDANE BADANIOM

Badania przeprowadzono łącznie na sześciu różnych mieszankach mineralno-asfaltowych, pięciu mieszankach typu SMA-MA oraz jednej mieszance typu asfalt lany (MA). Mieszanki typu SMA-MA zostały przygotowane w warunkach laboratoryjnych w oparciu o opracowaną receptę. Różniły się rodzajem zastosowanego asfaltu (zwykły, modyfikowany PmB, wysokomodyfikowany – HiMA) oraz różną zawartością lepiszcza asfaltowego (tylko w zakresie lepiszcza PmB 45/80-65). Mieszanka typu asfalt lany została pobrana w trakcie budowy obiektu mostowego na jednym z kontraktów realizowanych w województwie zachodniopomorskim. Pobrano ją bezpośrednio z kotła transportowego do asfaltu lanego i po ostudzeniu przewieziono do laboratorium w celu wykonania próbek. Pobranie mieszanki wykonanej w stacjonarnej wytwórni mas bitumicznych zapewnia wyższy w stosunku do mieszanek wykonywanych w mieszalniku laboratoryjnym poziom techniczny. Efektem tego jest uzyskanie parametrów MMA odzwierciedlających skalę techniczną.

Zestawienie badanych mieszanek przedstawiono w tabeli (Tab. 3-3), natomiast w tabeli (Tab. 3-4) podano podstawowe parametry lepiszczy asfaltowych wykorzystanych do przygotowywania próbek SMA-MA 8 (zgodnie z planem badań przedstawionym w tab. 3-1). Asfalt wyjściowy użyty do produkcji asfaltu lanego (PmB 25/55-60), ze względu na niemożliwość pobrania jego próbki na wytwórni mas bitumicznych, nie został poddany badaniu podstawowych parametrów (penetracja, PiK, nawrót sprężysty). Oznaczenia tych parametrów wykonano na próbkach lepiszcza wyekstrahowanych z mieszanki MA.

Tab. 3-3 Zestawienie badanych mieszanek mineralno-asfaltowych

Nr mieszanki	Rodzaj mieszanki	Sposób przygotowania
1	SMA-MA 8 50/70	Mieszalnik laboratoryjny
2a	SMA-MA 8 PmB 45/80-65*	
2b	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 – 0,5% asf	
2c	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 + 0,5% asf	
3	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	
4	MA 11 PmB 25/55-60	Pobranie z kotła transportowego

\*W pracy w przypadku braku podania w nawiasie procentowej zawartości asfaltu przyjmuje się, że jest to mieszanka SMA-MA 8 PmB 45/80-65 o zawartości asfaltu 8,4%

Tab. 3-4 Podstawowe parametry lepiszczy asfaltowych (wartości średnie) użytych do wykonania próbek\*

Asfalt	Parametr	Metoda badania	Jednostka	Wartość
50/70	Penetracja w 25°C $m = 100 \text{ g}$ $t = 5 \text{ s}$	PN-EN 1426:2015-08	0,1 mm	62
	Temperatura mięknięcia, w wodzie	PN-EN 1427:2015-08	°C	48,6
PmB 45/80-65	Penetracja w 25°C $m = 100 \text{ g}$ $t = 5 \text{ s}$	PN-EN 1426:2015-08	0,1 mm	60
	Temperatura mięknięcia, w wodzie	PN-EN 1427:2015-08	°C	65,6
	Nawrót sprężysty $T=25^\circ\text{C}$ 50 mm/min	PN-EN 13398:2017-12	%	86
HiMA 65/105-80	Penetracja w 25°C $m = 100 \text{ g}$ $t = 5 \text{ s}$	PN-EN 1426:2015-08	0,1 mm	89
	Temperatura mięknięcia, w glicerynie	PN-EN 1427:2015-08	°C	86,0
	Nawrót sprężysty $T = 25^\circ\text{C}$ 50 mm/min	PN-EN 13398:2017-12	%	95

Pozostałą część próbek analitycznych poddano ekstrakcji i odzysku lepiszcza asfaltowego w celu określenia podstawowych parametrów lepiszcza asfaltowego z uwzględnieniem starzenia technologicznego. Wyniki przeprowadzonych oznaczeń asfaltu odzyskanego, przedstawiono w Tab. 3-5.

Tab. 3-5 Parametry lepiszcza asfaltowego (wartości średnie) wyekstrahowanego z mieszanek mineralno-asfaltowych

Asfalt	Parametr	Metoda badania	Jednostka	Wartość
50/70	Penetracja w 25°C $m = 100 \text{ g}$ $t = 5 \text{ s}$	PN-EN 1426 [N8] PN-EN 1427 [N9]	0,1 mm	49
	Temperatura mięknięcia, w wodzie		°C	53
PmB 45/80-65	Penetracja w 25°C $m = 100 \text{ g}$ $t = 5 \text{ s}$		0,1 mm	49
	Temperatura mięknięcia, w wodzie		°C	73
HiMA 65/105-80	Penetracja w 25°C $m = 100 \text{ g}$ $t = 5 \text{ s}$		0,1 mm	63
	Temperatura mięknięcia, w glicerynie		°C	92,0
PmB 25/55-60	Penetracja w 25°C $m = 100 \text{ g}$ $t = 5 \text{ s}$		0,1 mm	35
	Temperatura mięknięcia, w wodzie		°C	67,0

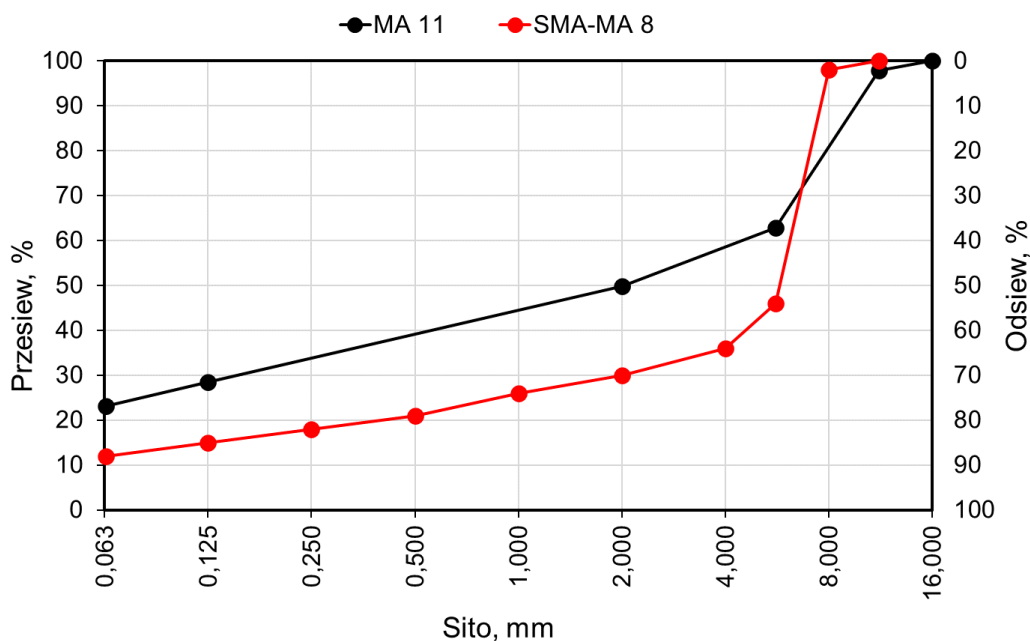
W projektowaniu SMA-MA wykorzystano grysy bazaltowe (#5/8, #2/5) z kopalni Księginki, piasek granitowy (#0/2) z kopalni Graniczna oraz mączkę wapienną (producent Nordkalk). Na etapie recepty wykorzystano lepiszcze modyfikowane PmB 45/80-65, stabilizator lepiszcza w postaci granulatu (Viatop 80 Premium) oraz środek adhezyjny Wetfix BE. W tabeli 3.6. zestawiono wybrane parametry zaprojektowanej mieszanki. Krzywą uziarnienia przedstawiono na rysunku (Rys. 3-10). Parametry asfaltu lanego w zakresie zawartości lepiszcza oraz odporności na deformacje trwałę odpowiadały wymaganiom WT-2:2014 [31] na warstwy ochronne obiektów mostowych. Parametry asfaltu lanego zestawiono w tabeli (Tab. 3-7), a krzywą uziarnienia pokazano również na Rys. 3-10. Recepta wyjściowa mieszanki SMA-MA 8 PmB 45/80-65 została zawarta w załączniku 1.

Tab. 3-6 Wybrane parametry zaprojektowanej mieszanki SMA-MA 8 PmB 45/80-65

Rodzaj badania/właściwość	Metoda	Jednostka	Wartość
Zawartość lepiszcza całkowitego B	-	%	8,4
Gęstość MMA $\rho_{mh}$	PN-EN 12697-5 1 [N12]	Mg/m <sup>3</sup>	2,504
Gęstość objętościowa MMA $\rho_b$ (2x50 uderzeń)	PN-EN 12697-6 [N13]	Mg/m <sup>3</sup>	2,478
Zawartość wolnych przestrzeni V (2x50 uderzeń)	PN-EN 12697-8 [N3]	%	1,0
Gęstość objętościowa MMA $\rho_b$ (2x35 uderzeń)	PN-EN 12697-6 [N13]	Mg/m <sup>3</sup>	2,469
Zawartość wolnych przestrzeni V (2x35 uderzeń)	PN-EN 12697-8 [N3]	%	1,4
Odporność na działanie wody ITSR	PN-EN 12697-12 [N14]	%	97
Spływność lepiszcza D	PN-EN 12697-18 [N15]	%	0,1
Odporność na def. trwałe $PRD_{AIR}$ (metoda B w powietrzu, 45°C, 10000 cykli)	PN-EN 12697-22 [N4]	%	13,8
Odporność na def. trwałe $WTS_{AIR}$ (metoda B w powietrzu, 45°C, 10000 cykli)	PN-EN 12697-20 [N16]	mm/10 <sup>3</sup> cykl	0,16

Tab. 3-7 Wybrane parametry mieszani MA 11

Rodzaj badania/właściwość	Metoda	Jednostka	Wartość
Zawartość lepiszcza całkowitego B	-	%	6,8
Gęstość MMA $\rho_{mb}$	PN-EN 12697-5 [N12]	Mg/m <sup>3</sup>	2,512
Odporność na deformacje trwałe:	PN-EN 12697-20 [N16]	%	2,1
Penetracja			
Przyrost penetracji			



Rys. 3-10 Krzywa uziarnienia mieszanek MA 11 i SMA-MA 8

### 3.3. ZASTOSOWANA APARATURA BADAWCZA

Do przeprowadzenia badań wykorzystano serwo-hydrauliczny, dynamiczny system badawczy DTS-30, wyprodukowany przez firmę PAVETEST (Włochy, Australia). System ten pozwala na pracę pod obciążeniem dynamicznym rozciągającym oraz ściskającym i jest dostosowany do testowania różnorodnych materiałów, takich jak mieszanki mineralno-asfaltowe, kruszywa, grunty, materiały związane spoiwami, włókna i tworzywa sztuczne [153].

Podstawowe parametry systemu badawczego DTS-30 przedstawiono poniżej:

- rama obciążająca o nośności 150 kN,
- siłownik hydrauliczny o sile 30 kN i skoku 100 mm,
- częstotliwość pracy do 100 Hz,
- komora klimatyczna umożliwiająca chłodzenie z prędkością 10°C/h w całym zakresie dostępnych temperatur (-40°C ÷ 80°C),
- możliwość podłączenia do 16 czujników zewnętrznych, elementów sterujących (16 kanałów),
- zapis do pliku z interwałem do 1 ms, pomiar przemieszczenia w zależności od zastosowanego czujnika przemieszczeń (w niniejszej rozprawie dokładność pomiarów wynosi: przemieszczenia – 2,5µm, siła 1 N).

System pracuje w oparciu o szereg zestawów badawczych (kity), pozwalających prowadzić badania w różnych schematach obciążenia. Całość sterowana jest z poziomu komputera za pomocą dedykowanego oprogramowania TestLab [154]. Cechuje się ono interfejsem umożliwiającym

dowolną ingerencję w preinstalowane „*metody badawcze*”, a także opracowywanie nowych, autorskich metod. Oprogramowanie pozwala sterować zarówno samym testem jak i temperaturą wewnątrz komory. Służy także do zapisu i przeglądania wyników archiwalnych. Oprogramowanie pozwala również w wygodny sposób eksportować dane do arkusza kalkulacyjnego, a także przygotowywać czytelne raporty z przeprowadzonych badań (o ile zostały wcześniej zdefiniowane).

System badawczy został rozszerzony w trakcie badań o możliwość pracy zdalnej poprzez połączenie z siecią Internet. To pozwoliło na prowadzenie badań z dowolnego miejsca, również z podglądem badanych próbek online. Ze względu na potrzebę kondycjonowania próbek, a także czas wykonywania samych testów to rozwiązanie stało się bardzo pomocne.

### 3.4. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ

Mieszanki typu SMA-MA wykonano w warunkach laboratoryjnych. Łącznie przygotowano 10 zarobów (dwa zaroby na jeden rodzaj mieszanki, każdy po około 30 kg). Wykorzystano do tego celu mieszadło laboratoryjne zgodnie z PN-EN 12697-35 [N17]. Po wykonaniu zarobów każdą z mieszanek poddawano kondycjonowaniu w temperaturze 145°C przez trzy godziny w celu odwzorowania warunków transportowych (etap ten odbywał się w otwartych tackach). Następnie mieszanki zagęszczano w zagęszczarce walcowej w formach 305×305×100 mm zgodnie z PN-EN 12697-33 [N18]. W tabeli (Tab. 3-8) zestawiono parametry przygotowania próbek MMA

Tab. 3-8 Parametry przygotowania próbek MMA

Parametr	Jednostka	Wartość
Temperatura kruszywa	°C	165
Temperatura asfaltu	°C	180/150*
Temperatura mieszania	°C	165/160*
Temperatura zagęszczenia	°C	145/135*
Czas mieszania (na sucho – kruszywo i mokro – z asfaltem)	min.	5:30/4:30*
Czas kondycjonowania przed zagęszczeniem (w otwartych tackach)	h	3

\*Dotyczy asfaltu niemodyfikowanego 50/70, inna temperatura wynika z temperatur technologicznych dla asfaltu 50/70

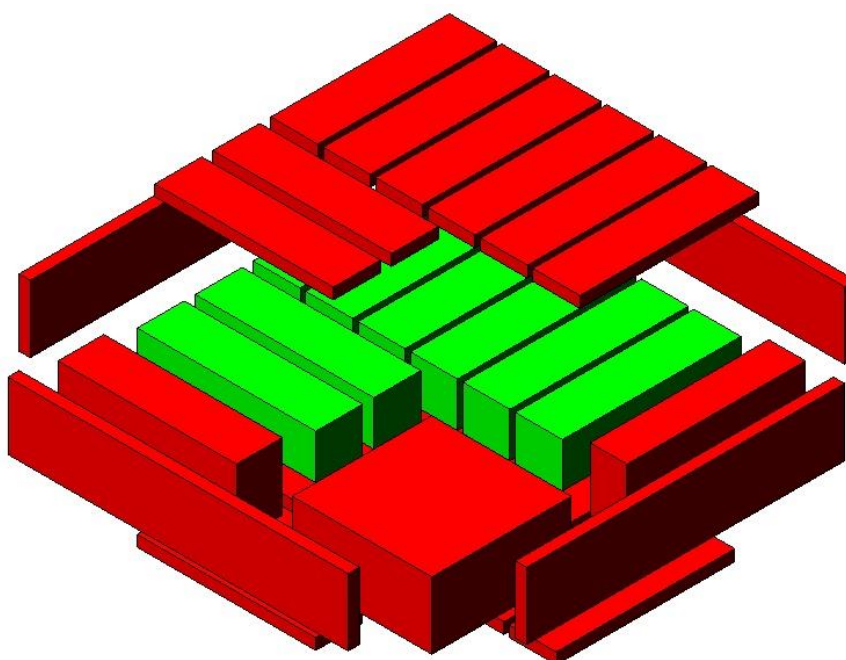
Grubość formowanych płyt wynosiła 60 mm (Rys. 3-11). Przygotowane płyty cięto na próbki analityczne o wymiarach 40×40×160 mm (wymiar zgodnie z normą PN-EN 12697-46). Przyjęto

zasadę, by każda płaszczyzna była docinana (Rys. 3-12 i Rys. 3-13). W przypadku próbek MMA istotny wpływ na wynik badań w niskich temperaturach mają wymiary próbek (efekt skali) [155,156]. Przyjęcie wymiarów 40×40×160 mm w odniesieniu do warstw ochronnych należy uznać za poprawne, ponieważ wymiar 40 mm to standardowa grubość tych warstw. Wymiar ten jest również zgodny z wymaganiami normy badawczej. Otrzymane próbki były mierzone w 8 miejscach (po 3 razy wzdłuż dłuższego boku oraz w dwóch miejscach długość). Dla każdej próbki oznaczano gęstość objętościową i wskaźnik zagęszczenia. Średnie wartości wskaźnika zagęszczenia wyniosły  $99,7\pm 0,5\%$  (gęstość objętościową oznaczono zgodnie z PN-EN 12697-5 [N19] metoda B). Łącznie, dla każdego typu mieszanki uzyskano 32 próbki analityczne, co gwarantowało ewentualny zapas w stosunku do zaplanowanych badań w ilości 5 sztuk próbek.



Rys. 3-11 Przygotowane płyty przed cięciem





Rys. 3-12 Podział płyt na próbki analityczne (kolor zielony), kolor czerwony – materiał odrzucony

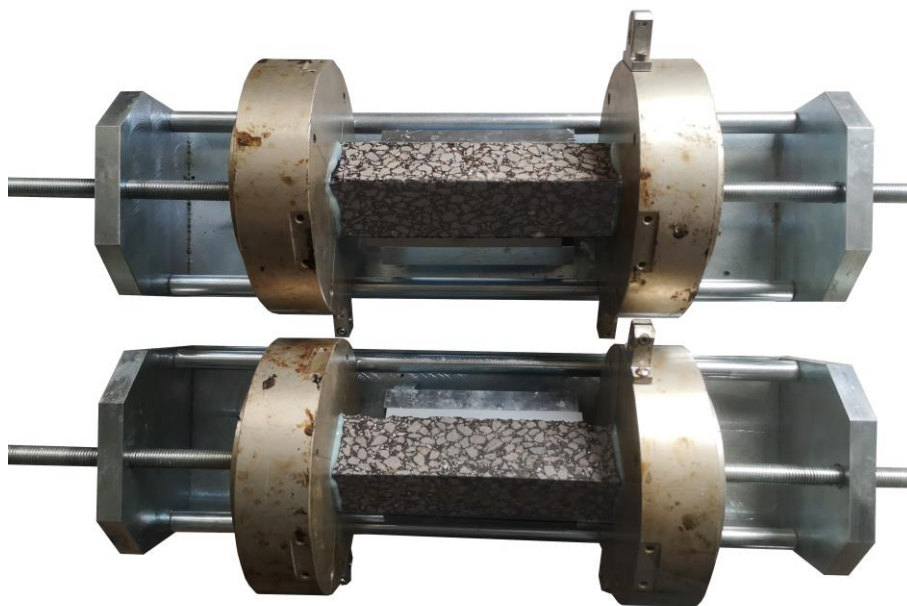


Rys. 3-13 Próbkki analityczne przygotowane do badań

Asfalt lany (MA) został pobrany bezpośrednio z placu budowy w trakcie układania warstwy ochronnej na obiekcie mostowym (droga ekspresowa S3 – województwo zachodniopomorskie). Następnie, w laboratorium mieszankę ponownie rozgrzano do temperatury 205°C. Po osiągnięciu wymaganej temperatury asfalt lany został umieszczony w formach 305×305×100 mm i pozostawiony do ostudzenia. Dogęszczenie prowadzono poprzez obstukiwanie młotkiem gumowym ścian formy.

Wierzchnią warstwę zacierano pacą drewnianą w celu jej wyrównania. Przygotowywanie próbek analitycznych (po oziębieniu mieszanki) odbywało się w sposób analogiczny jak w przypadku mieszanek SMA-MA.

Przygotowanie próbek do przeprowadzenia oznaczeń w DTS-30 polegało na ich przyklejeniu do aluminiowych płyt montażowych. Płyty montażowe pozwalają na zamocowanie próbki w aparaturze badawczej oraz montaż niezbędnych elementów pomiarowych (pręty inwarowe, czujniki przemieszczeń). Klejenie wykonywano za pomocą dwuskładnikowego kleju epoksydowego Loctite EA9466, który zgodnie z kartą techniczną po utwardzeniu cechuje się wytrzymałością na rozciąganie na poziomie 32 MPa [157]. Próbki klejono z wykorzystaniem specjalnego przyrządu/ścisku służącego do precyzyjnego usytuowania próbki. Próbki pozostawiono do wyschnięcia kleju w warunkach normalnych na czas co najmniej 24 godziny (Rys. 3-14). Zgodnie z kartą techniczną producenta kleju pozwala to uzyskać 100% wytrzymałości na rozciąganie (32 MPa w przypadku łączenia ze stalą). Etap klejenia jest bardzo istotny i należy dbać o odpowiednie przygotowanie powierzchni klejonych. Powierzchnie płyt aluminiowych, do których klejone są próbki, muszą być oczyszczone mechanicznie z pozostałości kleju z poprzedniego testu i odtłuszczone za pomocą rozpuszczalnika (aceton). Powierzchnie próbek muszą być oczyszczone z pyłu i dokładnie osuszone. W przeciwnym wypadku może dojść do niewłaściwego zniszczenia próbki, np. na styku kleju i płyty montażowej czy kleju i powierzchni próbki. Po wykonanym teście klej usuwano mechanicznie wraz z pozostałościami próbki po wcześniejszym podgrzaniu do co najmniej 150°C. Klej w tej temperaturze staje się kruchy i można go usunąć mechanicznie.



Rys. 3-14 Klejenie próbek MMA w przymiarze

Próbki po związaniu kleju (przed wykonaniem oznaczenia) poddane były kondycjonowaniu w docelowej temperaturze badania. Kondycjonowanie wykonywano bezpośrednio w komorze klimatycznej urządzenia badawczego. Podejście takie niweluje jakiegokolwiek zmiany temperatury próbki w trakcie montażu w aparaturze badawczej, a także przeniesieniu próbki z zewnętrznej komory termostatującej do komory urządzenia badawczego. Próbki po umieszczeniu w sprzęcie badawczym schładzano do docelowej temperatury badania lub ustalono temperaturę początkową badania w przypadku testu TSRST. Taki sposób prowadzenia kondycjonowania znacząco wydłuża czas prowadzenia badań, zwiększa jednak powtarzalność uzyskiwanych wyników i pozwala na uzyskanie zaplanowanej temperatury w całym przekroju badanej próbki.

W celu uniknięcia powstania naprężeń termicznych wskutek skurczu w trakcie ochładzania próbki do temperatury badania (etap kondycjonowania), programowano aparaturę w taki sposób, aby kompensowała przesuwem siłownika skurcz materiału (sterowanie siłownikiem przy założeniu stałej siły równej 0 kN). Czas kondycjonowania wynosił 8 godzin. W przypadku testu TSRST, ze względu na temperaturę rozpoczęcia badania zbliżoną do temperatury otoczenia (laboratorium), czas kondycjonowania skracano do 4 godzin.

### **3.5. WYBRANE TESTY STATYSTYCZNE WYKORZYSTANE W PRACY**

#### **3.5.1. Analiza wariancji ANOVA**

Analiza wariancji ANOVA (anova – analysis of variance) jest powszechnie stosowaną metodą statystyczną, która pozwala na ocenę istotności różnic wielu średnich. W niniejszej pracy skorzystano

z jednoczynnikowej analizy. Każdorazowo poddany został analizie jeden czynnik dyskretny (rodzaj lepiszcza, zawartość lepiszcza). W obliczeniach skorzystano z oprogramowania *Statistica*. Do podstawowych założeń testów ANOVA należą:

- niezależność zmiennych losowych w rozważanych populacjach (grupach),
- mierzalność analizowanych zmiennych,
- normalność rozkładu zmiennych w każdej populacji (grupie),
- jednorodność wariancji we wszystkich populacjach.

Do sprawdzenia założeń o rozkładzie normalnym oraz jednorodności wariancji posłużono się kolejno testami: Shapiro-Wilka oraz Levene'a.

Hipotezy:

**Hipoteza zerowa  $H_0$ :** Średnie w populacji są sobie równe

$$m_1 = m_2 = m_3 = \dots = m_n$$

**Hipoteza alternatywna  $H_1$ :** co najmniej jedna para średnich nie jest sobie równa (wykazuje istotne różnice, średnie różnią się od siebie).

$$m_i \neq m_j$$

W poszczególnych próbach każdej metody oblicza się średnie ze wzoru (3.3) [158]:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{i,j} \text{ dla } i = 1, \dots, k \quad (3.3)$$

oraz średnią dla wszystkich badanych metod ze wzoru (3.4) [158]:

$$\tilde{x}_i \frac{1}{n} = \sum_{i=1}^{k_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{i,j} \text{ gdzie } n = \sum_{i=1}^k n_i \quad (3.4)$$

Następnie oblicza się sumy kwadratów odchyłeń średnich poszczególnych grup od średniej globalnej (3.5) oraz sumy kwadratów odchyłeń wyników prób od ich średnich w grupach (3.6) [158]:

$$SS_{efekt} = \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \tilde{x}_i)^2 n_j \quad (3.5)$$

$$SS_{błęd} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (3.6)$$

W dalszej kolejności wyznacza się wariancję (3.7), (3.8) oraz statystykę  $F$  Fishera (3.9) [158]:

$$MS_{efekt} = \frac{SS_{efekt}}{k - 1} \quad (3.7)$$

$$MS_{błęd} = \frac{SS_{błęd}}{n - k} \quad (3.8)$$

$$F = \frac{MS_{efekt}}{MS_{błęd}} \quad (3.9)$$

W programie *Statistica*, w przypadku uzyskania wartości p-value na poziomie  $p < \alpha = 0,05$ , należy odrzucić hipotezę zerową na rzecz hipotezy alternatywnej. Oznacza to, że przynajmniej jedna para średnich jest sobie równa. Aby określić, które średnie różnią się istotnie i wyodrębnić grupy jednorodne należy przeprowadzić test typu „post-hoc”. Może to być np. test HSD Tukeya, który jest jednym z bardziej polecanych testów do porównywania par średnich. Jest on bardziej liberalny od testu Schaffe i jednocześnie bardziej konserwatywny niż test NIR [159].

### 3.5.2. Test W Shapiro -Wilka

Test  $W$  Shapiro-Wilka przedstawiony w roku 1965, w porównaniu do innych testów sprawdzających normalność rozkładu, cechuje się najwyższą mocą testu i nadaje się do badania prób o małej liczności [160]. Statystyka testu  $W$  określona jest wzorem [161] (3.10):

$$W = \frac{\left( \sum_{i=1}^{\binom{n}{2}} a_i(n) (\tilde{x}_{n-i+1} - \tilde{x}_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.10)$$

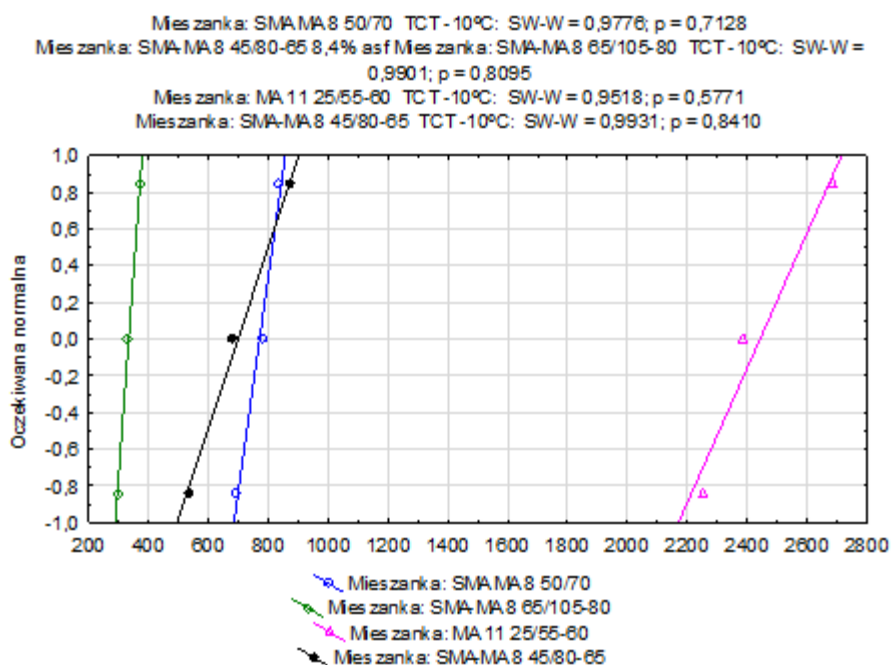
gdzie:

$a_{n,i}$  – stała zależna od  $(n, i)$ , współczynniki  $a_i(n)$  są stabilizowanymi współczynnikami testu przy liczności próby  $n$ ,

$x_i$  – wartość średnia w danej klasie,

$\bar{x}$  – wartość średnia.

W pracy każdorazowo wykonywano wykres normalności rozkładu, na którym zamieszczano wartość statystyki  $W$  (Rys. 3-15). Interpretacja testu jest następująca: w przypadku wartości prawdopodobieństwa  $p \geq \alpha = 0,05$  nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu. Na wykresie (Rys. 3-15) oprócz statystyki  $W$  zawarto wykres normalności, na którym wykreślono zmienną względem „oczekiwanej dla rozkładu normalnego”.



Rys. 3-15 Przykładowy wykres normalności wraz z statystykami testu Shapiro-Wilka

### 3.5.3. Test Levene'a

Test Levene'a został opracowany w roku 1960 i służy do badania jednorodności (homogeniczności) wariancji [162]. Korzystanie z niego wymaga spełnienia dwóch warunków, tj.:

- wartości w każdej grupie muszą mieć rozkład normalny,
- liczebność grup musi być podobna.

W teście tym hipoteza zerowa wskazuje na równość wariancji, hipoteza alternatywna wskazuje na niejednorodność (heterogeniczność). Statystyka Levene'a określona jest tym samym wzorem co analiza wariancji, przy czym analizuje się bezwzględne odchyłki od średniej zamiast wyników badań.

W programie *Statistica*, w przypadku uzyskania prawdopodobieństwa  $p \geq \alpha = 0,05$ , nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Tym samym wariancje można uznać za jednorodne.

#### 3.5.4. Test HSD Tukeya

Analiza wariancji pozwala przetestować hipotezę o równości średnich. W przypadku odrzucenia hipotezy zerowej przyjmuje się hipotezę alternatywną, która mówi tylko o zaistniałej różnicy [163]. W oparciu o dodatkowe testy statystyczne można wyodrębnić grupy, których średnie różnią się między sobą. Testami do tego typu porównań są testy *post-hoc*. Jednym z nich jest test HSD Tukey'a, (*ang. honestly significant difference* – uczciwie istotna różnica), który wykorzystano w niniejszej pracy.

#### 3.5.5. Porównanie nachylenia prostych regresji

W celu sprawdzenia równości współczynników regresji liniowej pochodzących z dwóch niezależnych populacji wykorzystano test *t*. Test ten ma następujące hipotezy:

**Hipoteza zerowa  $H_0$ :** współczynniki są sobie równe

$$a_1 = a_2$$

**Hipoteza alternatywna  $H_1$ :** współczynniki nie są sobie równe:

$$a_1 \neq a_2$$

W statystyce jednym z założeń są:

- znane są licznosci obu prób  $n_1$  i  $n_2$ ,
- znane są odchylenia standardowe dla wartości obu cech w obu próbach:  $sd_{x1}$ ,  $sd_{y1}$ ,  $sd_{x2}$ ,  $sd_{y2}$ ,
- znane są współczynniki korelacji liniowej Pearsona obu prób:  $r_{p1}$ ,  $r_{p2}$ .

Statystykę testową *t* [164] opisuje się wzorami (3.11) (3.12) i (3.13):

$$t = \frac{a_1 - a_2}{\sqrt{\frac{s_{yx1}^2}{sd_{x1}^2(n_1 - 1)} + \frac{s_{yx2}^2}{sd_{x1}^2(n_2 - 1)}}} \quad (3.11)$$

gdzie:

$$s_{yx1} = sd_{y1} \sqrt{\frac{n_1 - 1}{n_1 - 2} (1 - r_{p1}^2)} \quad (3.12)$$

$$s_{yx2} = sd_{y2} \sqrt{\frac{n_2 - 1}{n_2 - 2} (1 - r_{p2}^2)} \quad (3.13)$$



## 4. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA

### 4.1. BADANIE ROZCIĄGANIA PROSTEGO UTST

Badanie rozciągania prostego miało posłużyć przede wszystkim do określenia wartości granicznych naprężenia ( $\sigma$ ) i odkształcenia ( $\varepsilon$ ) w analizowanych próbkach MMA. Wykonano po dwa oznaczenia dla każdego typu mieszanki. Wyniki zestawiono w tabeli (Tab. 4-1).

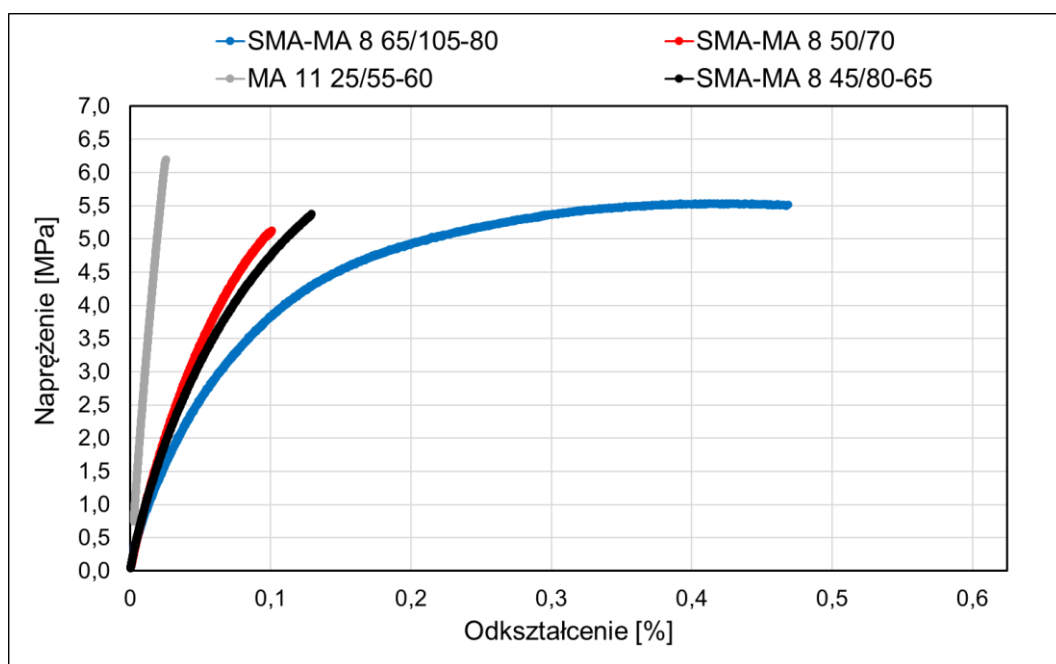
Tab. 4-1 Zestawienie wyników i wartości średnich uzyskanych w badaniu UTST

T [°C]	Mieszanka	Próbka 1		Próbka 2		Średnie	
		$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]
-10	SMA-MA 8 50/70	5,1	0,1009	5,2	0,1033	5,2	0,1021
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	6,7	0,1345	6,2	0,0985	6,4	0,1165
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	5,5	0,1275	5,4	0,1293	5,4	0,1284
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	6,7	0,0855	6,0	0,0616	6,4	0,0736
	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	5,3	0,5560*	5,6	0,4143*	5,4	0,4852
	MA 11 PmB 25/55-60	6,3	0,0493	6,5	0,0368	6,4	0,0431
-15	SMA-MA 8 50/70	5,0	0,0506	5,0	0,0550	5,0	0,0528
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	6,6	0,0477	6,5	0,0422	6,5	0,045
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	5,4	0,1554	5,8	0,0835	5,6	0,1195
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	5,7	0,0395	6,1	0,0455	5,9	0,0425
	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	7,0	0,1554	6,2	0,1315	6,6	0,1435
	MA 11 PmB 25/55-60	6,8	0,0334	6,8	0,0309	6,8	0,0322
-25	SMA-MA 8 50/70	4,2	0,0115	3,9	0,0176	4,0	0,0146
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	6,6	0,0167	5,6	0,0204	6,1	0,0186
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	5,2	0,0293	5,8	0,0162	5,5	0,0228
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	5,7	0,0190	4,8	0,0191	5,2	0,0191
	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	5,93	0,0322	6,9	0,0342	6,4	0,0332
	MA 11 PmB 25/55-60	5,8	0,0125	6,3	0,0131	6,1	0,0128

\*Iepkie płynięcie

Analiza wykresu (Rys. 4-1) zależności naprężenia od czasu z przeprowadzonego oznaczenia UTST świadczy o tym, że w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  mieszanka SMA-MA z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA 65/105-80 wykazuje się nadal lepkosprężystym charakterem pracy (Rys. 4-1). W próbce, po osiągnięciu maksymalnego naprężenia na rozciąganie, w dalszym ciągu obserwuje się przyrost odkształceń, bez powstania widocznego zniszczenia (materiał podlega zjawisku płynięcia). Mieszanka typu asfalt lany w tej samej temperaturze ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) cechuje się najmniejszymi odkształceniami (Rys. 4-1). Charakter odkształceń wskazuje, że mieszanka MA pracuje w zakresie sprężysto-kruchym (to zachowanie dotyczy całego zakresu temperatur, w których wykonano

badania). Wraz z spadkiem temperatury oznaczenia we wszystkich mieszankach odnotowano spadek wartości maksymalnych odkształceń.



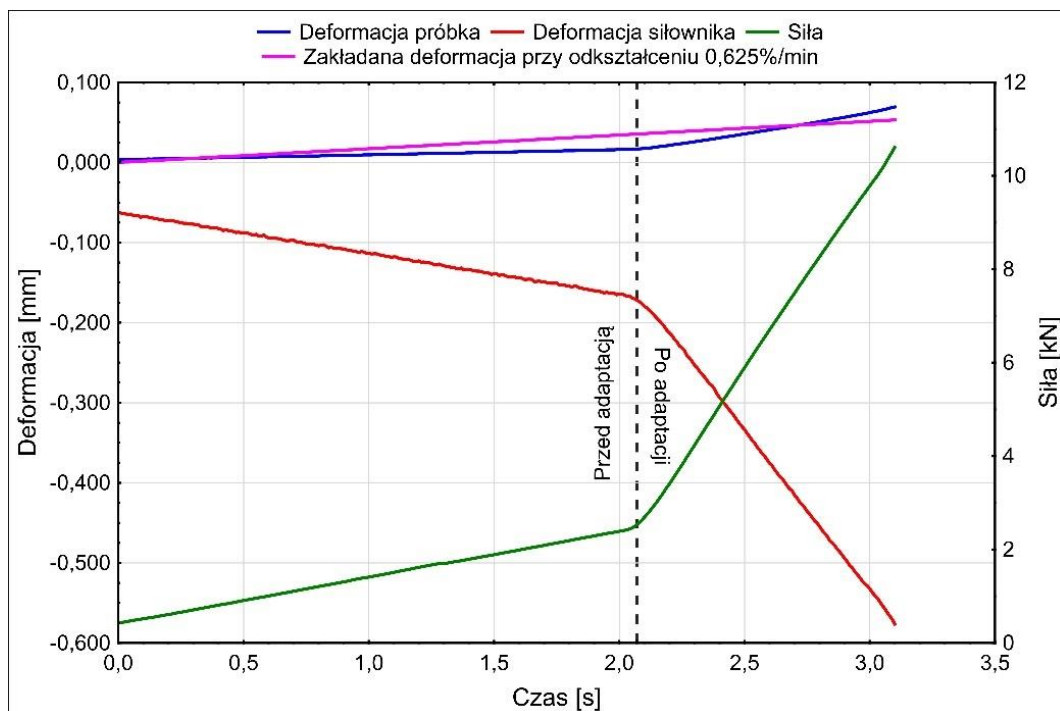
Rys. 4-1 Przykładowy wykres przyrostu naprężenia w czasie dla mieszanek SMA-MA 8 oraz MA 11 w temperaturze -10°C

Po analizie uzyskanych wyników w teście UTST podjęto decyzję, że test pełzania (TCT) będzie wykonywany przy stałym naprężeniu równym 1,5 MPa, niezależnie od temperatury badania oraz rodzaju mieszanki. Wartość ta stanowi około 25% średniej wszystkich uzyskanych wyników, niezależnie od temperatury badania. Podejście takie pozwoli na dokonanie porównania ze sobą wszystkich otrzymanych wyników, zarówno w zakresie różnic pomiędzy poszczególnymi mieszankami jak i temperaturą wykonanego oznaczenia. W przypadku testu relaksacji naprężeń (RT) przyjęto zasadę, że przykładowe odkształcenie będzie odpowiadać około 40% odkształceń maksymalnych.

Teoretycznie najprostszy test UTCT okazał się problematyczny w wykonaniu. Zgodnie z normą badawczą [148] próbka powinna być odkształcana ze stałą prędkością 0,625%/min. Przy długości próbki 160 mm odpowiada to rozciąganiu z prędkością 1 mm/min. Badania są prowadzone w niskich (ujemnych) temperaturach, w których analizowane materiały są praktycznie nieodkształcalne. To powoduje, że czas badania wynosi ok. 3-4 sekund (Rys. 4-2). Nadanie urządzeniu odpowiedniej prędkości przesuwu siłownika (jak w urządzeniach starszego typu, np. Prasa Marshalla lub inne urządzenia bez możliwości kontroli odkształcenia) nie gwarantuje odkształcalności próbki na tym samym poziomie. W rzeczywistości aparatura badawcza również ulega odkształceniu (rama, czujnik siły, płyty montażowe itp.). To powoduje, że rzeczywiste

pomierzone odkształcenie na próbce jest mniejsze niż odkształcenie siłownika. Nawet zastosowanie nowoczesnej i zaawansowanej technicznie aparatury badawczej typu DTS-30 nie eliminuje tego problemu i w efekcie tego otrzymuje się nieliniową deformację próbki (Rys. 4-2). Przy założeniu adaptacyjnej kontroli celu (zmiana prędkości przesuwu siłownika w zależności od rzeczywistego odkształcenia próbki w trakcie badania) oraz odpowiednio przyjętego współczynnika sztywności ramy, nie jest możliwe zachowanie założonej prędkości odkształcenia próbki. Wynika to ze zbyt krótkiego czasu, jaki pozostaje na adaptację warunków obciążenia.

Rozwiązaniem dla niskich temperatur mogłoby być badanie rozciągania przy stałym przyroście naprężenia (podobnie jak w betonach cementowych). Jednak ten sposób obciążenia nie byłby właściwy w „wysokich” (ponad 0 °C) oraz pośrednich temperaturach (nieznaczenie poniżej 0 °C), ponieważ przy znacznej odkształcalności badanego materiału aparatura nie miałaby możliwości utrzymać wzrostu naprężeń na zadanym poziomie. Mając to na uwadze, test UTST powinien służyć głównie do określenia wartości naprężeń oraz odkształceń granicznych, które będą wykorzystane w testach bardziej zaawansowanych, takich jak test pełzania (TCT) i test relaksacji naprężeń (RT).



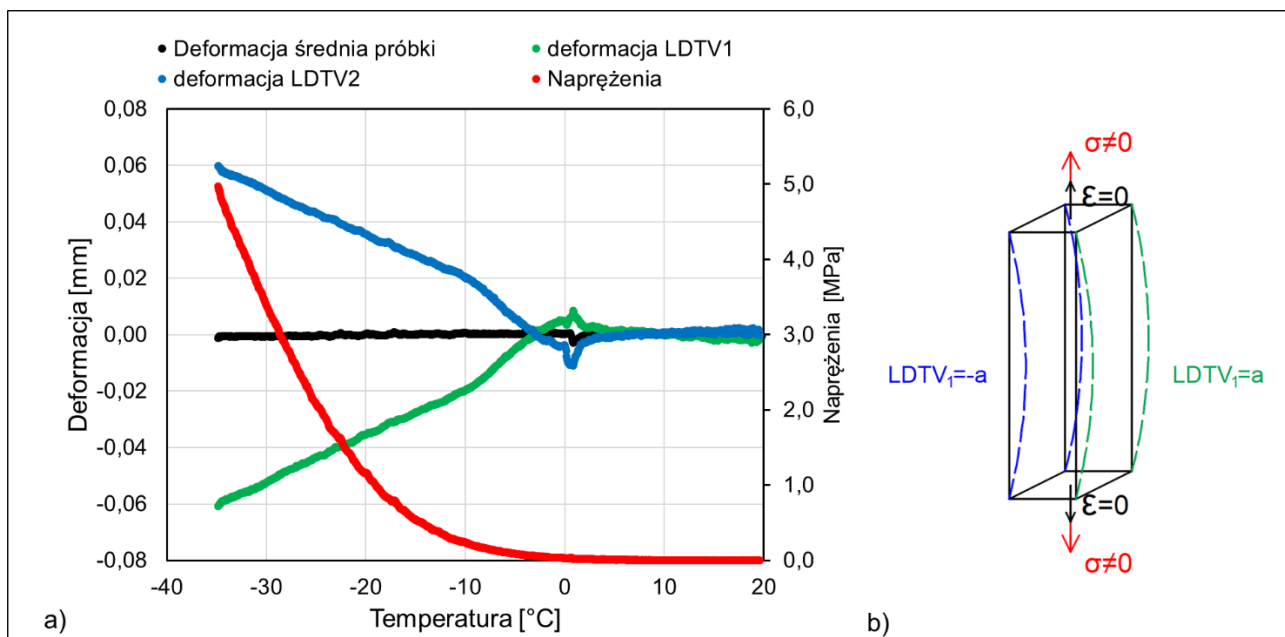
Rys. 4-2 Przekładowy wykres w badaniu UTST z uwzględnieniem adaptacji aparatury badawczej (mieszanka SMA-MA 8 PmB 45/80-65, zawartość lepiszcza: 7,9%; temperatura badania: -15°C), końcowa wartość prędkości przyrostu odkształcenia wynosi 0,817%/min

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz obserwacji można sformułować wnioski, odnoszące się do wyników z oznaczenia UTCT:

- w każdej z temperatur, w których prowadzono badania, mieszanki typu asfalt lany cechowały się najmniejszymi odkształceniami przy zniszczeniu;
- naprężenia przykładane do próbki w teście pełzania TCT na poziomie 1,5 MPa będą stanowiły około 25% wartości średniej wszystkich wyników pomierzonych naprężeń przy zniszczeniu, niezależnie od temperatury badania i rodzaju mieszanki;
- odkształcenie przykładane w teście relaksacji naprężeń RT będzie odpowiadało około 40% odkształceń granicznych uzyskanych w badaniu UTST dla każdej z temperatur i rodzajów mieszanki;
- w mieszance SMA-MA z miękkim lepiszczem asfaltowym wysokomodyfikowanym HiMA 65/105-80 w temperaturze -10°C obserwuje się przyrost odkształceń przy praktycznie stałej wartości naprężenia (próbka wykazuje się lepkiem płynięciem).

#### **4.2. BADANIE TSRST**

Badanie TSRST zostało opisane szerzej w podrozdziale 3.1.2. Badanie polega na ochładzaniu próbki przy stałym gradiencie temperatury i notowaniu wzrostu naprężeń w próbce (zamocowanej na sztywno), spowodowanych skurczem materiału. W trakcie prac przeprowadzono łącznie 18 badań TSRST (po 3 na każdy typ mieszanki). Pozwoliło to uzyskać wartości temperatury zniszczenia i maksymalnych naprężeń. Przykładowy wykres zależności pomiędzy naprężeniami i temperaturą w teście TSRST przedstawiono na rysunku (Rys. 4-3). Na wykresie przedstawiono również pomierzone przemieszczenia próbki na poszczególnych czujnikach LDTV. Obok wykresu przedstawiono w formie schematycznej zmiany kształtu próbki w wyniku jej zginania i skręcania w trakcie badania. Istotne jest, by w teście średnie mierzone przemieszczenie siłowników wynosiło 0 (kolor czarny na wykresie). Zginanie próbki w trakcie ochładzania jest wynikiem między innymi: precyzji wycięciu próbki, możliwemu nierównomiernemu ochładzaniu próbki w komorze, niecentrycznemu przyklejeniu próbki.



Rys. 4-3 a) Przykładowy wykres uzyskany w badaniu TSRST wraz zmierzonymi przemieszczeniami czujników LDTV, b) schemat próbki wraz z rejestrowanymi przemieszczeniami i naprężeniami

Wyniki wszystkich przeprowadzonych oznaczeń zestawiono w tabelach (Tab. 4-2, Tab. 4-3). Najmniej korzystne wyniki (najwyższa wartość temperatury, przy której wystąpiło pęknięcie) odnotowano dla mieszanki asfaltu lanego (MA). Średnia wartość temperatury pęknięcia dla tej mieszanki wyniosła  $-26,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mimo zastosowania asfaltu modyfikowanego polimerami PmB 25/55-60. Największą odpornością na spękania niskotemperaturowe cechowała się mieszanka SMA-MA 8 z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA 65/105-80. Uzyskana średnia wartość temperatury w tym przypadku wyniosła  $-35,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Temperatury pęknięcia w przypadku pozostałych mieszanek SMA-MA były również niższe niż dla asfaltu lanego. Najwyższą temperaturą pęknięcia (średnia:  $-29,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) z mieszanek mastykowo-grysowych cechowała się mieszanka SMA-MA 8 z asfaltem 50/70. Różnica na korzyść mieszanki SMA-MA w stosunku do MA 11 w tym przypadku wyniosła  $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tab. 4-2 Wartości temperatury przy zniszczeniu w teście TSRST [ $^{\circ}\text{C}$ ]

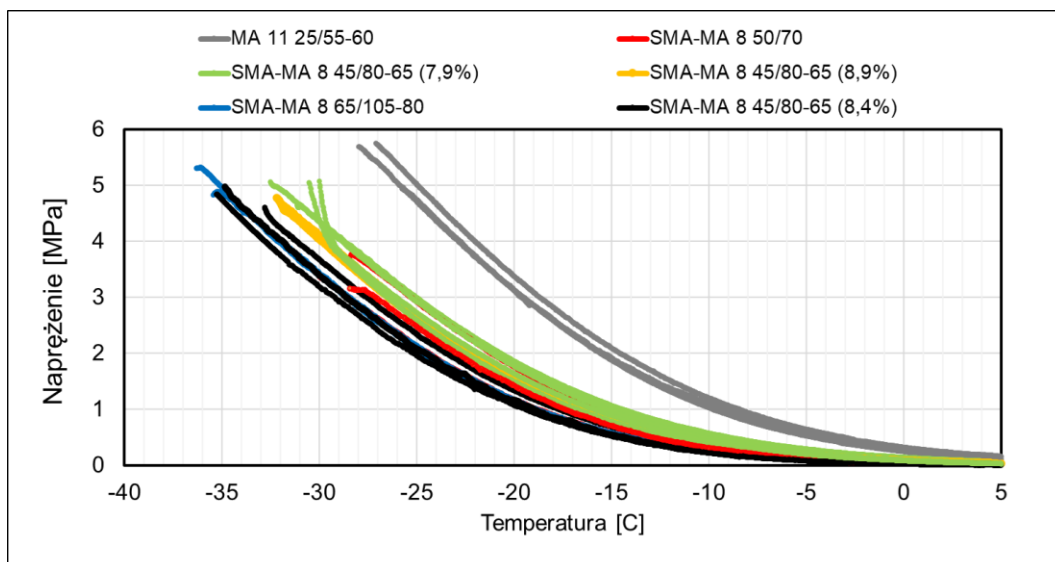
Numer oznaczenia	SMA-MA 8 50/70	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	MA 11 PmB 25/55-65
1	-30,0	-31,1	-34,8	-32,2	-35,4	-28,0
2	-28,5	-30,0	-35,3	-31,9	-34,4	-25,7
3	-28,4	-32,5	-32,8	-30,5	-36,3	-27,1
Średnia	-29,0	-31,2	-34,3	-31,5	-35,4	-26,9
Odch. stand	0,87	1,25	1,33	0,90	0,95	1,13
Wsp. zmien.	3,0%	4,0%	3,9%	2,9%	2,7%	4,2%

Tab. 4-3 Wartości maksymalnych naprężeń w teście TSRST [MPa]

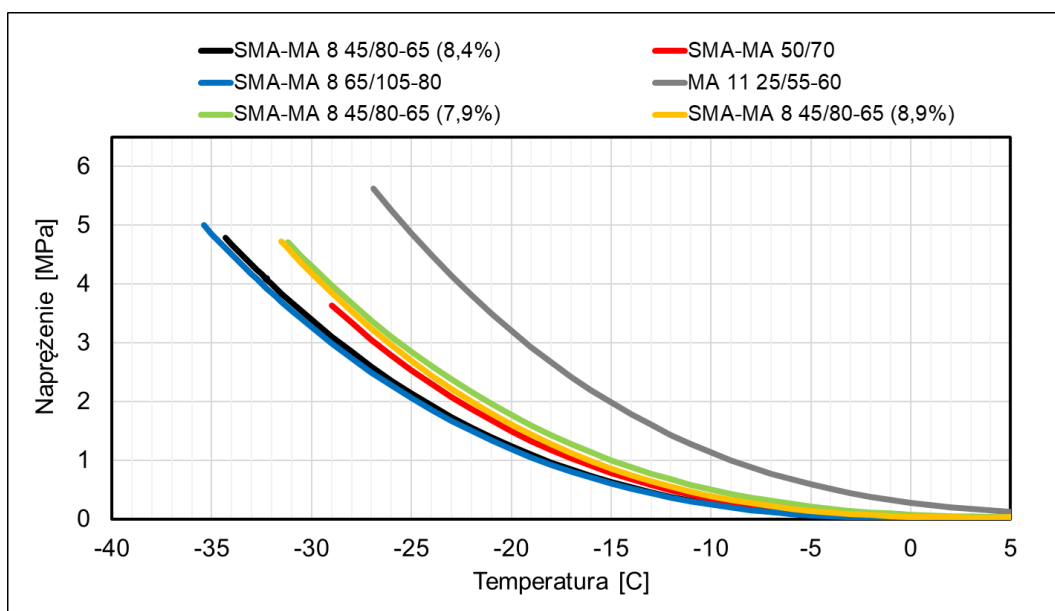
Numer oznaczenia	SMA-MA 8 50/70	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	MA 11 PmB 25/55-65
1	3,2	4,6	5,0	4,8	4,9	5,7
2	3,4	5,1	4,9	4,7	4,7	4,9
3	3,8	5,1	4,6	5,0	5,3	5,7
Średnia	3,5	4,9	4,8	4,8	5,0	5,5
Odch. stand	0,31	0,24	0,19	0,19	0,32	0,45
Wsp. zmien.	8,9%	4,9%	4,0%	4,0%	6,4%	8,2%

Uzyskane wyniki z badań TSRST przedstawiono na wykresie zależności naprężenia od temperatury (Rys 4-4). W celu lepszego zobrazowania wyników uzyskane wartości aproksymowano do wielomianu stopnia 3. Takie podejście zaprezentowano między innymi w pracy [165]. Następnie, uzyskane krzywe opisane wielomianem stopnia trzeciego, uśredniano i ponownie aproksymowano (Rys 4-5). Krzywe uzyskane dla mieszanek SMA-MA 8 (niezależnie od rodzaju i zawartości lepiszcza) tworzą pewien wspólny obszar, różniący się od wyników uzyskanych dla mieszanki typu asfalt lany. Każdy z wyników uzyskanych dla mieszanek SMA-MA 8 świadczy o ich większej odporności na spękania niskotemperaturowe.

Wpływ zawartości lepiszcza na temperaturę pęknięcia analizowano na przykładzie mieszanki SMA-MA 8 z asfaltem PMB 45/80-65. Zmiana zawartości lepiszcza o  $\pm 0.5\%$  (w stosunku do optymalnej) nie pozwala na ustalenie zależności pomiędzy zawartością lepiszcza a temperaturą pęknięcia. Jest to zbieżne z wynikami badań innych autorów [114–116]. Można domniemywać, że istnieje natomiast zawartość optymalna lepiszcza, która będzie przekładała się na najniższą możliwą temperaturę pęknięcia.



Rys 4-4 Wykres naprężeń od temperatury uzyskane w teście TSRST

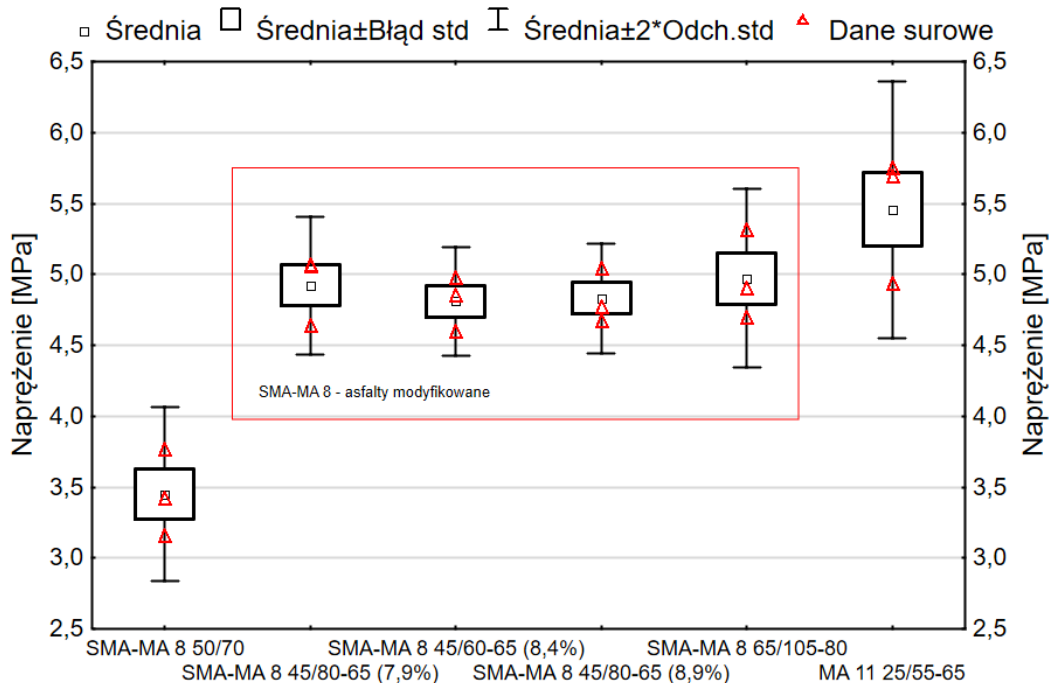


Rys 4-5 Wykres naprężeń od temperatury uzyskane w teście TSRST po aproksymacji do wielomianu stopnia 3 i uśrednieniu wyników i ponowną aproksymację

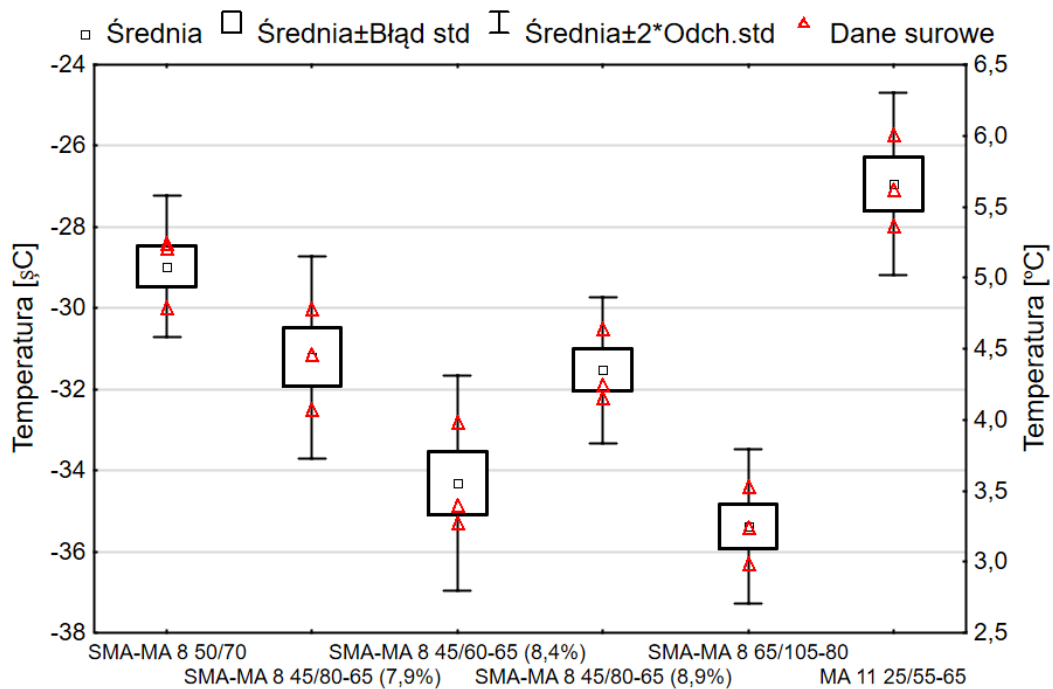
W następnym kroku poddano analizie rozkłady poszczególnych wyników. Na rysunkach ( Rys. 4-6 i Rys. 4-7) przedstawiono wykres ramka-wąsy zawierający: poszczególne wyniki, wartości średnie, odchylenie standardowe oraz  $2 \times$  odchylenie standardowe. Wykonano również analizę wariancji i testy post-hoc określające grupy jednorodne (Tab. 4-4; Tab. 4-5). Sprawdzenie założeń do analizy wariancji zawarto w załączniku nr 2.

Analiza wyników pozwala na wysunięcie stwierdzenia, że pod względem naprężeń maksymalnych wszystkie mieszanki (również asfalt lany) z wyjątkiem SMA-MA 8 z asfaltem 50/70 nie różnią się istotnie. W przypadku temperatury pęknięcia sytuacja nie jest taka jednoznaczna. Mimo

to można stwierdzić, że ze względu na temperaturę pęknięcia asfalt lany nie różni się istotnie od mieszanki SMA-MA z asfaltem 50/70. Pozostałe mieszanki tworzą jeszcze trzy grupy. Mieszanka z asfaltem wysokomodyfikowanym nie różni się istotnie statystycznie od mieszanki o optymalnej zawartości asfaltu 45/80-65 (8,4%) – tab. 4.4.



Rys. 4-6 Wykres ramka-wąsy uzyskanych wyników – naprężenia maksymalne



Rys. 4-7 Wykres ramka-wąsy uzyskanych wyników – temperatura pęknięcia



Tab. 4-4 Wyniki testu Tukeya dla naprężeń maksymalnych

<b>Test HSD Tukeya;</b> <b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b> <b>Błąd: MS międzygrupowe = 0,08834, df = 12,000</b>			
Mieszanka	Średnie	1	2
SMA-MA 8 50/70	3,5		****
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	4,8	****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	4,8	****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	4,9	****	
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	5,0	****	
MA 11 PmB 25/55-65	5,5	****	

Tab. 4-5 Wyniki testu Tukeya dla temperatury zniszczenia

<b>Test HSD Tukeya;</b> <b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b> <b>Błąd: MS międzygrupowe = 1,1797, df = 12,000</b>					
Mieszanka	Średnie	1	2	3	4
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	-35,4		****		
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	-34,3		****	****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	-31,5	****		****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	-31,2	****			
SMA-MA 8 50/70	-29,0	****			****
MA 11 PmB 25/55-65	-26,9				****

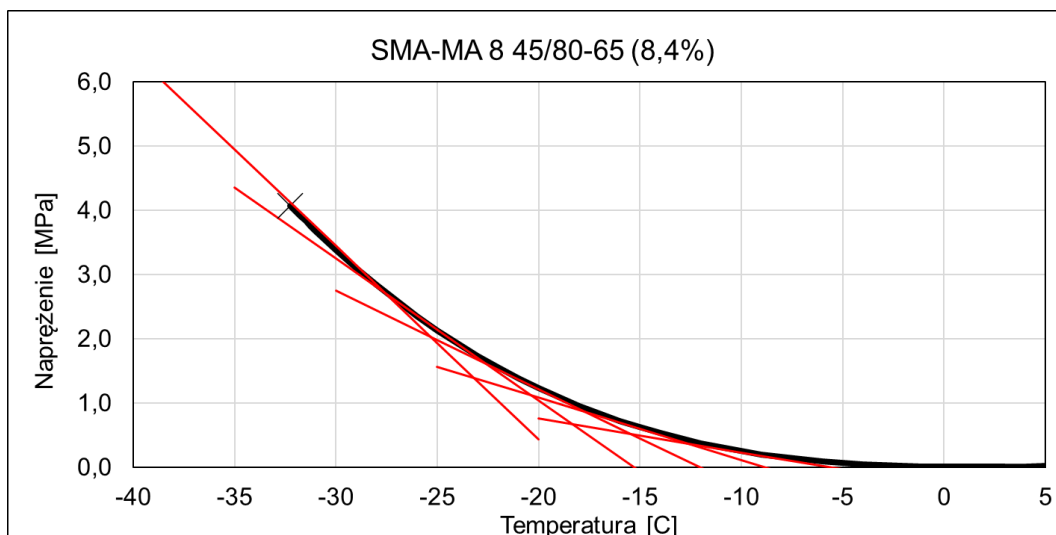
Ostatnim krokiem było wyznaczenie prostych, stycznych do wielomianów opisujących wzrost naprężeń, podobnie jak w pracy [166]. Pozwoliło to na ocenę prędkości przyrostu naprężeń. Analizy dokonano w punktach charakterystycznych (-5, -10, -15, -25, -30 °C), korzystając zależności (4.1) i (4.2):

$$y = f'(x_0)x + b \quad (4.1)$$

gdzie:

$$b = f(x_0) - f'(x_0)x_0 \quad (4.2)$$

Przykładowy wykres z naniesionymi prostymi przedstawiono na wykresie (Rys. 4-8).



Rys. 4-8 Proste, styczne do wykresu funkcji opisującej wzrost naprężeń mieszanki SMA-MA 8 z asfaltem PmB 45/80-65 (8,4% asf.) w badaniu TSRST

W tabeli (Tab. 4-6) zamieszczono dla poszczególnych mieszanek zestawienie otrzymanych wartości współczynników kierunkowych. Opisują one prędkość przyrostu naprężeń w poszczególnych punktach charakterystycznych. Analiza wyników pozwala stwierdzić, że w całym zakresie najwolniej naprężenia przyrastają w mieszance SMA-MA 8 z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA 65-105/80. Wartości bezwzględne współczynników kierunkowych prostych dla mieszanki MA w każdym z punktów charakterystycznych są znacznie większe od pozostałych mieszanek. W szczególności widoczne jest to w temperaturach bliższych 0 °C. W mieszankach typu MA skurcz, a za nim wzrost naprężeń, rozpoczyna się szybciej. Zniszczenia w MA następują wcześniej niż w mieszankach SMA-MA, mimo większej wytrzymałości na rozciąganie uzyskanej w teście TSRST.

Tab. 4-6 Współczynniki kierunkowe prostych w punktach charakterystycznych (wartości bezwzględne)

Temperatura °C	SMA-MA 8 50/70	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	MA 11 PmB 25/55-65
-5	0,028	0,045	0,021	0,038	0,022	0,084
-10	0,064	0,081	0,053	0,073	0,052	0,137
-15	0,111	0,204	0,097	0,118	0,093	0,204
-20	0,170	0,184	0,153	0,173	0,144	0,286
-25	0,242	0,251	0,221	0,239	0,205	0,381
-30	-*	0,490	0,301	0,314	0,278	-*

\*Uszkodzenie próbki przy temperaturze >-30 °C

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analiz można sformułować następujące wnioski:

- mieszanki SMA-MA cechują się znacznie większą odpornością na spękania niskotemperaturowe niż mieszanka asfaltu lanego,
- modyfikacja asfaltu polimerem zwiększa odporność na spękania niskotemperaturowe, prawdopodobnie poprzez wzrost wytrzymałości na rozciąganie;
- wykorzystanie asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA 65/105-80 wpływa pozytywnie na odporność na spękania niskotemperaturowe. Zbliżony efekt uzyskano dla mieszanki SMA-MA 8 PmB 45/80-65 z optymalną zawartością asfaltu (8.4%) (różnica ta jest statystycznie nieistotna);
- przyrost naprężeń w mieszankach SMA-MA jest znacznie wolniejszy niż w mieszankach typu MA,
- większa wartość naprężenia przy zniszczeniu w mieszankach typu MA nie przekłada się na niższą temperaturę, przy której próbki pękają (wiąże się to z znacznie szybszym przyrostem naprężeń wraz z spadkiem temperatury w mieszance MA);
- badanie TSRST pozwala oceniać mieszanki w przypadku znacznych różnic w odporności na spękania niskotemperaturowe (w przypadku małych różnic wyniki mogą być niejednoznaczne);
- badanie TSRST może być z powodzeniem wykorzystywane do porównań mieszanek mineralno-asfaltowych.

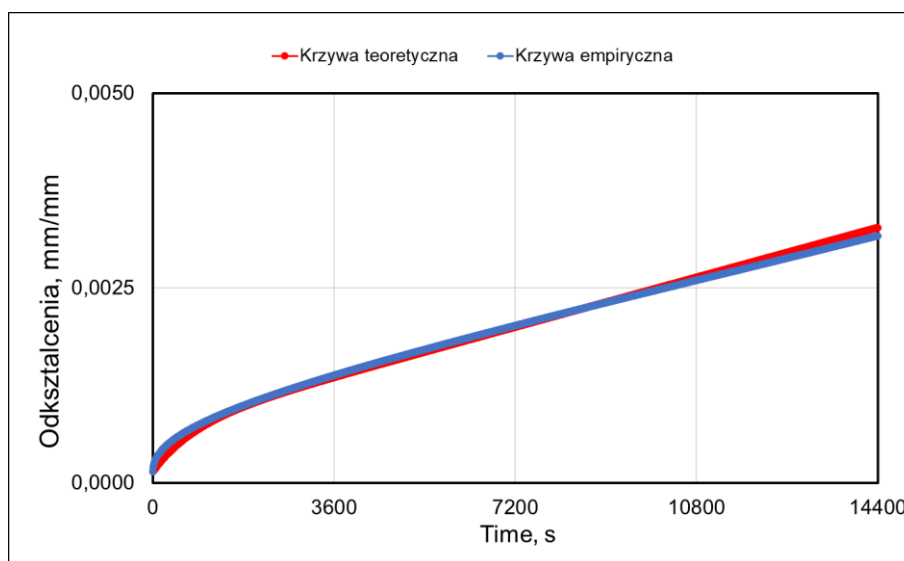
### **4.3. BADANIE PEŁZANIA TCT**

#### **4.3.1. Określenie parametrów reologicznych MMA na podstawie pełzania**

W badaniu pełzania (TCT), które zostało opisane w rozdziale 3.1.2, określano zmianę odkształcenia w czasie przy stałym naprężeniu i po odciążeniu próbki. Wykonano łącznie 36 oznaczeń. Czas pojedynczego oznaczenia wynosił 21600 sekund.

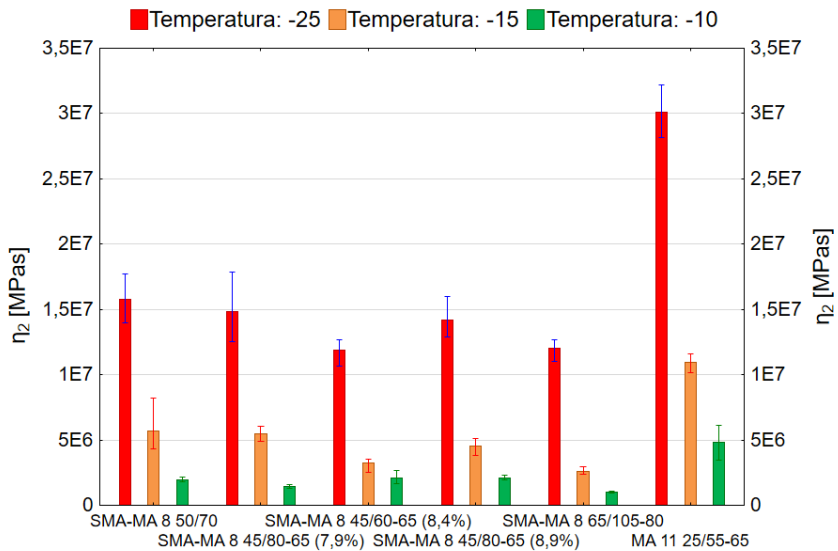
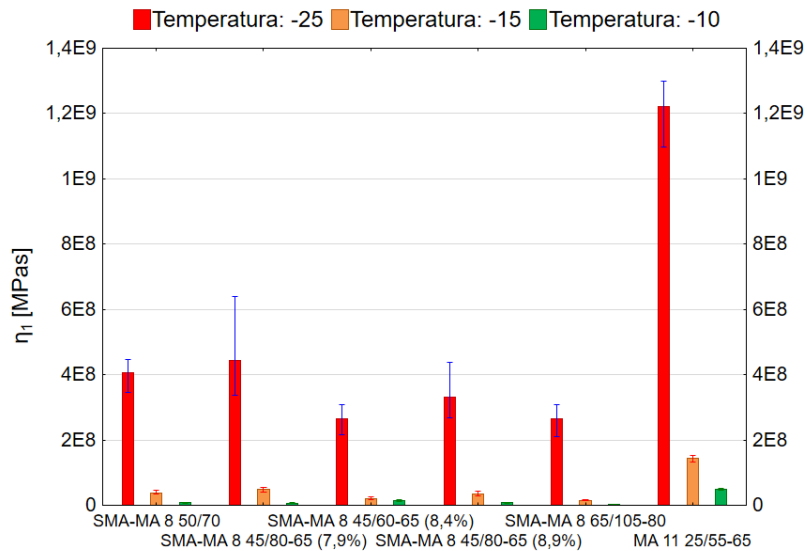
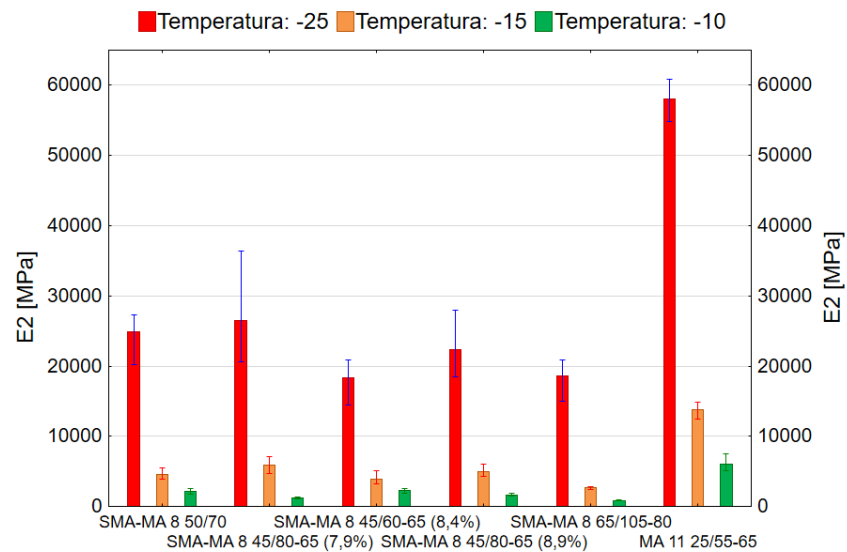
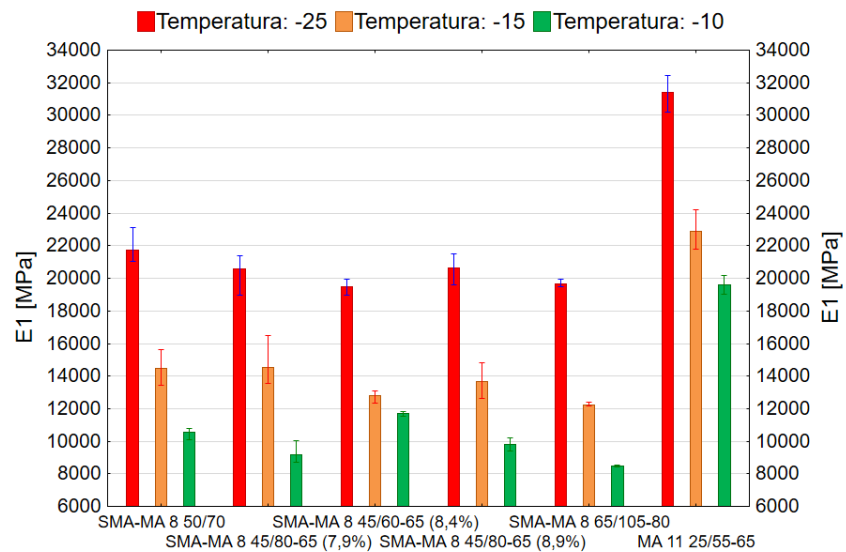
Każdorazowo, za pomocą metody najmniejszych kwadratów [159], wyznaczano parametry modelu Burgersa ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ). Obliczenia wykonywano bazując na wartościach odkształcenia uzyskanych w badaniu z fazy obciążenia. Korzystano przy tym z wzorów (2.6), (3.1), a czas relaksacji wyznaczano z wzoru (3.2). Przykładowy wykres odkształceń w czasie uzyskany w badaniu TCT (dla etapu obciążenia) wraz z krzywą teoretyczną uzyskaną na podstawie obliczeń przedstawiono na Rys. 4-9. Wartości parametrów modelu Burgersa z przeprowadzonych obliczeń dla poszczególnych mieszanek w zależności od temperatury przedstawiono w tabelach (Tab. 4-7, Tab. 4-8, Tab. 4-9), oraz zamieszczono na wykresach słupkowych (Rys. 4-10). Wyniki przeprowadzonych obliczeń z wykorzystaniem sumy najmniejszych kwadratów zawarto w załączniku numer 3. Poszczególne

dopasowania należy uznać na podstawie otrzymanych wykresów krzywych teoretycznych i empirycznych za zadowalające i przydatne do dalszych analiz. Założone kryterium zbieżności zostało osiągnięte.



Rys. 4-9 Wartości rzeczywiste z pomiarów oraz krzywa teoretyczna modelu Burgersa w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  (SMA-MA 8 50/70) dla fazy obciążenia

Przy ocenie parametrów niskotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych najistotniejsze znaczenia mają wartości  $E_1$  oraz  $\eta_1$  [167]. Analiza tych parametrów (Rys. 4-10) wyraźnie wskazuje na istotną różnicę pomiędzy mieszankami MA i SMA-MA w każdej z temperatur badania. Uzyskane parametry modelu Maxwella ( $E_1$ ,  $\eta_1$ ) w mieszankach MA są znacznie większe niż te wyznaczone dla mieszanek SMA-MA. W skrajnym przypadku dla temperatury  $-10^{\circ}\text{C}$  stosunek współczynnika lepkości  $\eta_1$  pomiędzy asfaltem lanym a mieszanką SMA-MA z asfaltem modyfikowanym 65/105-80 wynosi 17 (SMA-MA:  $47,81 \cdot 10^6$  MPa·s, MA:  $2,82 \cdot 10^6$  MPa·s). Różnica w parametrze  $\eta_1$  jest szczególnie istotna, bo to ten parametr decyduje w głównej mierze o czasie relaksacji naprężeń. Parametry  $E_2$ ,  $\eta_2$  reprezentują model Kelvina-Voighta. Odpowiadają one za odkształcenia opóźnione, powstające po przyłożeniu naprężenia. Parametr  $E_2$ ,  $\eta_2$ , podobnie jak w przypadku parametrów  $E_1$ ,  $\eta_1$ , wykazują się znacznie większymi wartościami dla mieszanki MA w stosunku do mieszanki SMA-MA. Większe wartości parametru  $E_2$  w przypadku asfaltu lanego przekładają się na mniejsze odkształcenia opóźnione.



Rys. 4-10 Wykresy uzyskanych wartości parametrów modelu Burgersa

Tab. 4-7 Parametry modelu Burgersa uzyskane na podstawie testu pełzania dla fazy obciążenia w temperaturze -10°C

T [°C]	Mieszanka	Oznac.	$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$\eta_1$ [MPa·s] ×10 <sup>6</sup>	$\eta_2$ [MPa·s] ×10 <sup>6</sup>	$t_r$ [s]
-10	SMA MA8 50/70	1	10805	2582	8,46	2,15	783
		2	10100	1733	7,01	1,86	694
		3	10805	2276	9,02	1,78	835
		śr.	<b>10570</b>	<b>2197</b>	8,16	1,93	<b>770</b>
	SMA-MA8 PmB 45/80-65 (8,4%)	1	10027	1385	6,84	1,56	682
		2	8815	1042	4,74	1,42	537
		3	8715	1256	7,64	1,29	876
		śr.	<b>9334</b>	<b>1133</b>	5,74	1,23	<b>619</b>
	SMA-MA8 HiMA 65/105-80	1	8422	882	2,51	1,02	298
		2	8425	784	2,77	0,97	329
		3	8546	809	3,19	1,08	373
		śr.	<b>8464</b>	<b>825</b>	2,82	1,03	<b>333</b>
	MA11 PmB 25/55-60	1	20189	5032	45,48	3,49	2253
		2	19011	7532	51,12	4,88	2689
		3	19624	5509	46,82	6,14	2386
		śr.	<b>19608</b>	<b>6024</b>	47,81	4,84	<b>2443</b>
	SMA-MA8 PmB 45/80-65 (8,9%)	1	9875	1947	8,69	2,29	880
		2	10192	1514	8,37	1,95	822
		3	9403	1449	7,29	2,00	775
		śr.	<b>9823</b>	<b>1637</b>	8,12	2,08	<b>826</b>
SMA-MA8 PmB 45/80-65 (7,9%)	1	11793	2254	14,15	2,69	1200	
	2	11834	2588	17,07	1,99	1442	
	3	11517	1822	10,99	1,65	954	
	śr.	<b>11715</b>	<b>2221</b>	14,07	2,11	<b>1199</b>	

Tab. 4-8 Parametry modelu Burgersa uzyskane na podstawie testu pełzania dla fazy obciążenia w temperaturze -15°C

T [°C]	Mieszanka	Oznac.	$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$\eta_1$ [MPa·s] ×10 <sup>6</sup>	$\eta_2$ [MPa·s] ×10 <sup>6</sup>	$t_r$ [s]
-15	SMA MA8 50/70	1	15625	4143	35,34	8,25	2261
		2	13438	3940	34,49	4,34	2567
		3	14347	5513	46,92	4,43	3271
		śr.	<b>14470</b>	<b>4532</b>	38,92	5,67	<b>2700</b>
	SMA-MA8 PmB 45/80-65 (8,4%)	1	13096	5062	18,79	2,52	1435
		2	13026	3464	25,82	3,55	1982
		3	12327	3203	20,68	3,55	1678
		śr.	<b>12816</b>	<b>3910</b>	21,76	3,21	<b>1698</b>
	SMA-MA8 HiMA 65/105-80	1	12151	2791	18,11	2,57	1491
		2	12422	2422	13,70	2,93	1103
		3	12148	2656	16,28	2,40	1340
		śr.	<b>12240</b>	<b>2623</b>	16,03	2,63	<b>1221</b>
	MA11 PmB 25/55-60	1	21775	12400	132,52	10,94	6086
		2	22636	14923	152,41	10,19	6733
		3	24234	14001	145,22	11,62	5992
		śr.	<b>22882</b>	<b>13775</b>	143,38	10,92	<b>6270</b>
	SMA-MA8 PmB 45/80-65 (8,9%)	1	12637	4246	29,28	3,85	2317
		2	13582	4386	30,20	4,56	2223
		3	14813	6090	44,57	5,12	3009
		śr.	<b>13677</b>	<b>4907</b>	34,68	4,51	<b>2516</b>
SMA-MA8 PmB 45/80-65 (7,9%)	1	13653	5782	47,61	5,37	3487	
	2	16486	7094	56,01	6,05	3398	
	3	13530	4742	41,58	4,93	3073	
	śr.	<b>14556</b>	<b>5873</b>	48,40	5,45	<b>3319</b>	

Tab. 4-9 Parametry modelu Burgersa uzyskane na podstawie testu pełzania dla fazy obciążenia w temperaturze -25°C

T [°C]	Mieszanka	Oznac.	$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$\eta_1$ [MPa·s] $\times 10^6$	$\eta_2$ [MPa·s] $\times 10^6$	$t_r$ [s]
-25	SMA MA8 50/70	1	23131	27309	424,02	17,71	11368
		2	21031	20244	344,92	14,00	16401
		3	21107	27220	446,61	15,57	21159
		<b>śr.</b>	<b>21756</b>	<b>24924</b>	405,18	15,76	<b>16309</b>
	SMA-MA8 PmB 45/80- 65 (8,4%)	1	18987	14495	215,84	10,65	11368
		2	19563	19723	272,19	12,30	13913
		3	19954	20807	309,05	12,67	15489
		<b>śr.</b>	<b>19501</b>	<b>18342</b>	265,69	11,87	<b>13590</b>
	SMA-MA8 HiMA 65/105-80	1	19562	15039	210,52	11,02	10762
		2	19482	19790	272,49	12,45	13987
		3	19954	20807	309,05	12,67	15488
		<b>śr.</b>	<b>19666</b>	<b>18545</b>	264,02	12,05	<b>13412</b>
	MA11 PmB 25/55-60	1	31579	54781	1097,34	28,14	34749
		2	32462	58474	1267,34	29,93	39041
		3	30217	60908	1299,75	32,20	43014
		<b>śr.</b>	<b>31419</b>	<b>58054</b>	1221,47	30,09	<b>38935</b>
	SMA-MA8 PmB 45/80- 65 (8,9%)	1	20758	20790	287,17	13,72	13834
		2	19616	18476	269,45	12,92	13736
		3	21509	27914	437,27	16,01	20330
		<b>śr.</b>	<b>23326</b>	<b>31309</b>	553,84	18,19	<b>21709</b>
	SMA-MA8 PmB 45/80- 65 (7,9%)	1	18987	22626	352,67	17,87	18574
		2	21403	20561	337,89	14,20	15787
		3	21266	36337	638,41	12,55	30020
		<b>śr.</b>	<b>20552</b>	<b>26508</b>	442,99	14,87	<b>21461</b>

Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że mieszanka asfaltu lanego (MA 11 PmB 25/55-60) w każdej z temperatur, w których prowadzono badania, wykazuje się znacznie większą sztywnością (w stosunku do mieszanek SMA-MA). Potwierdzają to największe wartości parametrów modelu Burgersa i małe odkształcenia (ze znacznym udziałem odkształceń sprężystych). Udział poszczególnych odkształceń zestawiono w tabeli (Tab. 4-10).

Tab. 4-10 Charakter i wielkość odkształceń wyznaczonych z modelu Burgersa

Temperatura	Mieszanka	$\varepsilon_H/\varepsilon_{cat} \cdot 100$ [%]	$\varepsilon_{K-V}/\varepsilon_{cat} \cdot 100$ [%]	$\varepsilon_N/\varepsilon_{cat} \cdot 100$ [%]
-10°C	SMA-MA 8 50/70	4,1	19,2	76,7
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65	3,5	24,3	72,2
	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	1,8	18,3	79,9
	MA 11 PmB 25/55-60	10,3	29,1	60,6
-15°C	SMA-MA 8 50/70	11,0	29,8	59,2
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65	8,2	21,1	70,7
	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	6,1	26,8	67,1
	MA 11 PmB 25/55-60	20,6	32,1	47,3
-25°C	SMA-MA 8 50/70	38,4	31,8	29,8
	SMA-MA 8 PmB 45/80-65	30,7	36,6	32,7
	SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	31,2	32,5	36,3
	MA 11 PmB 25/55-60	52,9	27,4	19,7

$\varepsilon_H/\varepsilon_{cat}$  – odkształcenia modelu Hook'a (sprężyste natychmiastowe)

$\varepsilon_{K-V}/\varepsilon_{cat}$  – odkształcenia modelu Kelvina–Voigta (sprężyste opóźnione)

$\varepsilon_N/\varepsilon_{cat}$  – odkształcenia modelu Newtona (nieodwracalne, trwałe)

$\varepsilon_{cat} = \varepsilon_H + \varepsilon_{K-V} + \varepsilon_N$

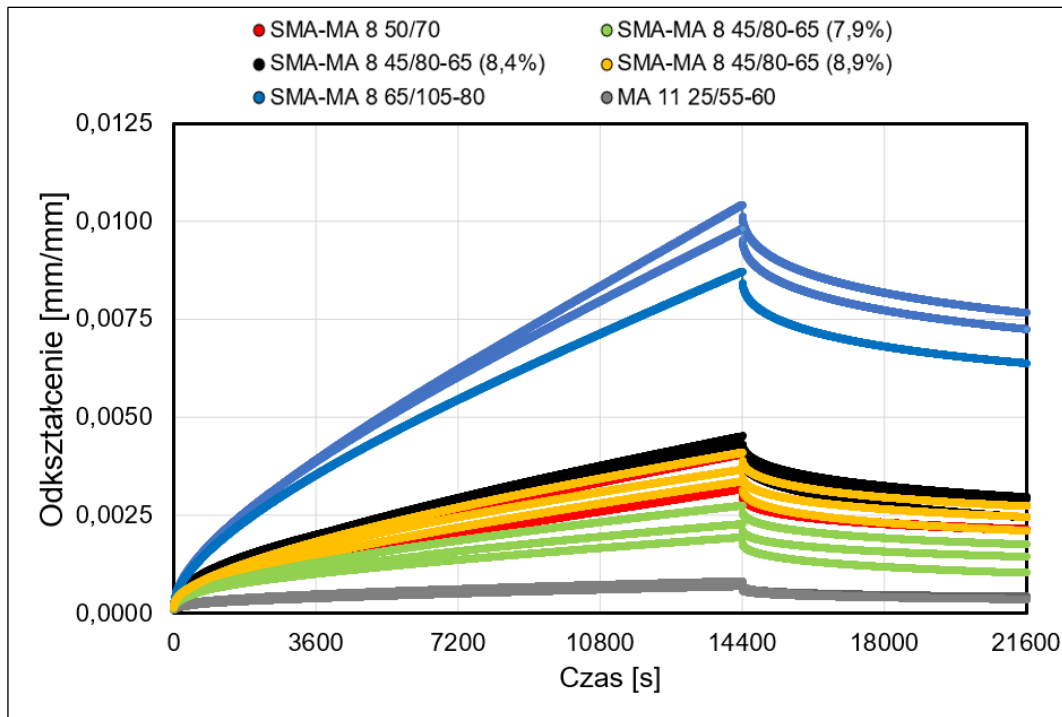
Wykresy odkształcenia od czasu (dla fazy obciążenia i odciążenia) dla poszczególnych oznaczeń przedstawiono na wykresach (Rys. 4-11, Rys. 4-12, Rys. 4-13).

Analiza otrzymanych wyników (Tab. 4-10) oraz wykresów wskazuje na większy udział odkształceń sprężystych (natychmiastowych i opóźnionych) w mieszankach MA w stosunku do mieszanek SMA-MA. W temperaturze -10°C łączny udział odkształceń sprężystych dla mieszanki MA wynosi 39,4% w stosunku 20,1% dla mieszanki SMA-MA 8 HiMA 65/105-80. W temperaturze -15°C, odkształcenia sprężyste w asfalcie lanym stają się dominujące (łączny udział tych odkształceń wynosi 52,7%), w przypadku mieszanek SMA-MA łączny udział odkształceń sprężystych nadal jest mniejszy w stosunku do odkształceń lepkich (32,9% – 40,8%).

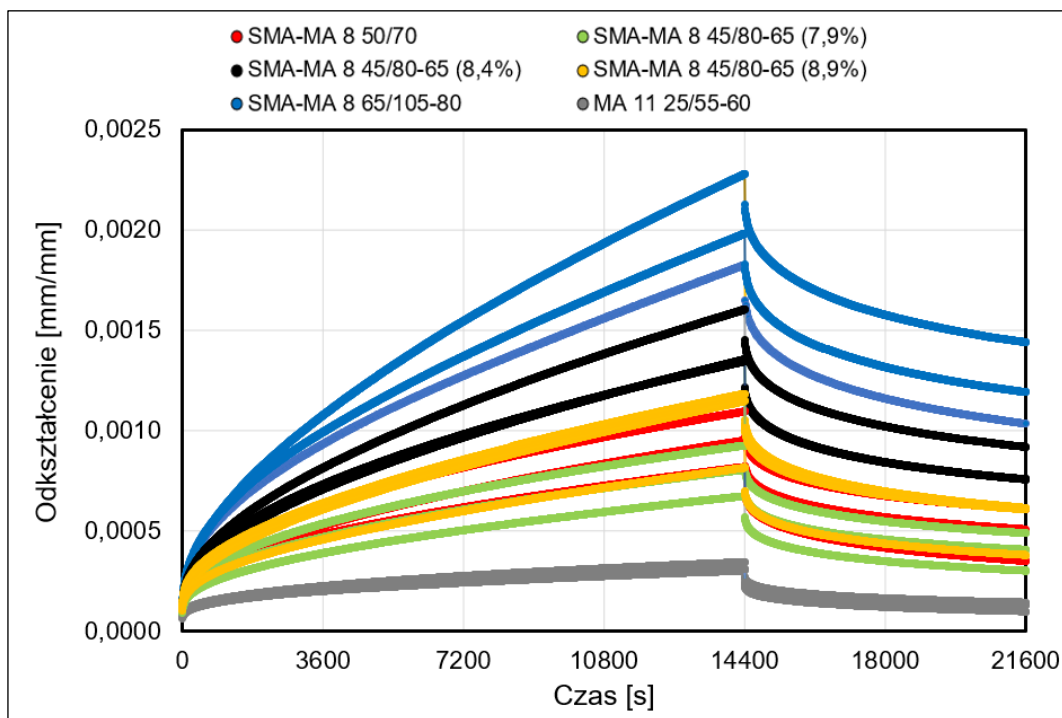
Dalszy spadek temperatury do poziomu -25°C skutkuje znaczącym wzrostem udziału odkształceń sprężystych w stosunku do całkowitego odkształcenia. W przypadku asfaltu lanego uzyskano wartość 80,3%, natomiast dla mieszanki SMA-MA8 HiMA 65/105-80 odkształcenie sprężyste wynosi 63,7% (dla pozostałych mieszanek SMA-MA uzyskano wartości pośrednie).



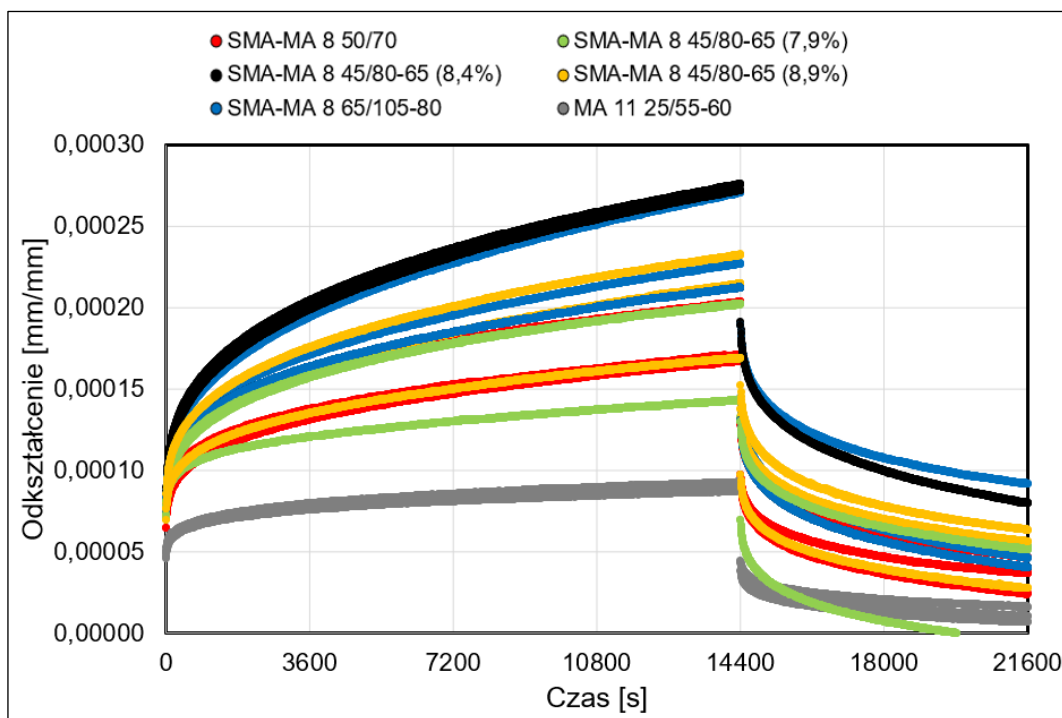
Można na tej podstawie sformułować wniosek, że zastosowanie bardziej miękkich asfaltów w mieszankach SMA-MA, przekłada się na późniejsze przejście w stan sprężysty/sprężysto kruchy. Efektem tego jest poprawa parametrów niskotemperaturowych mieszanki SMA-MA w stosunku MA.



Rys. 4-11 Wykres zmiany odkształceń w czasie w teście pełzania w -10°C

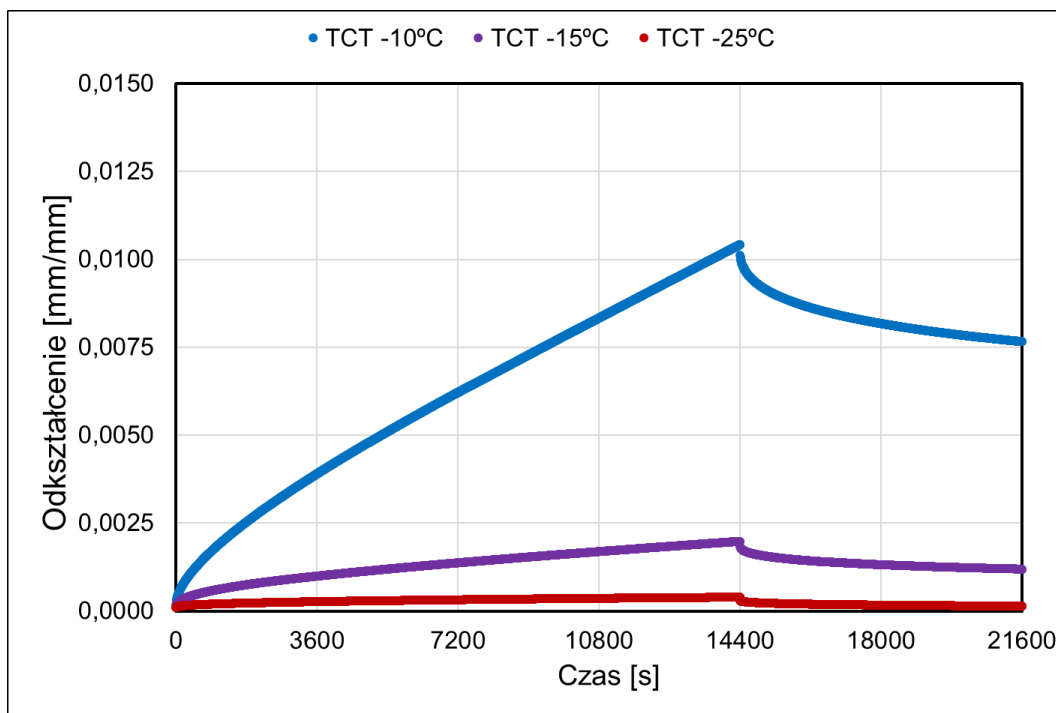


Rys. 4-12 Wykres zmiany odkształceń w czasie w teście pełzania w -15°C



Rys. 4-13 Wykres zmiany odkształceń w czasie w teście pełzania w -25°C

Analizując wyniki uzyskane z badań w kolejnych temperaturach (-15°C i -25°C) należy zwrócić uwagę na skalę pionową (odkształcenia). Maksymalne odkształcenia rejestrowane w badaniu pełzania w temperaturze -15°C i -25°C są mniejsze w porównaniu do odkształceń w temperaturze -10°C, odpowiednio o około 4 razy i około 20 razy (Rys. 4-14). Taka zależność obserwowana jest dla wszystkich badanych mieszanek.

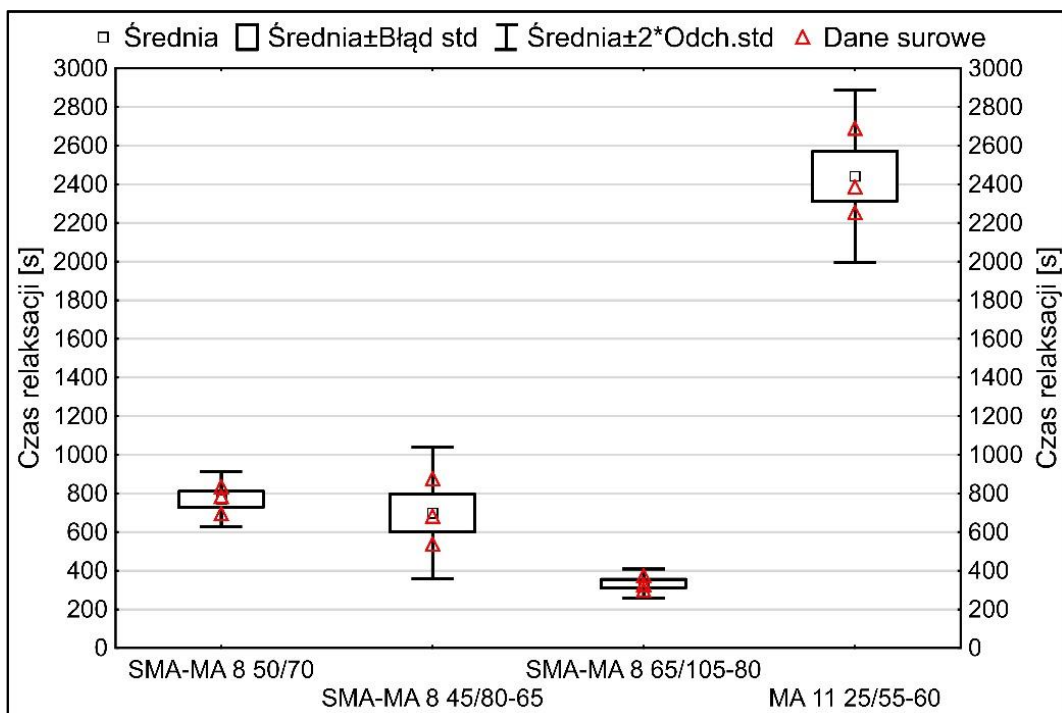


Rys. 4-14 Porównanie pełzania w różnych temperaturach prowadzonego testu dla mieszanki SMA-MA 8 65/105-80 (powyższe wykresy stanowią uśrednione wartości wyników)

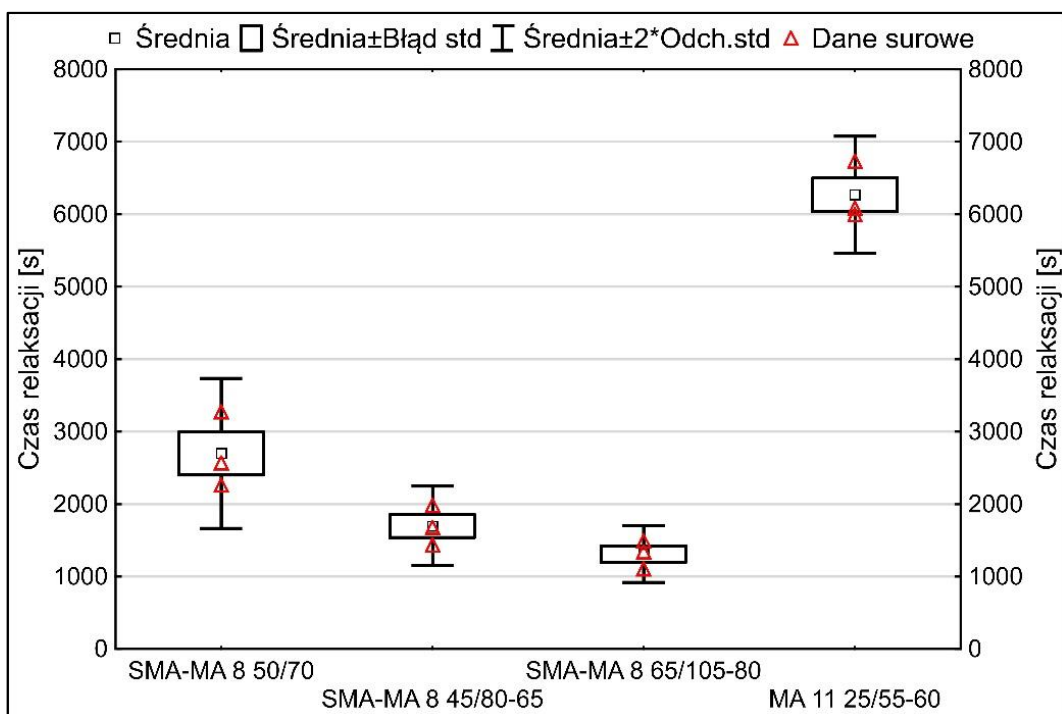
#### 4.3.2. Zależność czasu relaksacji od rodzaju lepiszcza w badaniu TCT

Analizę uzyskanych w obliczeniach czasów relaksacji przeprowadzono na podstawie wyników badań mieszanek SMA-MA z 3 rodzajami asfaltów (z optymalną zawartością równą 8,4%) oraz mieszanki MA PmB 25/55-60. Otrzymane wyniki przedstawiono na wykresach „ramka-wąsy” (Rys. 4-15 Rys. 4-16 Rys. 4-17) z zaznaczonymi wartościami z oznaczeń, ich średnimi oraz obszarami ufności dla średniej.

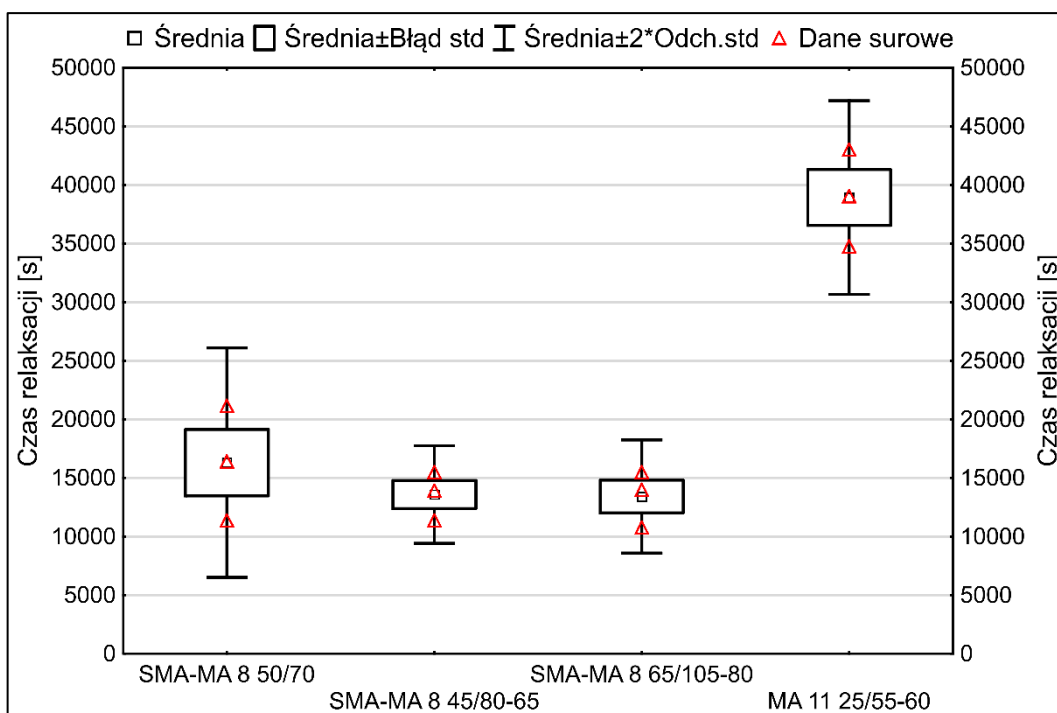
Czas relaksacji naprężeń w mieszance MA 11 PmB 25/55-60 w każdej temperaturze badania był znacznie dłuższy niż w mieszankach SMA-MA. Najkrótsze czasy relaksacji odnotowano dla mieszanki SMA-MA 8 HiMA 65/105-80 w każdej z temperatur oznaczenia. W -10°C średni czas relaksacji kolejnej z mieszanek (SMA-MA 8 PmB 45/80-65) wyniósł 690 s i był już ponad 2-krotnie dłuższy w stosunku do mieszanki SMA-MA z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA (333 s). Wraz z spadkiem temperatury (-15°C) różnica ta zmniejszyła się i wynosiła około 40%. Rozrzut otrzymanych wyników dla poszczególnych testów był największy w przypadku temperatury badania -25°C. Jest to prawdopodobnie wynikiem uzyskiwanych w badaniu wartości odkształceń, które w temperaturze -25°C były najmniejsze.



Rys. 4-15 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -10°C



Rys. 4-16 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -15°C



Rys. 4-17 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze  $-25^{\circ}\text{C}$

W celu porównania poszczególnych średnich wykonano analizę wariancji (ANOVA). Przed zastosowaniem testu Tukeya wykonano analizę normalności rozkładów oraz test jednorodności wariancji Levene'a. Warunki do przeprowadzenia analizy wariancji zostały zachowane, wyniki obliczeń zawarto w załączniku nr 4. Wyniki testów Tukeya przedstawiono w tabelach (Tab. 4-11, Tab. 4-12, Tab. 4-13).

Analiza wyników obliczonych wartości czasu relaksacji naprężeń w poszczególnych mieszankach pozwala na wyciągnięcie szeregu wniosków, m.in.:

- w każdej temperaturze badania mieszanka MA 11 PmB 25/55-60 różni się istotnie od pozostałych mieszanek;
- w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  różnice między mieszankami SMA-MA z asfaltami modyfikowanymi są statystycznie nieistotne;
- mieszanki SMA-MA z asfaltem niemodyfikowanym 50/70 i asfaltem modyfikowanym PmB 45/80-65 w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  tworzą odrębną grupę mieszanek o zbliżonych właściwościach;
- w temperaturze  $-15^{\circ}\text{C}$  zastosowanie asfaltu modyfikowanego (HiMA 65/105-80 jak i PMB 45/80-65) wpływa na skrócenie czasu relaksacji naprężeń w stosunku do mieszanki SMA-MA z asfaltem 50/70;

- w najniższej temperaturze badania (-25°C) różnice pomiędzy wszystkimi mieszankami SMA-MA są statystycznie istotne (tab. 4.4).

Tab. 4-11 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-10 °C)

<b>Test HSD Tukeya; zmienna TCT Czas relaksacji -10</b>				
<b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b>				
<b>Błąd: MS międzygrupowe = 21376, df = 8,0000</b>				
<b>Mieszanka</b>	<b>Czas relaksacji Średnia [s]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	333,5	****		
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	698,4	****	****	
SMA-MA 8 50/70	770,4		****	
MA 11 PmB 25/55-60	2442,6			****

Tab. 4-12 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-15 °C)

<b>Test HSD Tukeya; zmienna TCT Czas relaksacji -15</b>				
<b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b>				
<b>Błąd: MS międzygrupowe = 1360E2, df = 8,0000</b>				
<b>Mieszanka</b>	<b>Czas relaksacji Średnia [s]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	1311,1	****		
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	1698,1	****		
SMA-MA 8 50/70	2699,7		****	
MA 11 PmB 25/55-60	6270,4			****

Tab. 4-13 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-25 °C)

<b>Test HSD Tukeya; zmienna TCT Czas relaksacji -25</b>			
<b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b>			
<b>Błąd: MS międzygrupowe = 1280E4, df = 8,0000</b>			
<b>Mieszanka</b>	<b>Czas relaksacji Średnia [s]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	13412,3	****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	13590,0	****	
SMA-MA 8 50/70	16309,3	****	
MA 11 PmB 25/55-60	38934,6		****

Kolejnym etapem było poszukiwanie współzależności między parametrami asfaltu wykstrahowanego z próbek MMA a czasem relaksacji, wyznaczonym w badaniu TCT. Tego rodzaju korelację można przypisać wartościom penetracji w 25°C. Korelację opisano funkcją wykładniczą wyrażoną wzorem (4.3):

$$t_r = e^{aPEN+b} \quad (4.3)$$

gdzie:

$t_r$  – czas relaksacji, s;

$PEN$  – penetracja asfaltu wyekstrahowanego z MMA,  $\times 0.1$  mm;

$a, b$  – współczynniki szukanej funkcji.

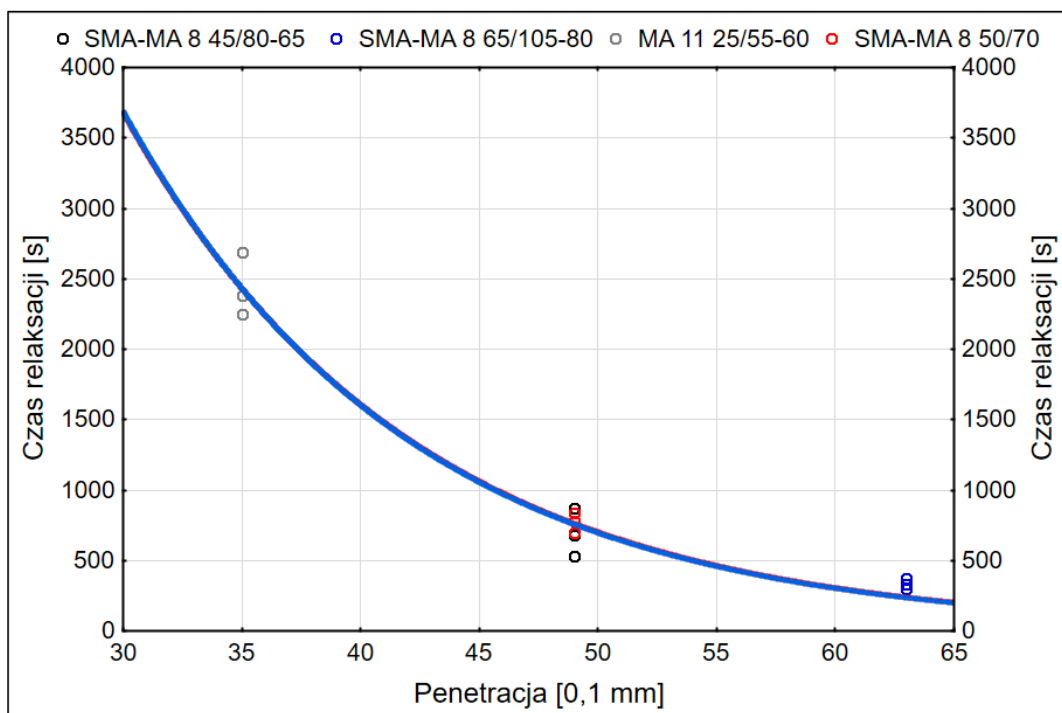
Współczynniki ( $a, b$ ) szukanej funkcji (4.3) wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli (Tab. 4-14).

Dopasowanie modelu teoretycznego do wartości uzyskanych z badań prowadzono dla dwóch wariantów. W pierwszym analizowano wyniki wszystkich asfaltów, w tym niemodyfikowanego 50/70. W drugim obliczenia wykonano uwzględniając wyłącznie asfalty modyfikowane polimerem. W rozważaniach pominięto wyniki uzyskane dla SMA-MA 8 PmB 45/80-65 z zawartością asfaltu różną od optymalnej ( $o \pm 0.5\%$ ). Krok ten był podyktowany potrzebą minimalizacji dodatkowych zmiennych. Otrzymane wykresy przebiegu funkcji przedstawiono na rysunkach (Rys. 4-18, Rys. 4-19, Rys. 4-20).

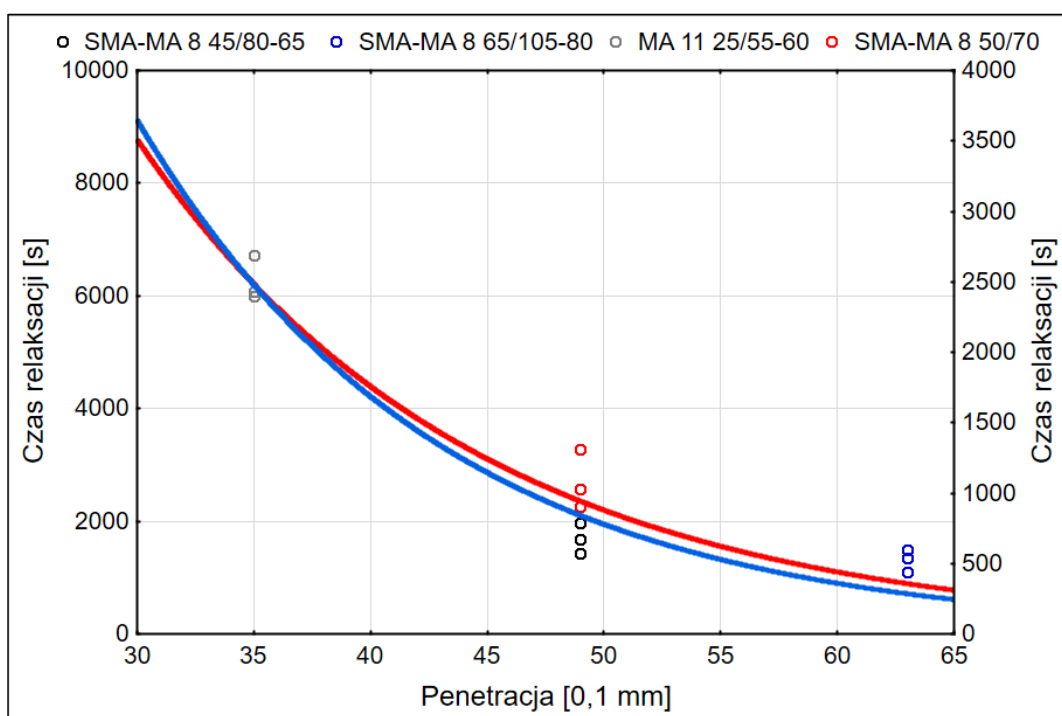
Tab. 4-14 Wyniki metody najmniejszych kwadratów

Temp	Krzywa	Parametr	Ocena	Błąd	Wartość t	Dolna granica ufności	Dolna granica. ufności	R <sup>2</sup>
-10	z 50/70	a	-0,083	0,006	-14,868	-0,095	-0,070	0,99
		b	10,696	0,211	50,619	10,225	11,167	
	bez 50/70	a	-0,083	0,008	-10,126	-0,103	-0,064	0,99
		b	10,715	0,303	35,405	9,999	11,430	
-15	z 50/70	a	-0,069	0,007	-9,776	-0,085	-0,053	0,96
		b	11,156	0,277	40,325	10,540	11,772	
	bez 50/70	a	-0,077	0,009	-8,159	-0,100	-0,055	0,98
		b	11,436	0,351	32,555	10,605	12,266	
-25	z 50/70	a	-0,055	0,008	-6,730	-0,074	-0,037	0,91
		b	12,475	0,334	37,393	11,732	13,218	
	bez 50/70	a	-0,053	0,009	-5,544	-0,075	-0,030	0,92
		b	12,382	0,373	33,174	11,500	13,265	

Poziom ufności: 95.0% ( alfa = 0,050)

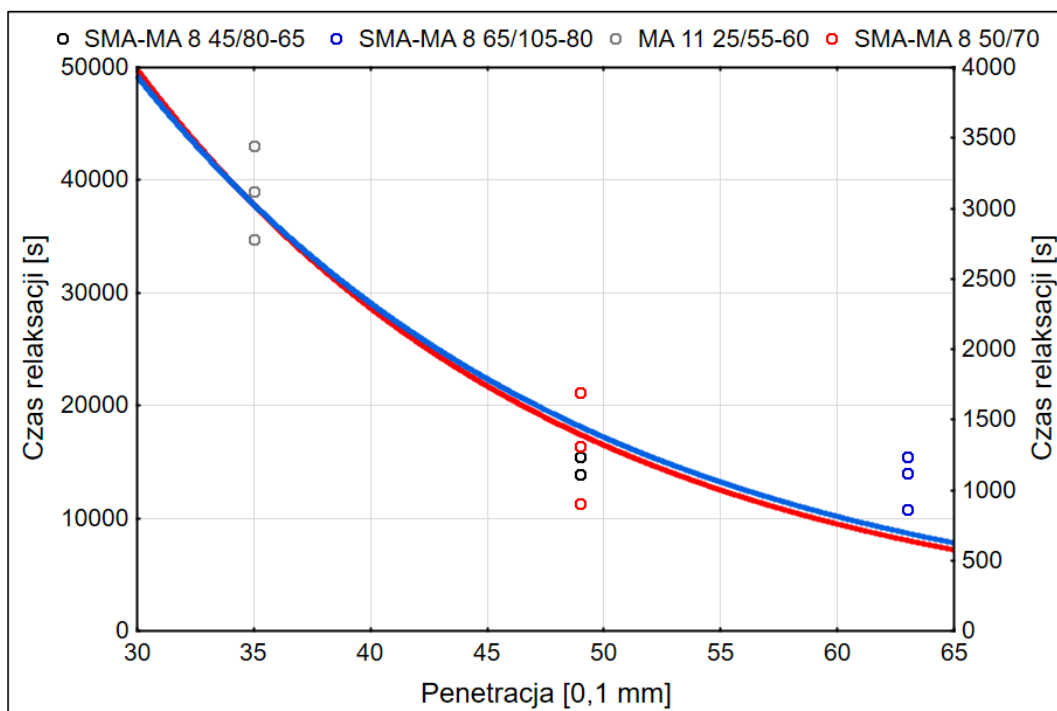


Rys. 4-18 Czas relaksacji naprężeń w badaniu TCT w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  w zależności od penetracji wyekstrahowanego asfaltu . Oznaczenia: krzywa czerwona z asfaltem 50/70, krzywa niebieska bez uwzględnienia asfaltu 50/70 (linie pokrywają się)



Rys. 4-19 Czas relaksacji naprężeń w badaniu TCT w temperaturze  $-15^{\circ}\text{C}$  w zależności od penetracji wyekstrahowanego asfaltu . Oznaczenia j.w.





Rys. 4-20 Czas relaksacji naprężeń w badaniu TCT w temperaturze  $-25^{\circ}\text{C}$  w zależności od penetracji asfaltu wyekstrahowanego. Oznaczenia j.w.

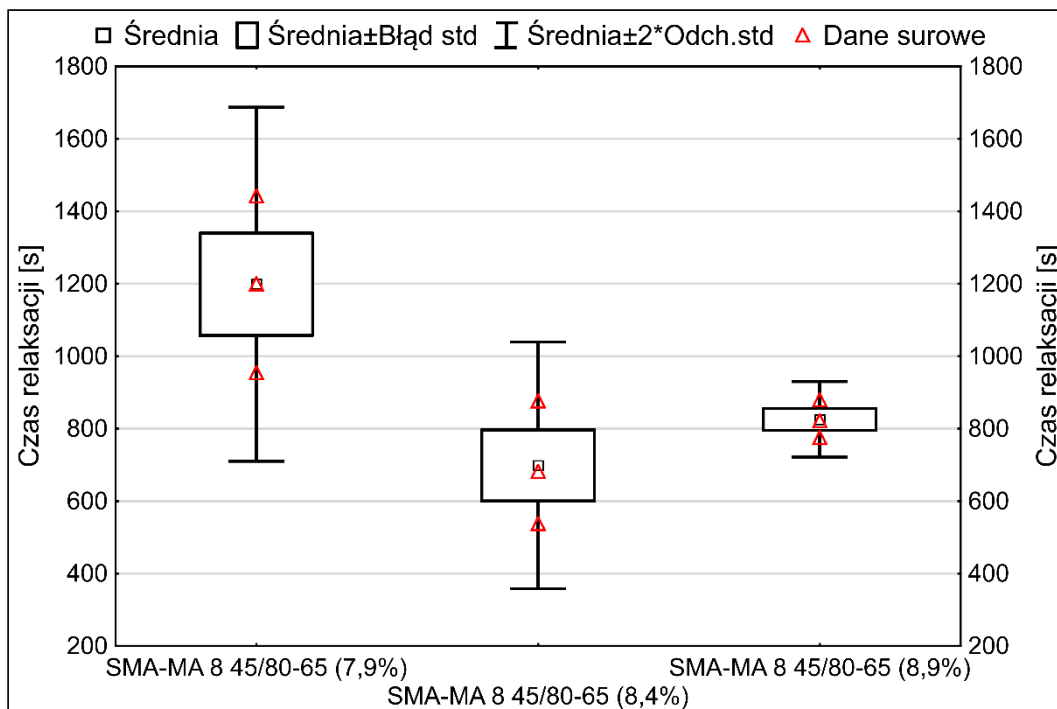
Uzyskane wyniki wskazują, że penetracja oznaczona w  $25^{\circ}\text{C}$  może być parametrem służącym do oszacowania czasu relaksacji w badaniu TCT. Pominięcie w analizach asfaltu drogowego 50/70 w niewielkim stopniu zmienia przebieg funkcji dopasowania. W temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  obie otrzymane krzywe pokrywają się (rys. 4-17), w pozostałych temperaturach ( $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ ) na podstawie analizy wykresów można stwierdzić, że różnice nie są znaczące (Rys. 4-19, Rys. 4-20).

Poszukiwanie współzależności między parametrami lepiszczy a czasem relaksacji oparto na podstawowych cechach klasyfikacyjnych asfaltów (penetracja, temperatura mięknięcia oraz dla asfaltów modyfikowanych nawrót sprężysty). Nie są to właściwości, które wykorzystuje się do opisu zachowania się lepiszczy asfaltowych w niskich temperaturach, dla których wyznaczano czasy relaksacji. Dlatego też w zakresie dalszych badań powinno być poszukiwanie korelacji między tego rodzaju cechami (np. parametrami z oznaczenia BBR – *Bending Beam Rheometer* czy też DDT – *Direct Tension Test*) a czasem relaksacji.

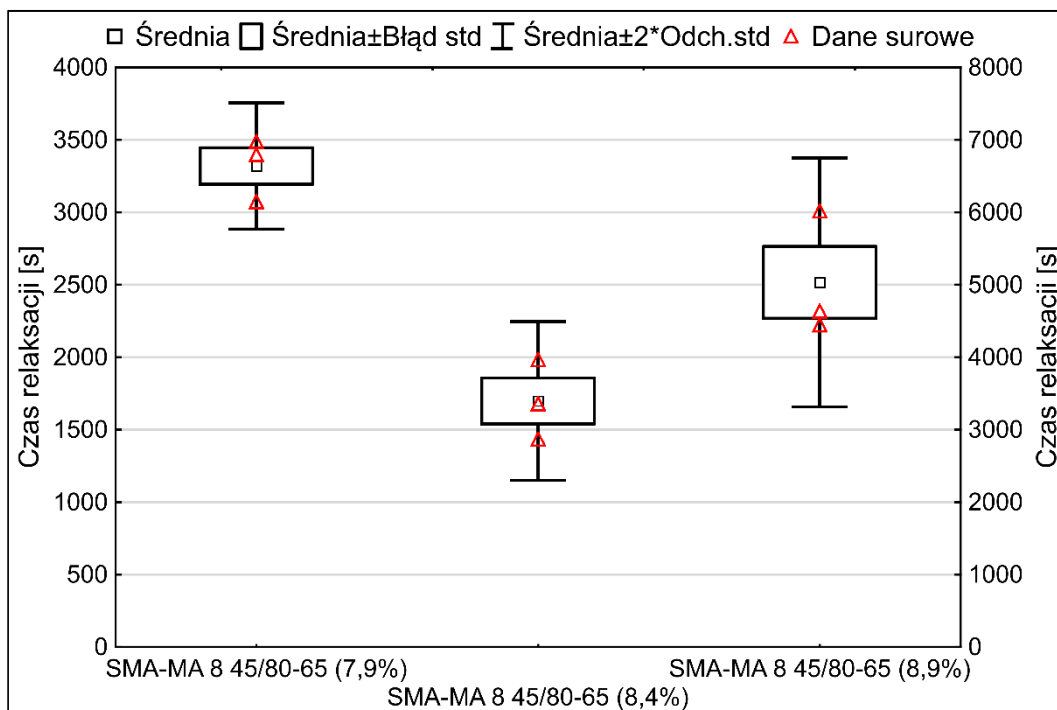
#### 4.3.3. Zależność czasu relaksacji od zawartości lepiszcza w badaniu TCT

Zależność między czasem relaksacji i zawartością lepiszcza określano na podstawie wyników badań TCT dla mieszanki SMA-MA z asfaltem PMB 45/80-65 o zróżnicowanej zawartości ( $8.4\% \pm 0.5\%$ ). Na podstawie uzyskanych wyników (Rys. 4-21, Rys. 4-22, Rys. 4-23) należy

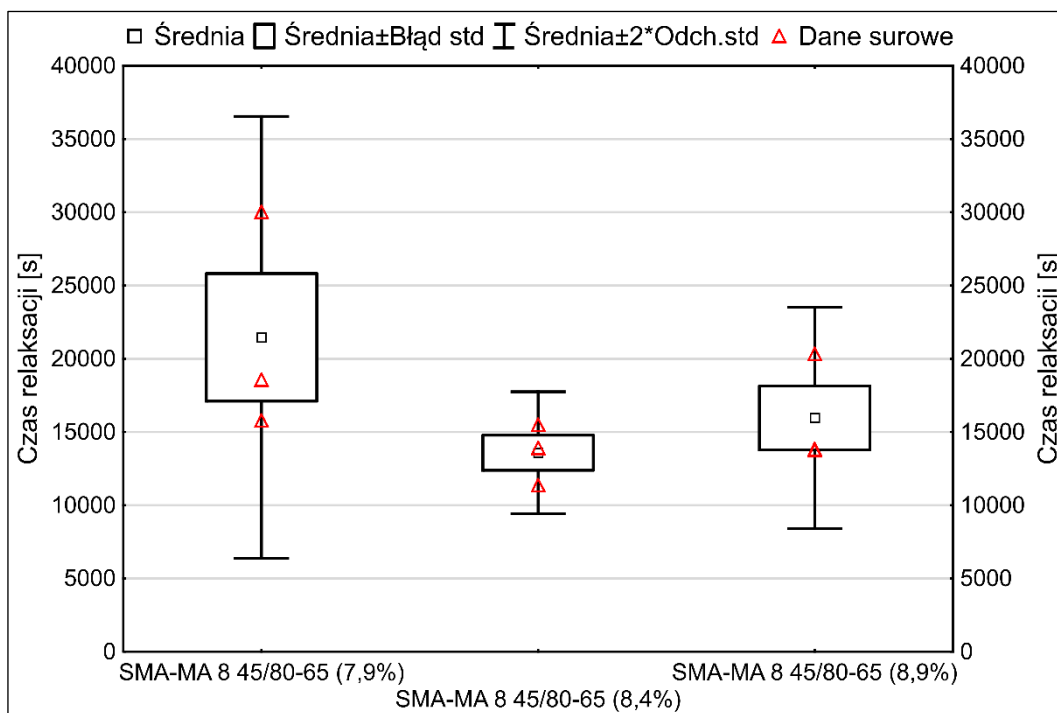
stwierdzić, że w każdej temperaturze badania mieszanka z zawartością asfaltu 8,4%, cechowała się najkrótszym czasem relaksacji.



Rys. 4-21 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -10°C (różna zawartość lepiszcza)



Rys. 4-22 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -15°C (różna zawartość lepiszcza)



Rys. 4-23 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -25°C (różna zawartość lepiszcza)

Analiza wykresów ramka-wąsy pozwala stwierdzić, że przedziały ufności mieszanek SMA-MA PmB 45/80-65 z różną zawartością lepiszcza pokrywają się. Spadek zawartości lepiszcza (z 8,4% na 7,9%) w temperaturze badania -10°C i -15°C skutkowało istotnym wzrostem czasu relaksacji. Potwierdzają to wyniki analizy post-hoc (Tab. 4-15, Tab. 4-16). W przypadku zwiększonej zawartości lepiszcza asfaltowego do wartości 8,9% zaobserwowano wzrost czasu relaksacji w stosunku do mieszanki z zawartością optymalną 8,4%, przy czym w temperaturze -10°C był on statystycznie nieistotny (Tab. 4-15 – wzrost średniego czasu relaksacji z 698 s do 826 s). W temperaturze -15°C wszystkie mieszanki pod względem czasu relaksacji różniły się istotnie od siebie. Zrezygnowano z analizy wariancji dla wyników uzyskanych w temperaturze -25°C. Nie spełniały one warunku dotyczącego rozkładu normalnego w grupach (mieszanka o obniżonej zawartości lepiszcza). Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że czas relaksacji jest zależny od zawartości lepiszcza i istnieje jego optymalna zawartość, dla której czas relaksacji jest najkrótszy. Wymaga to jednak dalszych badań mieszanek SMA-MA z różnymi rodzajami lepiszcza i różną jego zawartością. Uzyskane wyniki z badań wskazujące, że wzrost zawartości lepiszcza nie skraca czasu relaksacji, są zbieżne z wynikami prac przytoczonych w podrozdziale 2.2.3 niniejszej rozprawy.

W przypadku mieszanki SMA-MA 8 PmB 45/80-65 o zwiększonej zawartości lepiszcza asfaltowego (8,9%) dodatkową przyczyną, mogącą mieć wpływ na niepewność pomiaru, jest etap przygotowania

próbki w mieszalniku laboratoryjnym i zagęszczenie w zagęszczarce walcowej. W mieszankach o tak dużej zwartości lepiszcza, mimo zastosowania dodatków stabilizujących w postaci celulozy, może odchodzić do segregacji składników, co ma wpływ na uzyskiwane wartości z badań.

Tab. 4-15 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-10 °C; różna zawartość lepiszcza)

<b>Test HSD Tukeya; zmienna TCT Czas relaksacji -10°C</b>			
<b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b>			
<b>Błąd: MS międzygrupowe = 30452, df = 6,0000</b>			
<b>Mieszanka</b>	<b>Czas relaksacji Średnia [s]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	698,4	****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	825,5	****	****
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	1198,7		****

Tab. 4-16 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-15 °C; różna zawartość lepiszcza)

<b>Test HSD Tukeya; zmienna TCT Czas relaksacji -15</b>				
<b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b>				
<b>Błąd: MS międzygrupowe = 1023E2, df = 6,0000</b>				
<b>Mieszanka</b>	<b>Czas relaksacji Średnia [s]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	1698,1	****		
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	2516,3		****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	3319,3			****

#### 4.3.4. Zależność czasu relaksacji w badaniu TCT od temperatury badania

Temperatura mieszanki mineralno-asfaltowej ma wpływ na czas relaksacji indukowanych w niej naprężeń. Tego rodzaju zależność dla mieszanek SMA-MA i MA przedstawiono na wykresie (Rys. 4-24). Wykonano również regresję liniową, opisaną równaniem (4.4).

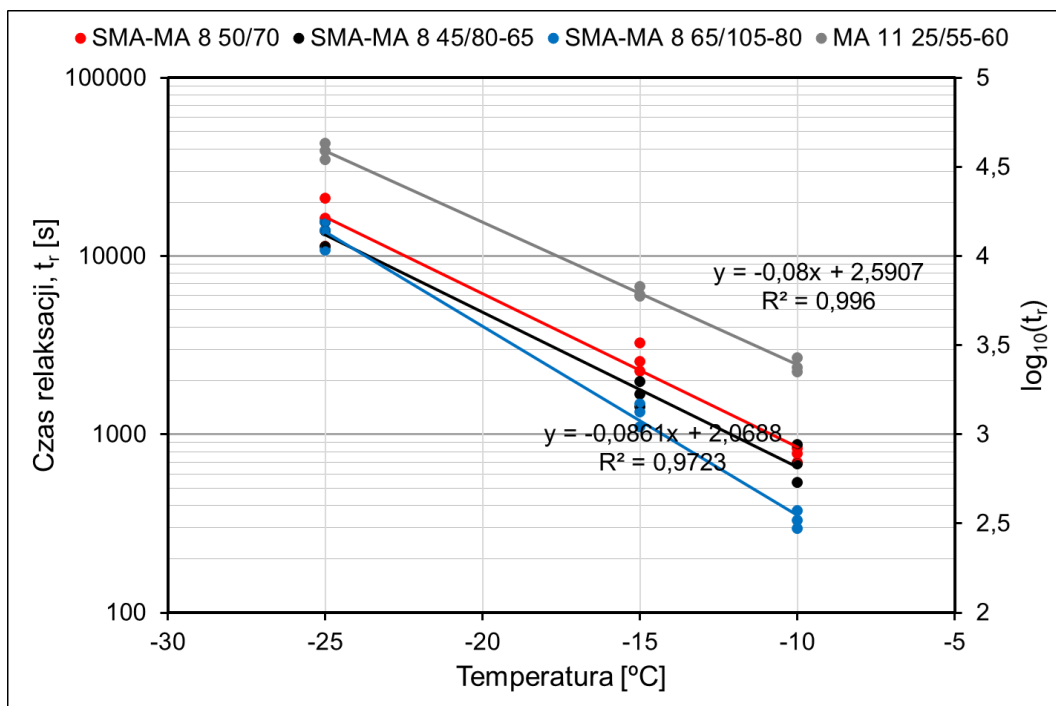
$$\log_{10}(t_r) = aT + b \quad (4.4)$$

gdzie:

$\log_{10}(tr)$  – logarytm z czasu relaksacji;

$T$  – temperatura oznaczenia, °C;

$a, b$  – współczynniki regresji liniowej.



Rys. 4-24 Zależność logarytmu z czasu relaksacji od temperatury w badaniu TCT dla mieszanek SMA-MA i MA

Parametry regresji liniowej przedstawiono w tabeli (Tab. 4-17). Uzyskane wartości współczynnika determinacji  $R^2$  są wysokie (powyżej 0,97) i świadczą o dobrym dopasowaniu modelu.

Tab. 4-17 Wyniki regresji liniowej zależności temperatury od czasu relaksacji naprężeń w badaniu TCT

Mieszanka	a	b	$R^2$
MA 11 PmB 25/55-60	-0,080	2,591	0,99
SMA-MA 8 50/70	-0,086	2,069	0,97
SMA-MA 8 PmB 45/80-65	-0,087	1,949	0,98
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	-0,106	1,488	0,99

Współczynnik kierunkowy prostej „a” jest parametrem opisującym nachylenie prostej do osi poziomej (temperatury). Im większa jest jego wartość bezwzględna tym większy jest wpływ temperatury na zmiany czasu relaksacji naprężeń. Z przeprowadzonych badań TCT wynika, że mieszanka SMA-MA 8 z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA 65/105-80 cechuje się współczynnikiem kierunkowym „a” o największej wartości bezwzględnej (-0,106), najmniejszą wartość bezwzględną uzyskano dla mieszanki MA (-0,080). Pośrednimi wartościami współczynnika kierunkowego (zbliżonymi do wartości uzyskanej dla MA) cechują się mieszanki SMA-MA 8 z asfaltem 50/70 oraz PmB 45/80-65. Korzystając z testu  $t$ , opisanego w punkcie 3.5.5, porównano poszczególne współczynniki kierunkowe prostej. Wyniki analizy zestawiono w tabeli

Tab. 4-18 Wyniki porównania prostych opisujących zależność wpływu temperatury na czas relaksacji w badaniu TCT

Mieszanka	SMA-MA8 50/70	SMA-MA 8 PmB 45/80-65	SMA-MA 8 HiMA 65/105- 80	MA 11 PmB 25/55-60
SMA-MA 8 50/70	-	0,912072	0,005455	0,313849
SMA-MA 8 PmB 45/80-65	0,912072	-	0,001839	0,166179
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	0,005455	0,001839	-	0,000076
MA 11 PmB 25/55-60	0,313849	0,166179	0,000076	-

Jeżeli  $p \geq 0,05$  wtedy współczynniki kierunkowo prostej nie różnią się istotnie od siebie

Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że uzyskane nachylenie prostych istotnie się różni od pozostałych w przypadku mieszanki z asfaltem wysokomodyfikowanym HiMA 65/105-80.

#### 4.3.5. Podsumowanie wyników badań w teście TCT

Analiza wyników z przeprowadzonych oznaczeń w teście TCT pozwala na sformułowanie wniosków i konkluzji, dotyczących zarówno analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych jak i samego badania. Do najważniejszych można zaliczyć:

- zmniejszenie oraz zwiększenie zawartości lepiszcza (w stosunku do optymalnej) przekłada się na wydłużenie czasu relaksacji, przy zmniejszonej ilości lepiszcza wzrost ten jest większy niż w przypadku zwiększonej zawartości,
- w temperaturach skrajnie ujemnych (poniżej  $-25^{\circ}\text{C}$ ) rodzaj zastosowanego lepiszcza oraz jego zawartość w mieszance SMA-MA miały niewielki wpływ na czas relaksacji;
- mieszanka MA z asfaltem PmB 25/55-60 cechuje się znacznie dłuższym czasem relaksacji w stosunku do mieszanek SMA-MA, niezależnie od temperatury prowadzonych badań;
- zastosowanie asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA 65/105-80 znacząco skraca czas relaksacji, przede wszystkim w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$ . Wraz z spadkiem temperatury różnice w otrzymanych czasach relaksacji zmniejszają się;
- zwiększenie zawartości asfaltu w przypadku mieszanki SMA-MA 8 nie przekłada się na skrócenie czasu relaksacji. Może być to jednak efekt niejednorodności próbki (wyniki w tym zakresie należy uznać za niejednoznaczne);
- na podstawie wyników przedstawionych na wykresie ramka-wąsy oraz przeprowadzonej analizy ANOVA można stwierdzić, że największe znaczenie odnośnie czasu relaksacji ma rodzaj zastosowanego asfaltu;

- mieszanki SMA-MA ze względu na możliwość zastosowania miękkiego asfaltu cechują się krótszym czasem relaksacji w stosunku do mieszanek typu asfalt lany, bazujących na stosunkowo twardych lepiszczach;
- badanie pełzania, przy założeniu stałego poziomu naprężeń niezależnie od temperatury badania, pozwala na stosunkowo proste porównanie uzyskiwanych wyników;
- czas relaksacji w badaniu TCT silnie koreluje z penetracją asfaltu wyekstrahowanego z próbek MMA. Ustalenie dokładnych zależności pomiędzy penetracją asfaltu (lub innymi jego cechami) powinno być celem przyszłych badań.

#### **4.4. BADANIE RELAKSACJI RT**

##### **4.4.1. Czas relaksacji w badaniu RT**

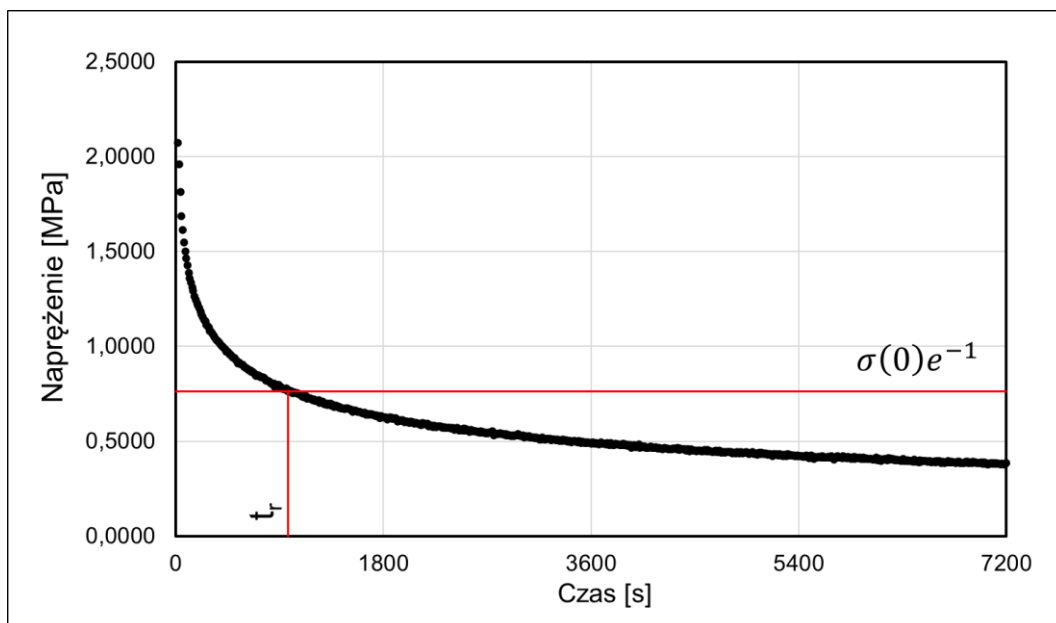
Badanie RT polega na przyłożeniu odkształcenia do badanej próbki, co inicjuje w niej naprężenia. Wskutek relaksacji zmniejszają się one w czasie. Proces ten zależy od właściwości materiału oraz temperatury.

Badanie czasu relaksacji naprężeń mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach metodą RT jest skomplikowane. Jest to wynikiem niewielkich zmian odkształcenia próbki, wywołujących duże zmiany naprężeń, szczególnie w początkowej fazie badania. W skrajnych przypadkach może prowadzić to do gwałtownego zniszczenia próbki.

Na podstawie przeprowadzonych badań określono zależności między zmianą (spadkiem) naprężeń w czasie przy stałym odkształceniu. W badaniach wartości odkształceń dobierano w taki sposób, aby naprężenia początkowe nie były większe niż 75% wytrzymałości próbki na rozciąganie.

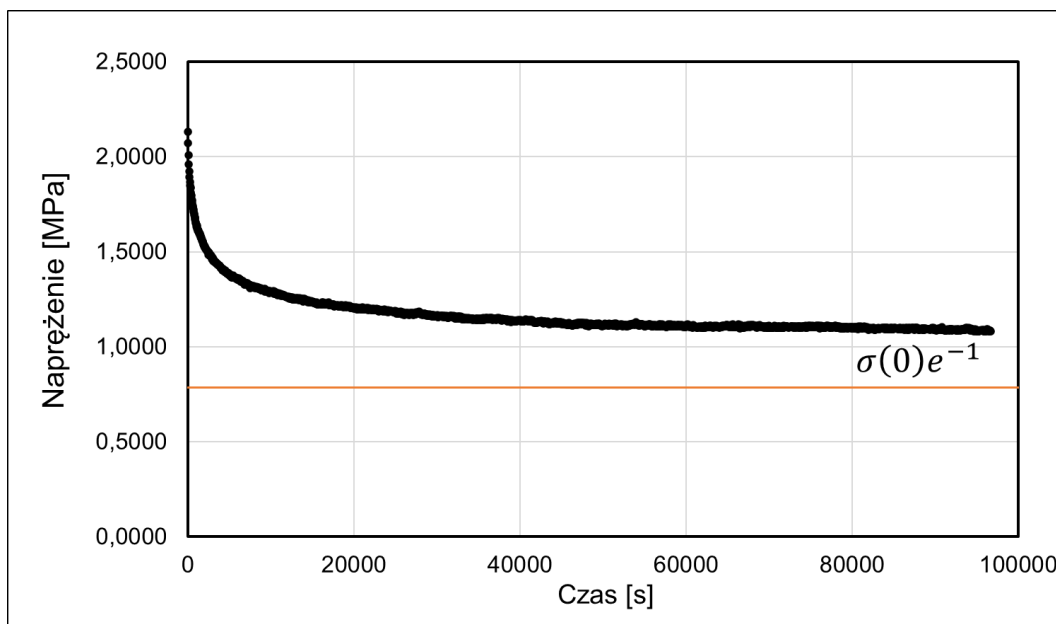
Analiza wykresów naprężenia od czasu pozwoliła wyznaczyć wartość czasu relaksacji naprężeń, który zgodnie z przyjętym modelem Maxwella odpowiada spadkowi naprężeń do poziomu około 36,8% wartości początkowej. Wyniki wraz z warunkami obciążenia (naprężenia, temperatura) zestawiono w wersji stabelaryzowanej (Tab. 4-19).

Przykładowy przebieg czasowy uzyskany w badaniu RT dla mieszanki SMA-MA 8 50/70 w temperaturze  $-15^{\circ}\text{C}$  przedstawiono na rysunku (Rys. 4-25).



Rys. 4-25 Przykładowy przebieg czasowy w badaniu RT (mieszanka SMA-MA 8 50/70 temperatura -15°C)

Czas relaksacji dla asfaltu lanego w temperaturze -25°C przyjęto na poziomie 100 000 s, mimo niespełnionego warunku odnośnie spadku naprężeń do poziomu 36,8% (Rys. 4-26). Po tym czasie badanie przerywano i nie obserwowano dalszych zmian naprężeń.



Rys. 4-26 Przebieg czasowy w badaniu RT (mieszanka MA temperatura -25°C), próbka nie osiągnęła 36,8% naprężeń początkowych po 100 000 sekund

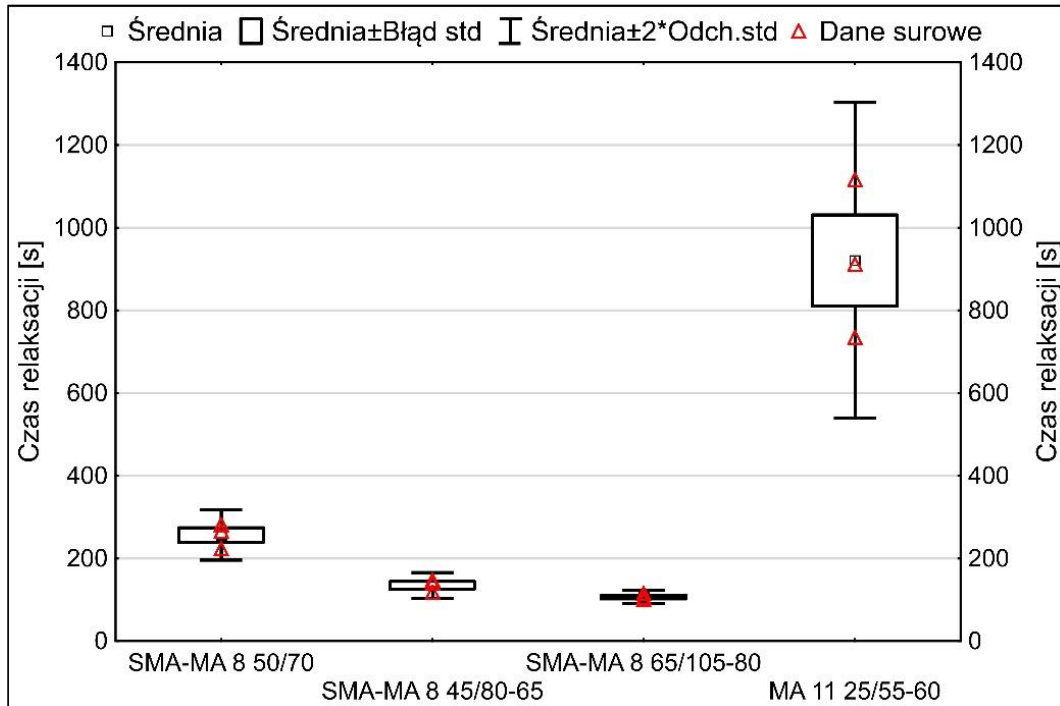


Tab. 4-19 Wyniki uzyskane w badaniu RT

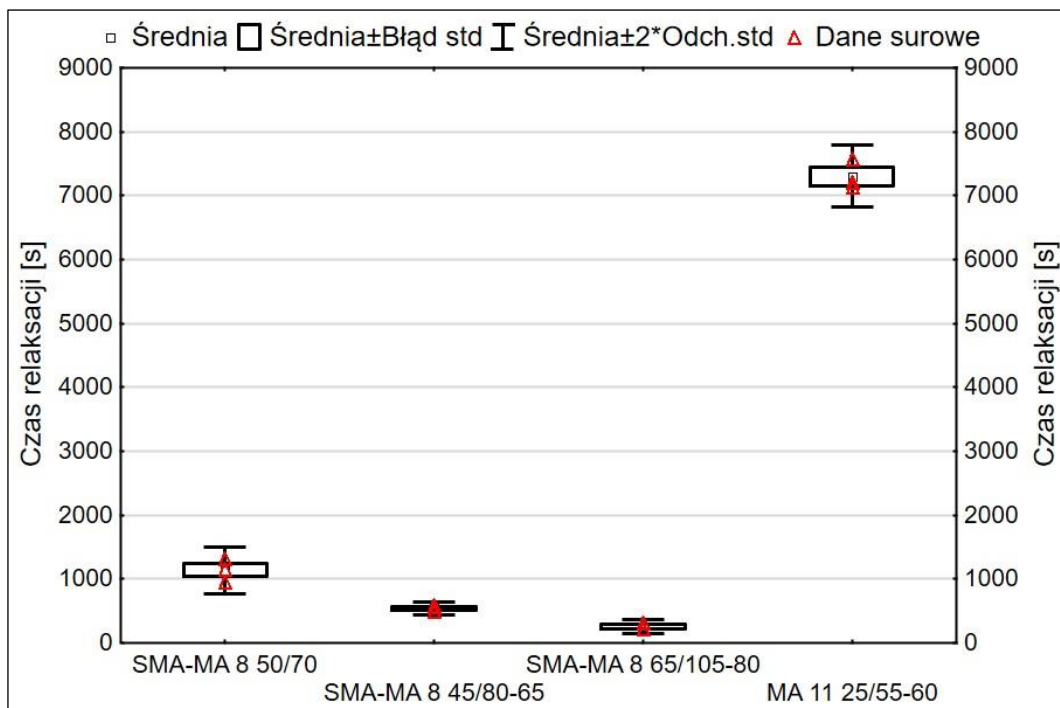
Mieszanka	Temp	Oznacz.	$\varepsilon$ %	$\sigma_{max}$ [MPa]	$t_r$ [s]	Temp	Oznacz.	$\varepsilon$ %	$\sigma_{max}$ [MPa]	$t_r$ [s]	Temp	Oznacz.	$\varepsilon$ %	$\sigma_{max}$ [MPa]	$t_r$ [s]
SMA MA 8 50/70	-10	Próbka 1	0,0509	4,11	266	-15	Próbka 1	0,0198	2,07	953	-25	Próbka 1	0,0140	2,43	33382
		Próbka 2	0,0376	2,89	282		Próbka 2	0,0213	2,27	1157		Próbka 2	0,0137	2,46	26245
		Próbka 3	0,0380	2,83	223		Próbka 3	0,0210	2,29	1317		Próbka 3	0,0146	2,47	26819
		<b>Średnia</b>	-	-	<b>257</b>		<b>Średnia</b>			<b>1142</b>		<b>Średnia</b>			<b>28815</b>
SMA- MA 8 PmB 45/80-65, (8,4%)		Próbka 1	0,0484	3,15	141		Próbka 1	0,0374	3,32	492		Próbka 1	0,0131	2,15	23839
		Próbka 2	0,0480	2,96	118		Próbka 2	0,0338	3,45	568		Próbka 2	0,0151	2,63	41533
		Próbka 3	0,0497	3,04	147		Próbka 3	0,0291	2,90	584		Próbka 3	0,0172	2,77	33628
		<b>Średnia</b>			<b>166</b>		<b>Średnia</b>			<b>548</b>		<b>Średnia</b>			33000
SMA- MA 8 HiMA 65/105-80		Próbka 1	0,0502	2,72	105		Próbka 1	0,0469	3,71	225		Próbka 1	0,0193	2,91	10650
		Próbka 2	0,0493	2,75	115		Próbka 2	0,0444	3,56	228		Próbka 2	0,0183	2,66	9585
		Próbka 3	0,0509	2,94	100		Próbka 3	0,0364	3,39	320		Próbka 3	0,0143	2,10	20214
		<b>Średnia</b>			<b>107</b>		<b>Średnia</b>			<b>258</b>		<b>Średnia</b>			13483
MA 11 PmB 25/55-60	Próbka 1	0,0195	2,83	735	Próbka 1	0,0164	2,79	7127	Próbka 1	0,0078	2,13	>100000			
	Próbka 2	0,0198	2,89	911	Próbka 2	0,0161	3,23	7200	Próbka 2	0,0106	3,01	>100000			
	Próbka 3	0,0197	3,04	1116	Próbka 3	0,0164	2,81	7578	Próbka 3	0,0111	3,13	>100000			
	<b>Średnia</b>			<b>921</b>	<b>Średnia</b>			<b>7302</b>	<b>Średnia</b>			>100000			
SMA- MA 8 PmB 45/80-65, (8,9%)	Próbka 1	0,0494	3,25	224	Próbka 1	0,0320	3,01	573	Próbka 1	0,0150	2,55	28375			
	Próbka 2	0,0509	3,44	312	Próbka 2	0,0327	3,18	937	Próbka 2	0,0150	2,43	17224			
	Próbka 3	0,0477	3,23	152	Próbka 3	0,0325	3,39	925	Próbka 3	0,0153	2,50	55624			
	<b>Średnia</b>			<b>229</b>	<b>Średnia</b>			<b>812</b>	<b>Średnia</b>			33741			
SMA- MA 8 PmB 45/80-65, (7,9%)	Próbka 1	0,0507	3,67	195	Próbka 1	0,0305	3,35	1423	Próbka 1	0,0151	2,74	58941			
	Próbka 2	0,0485	3,83	208	Próbka 2	0,0246	2,93	1300	Próbka 2	0,0151	2,79	37478			
	Próbka 3	0,0394	3,21	256	Próbka 3	0,0254	2,69	1608	Próbka 3	0,0152	2,72	32031			
	<b>Średnia</b>			<b>220</b>	<b>Średnia</b>			<b>1444</b>	<b>Średnia</b>			<b>42817</b>			

#### 4.4.2. Zależność czasu relaksacji od rodzaju lepiszcza asfaltowego w badaniu RT

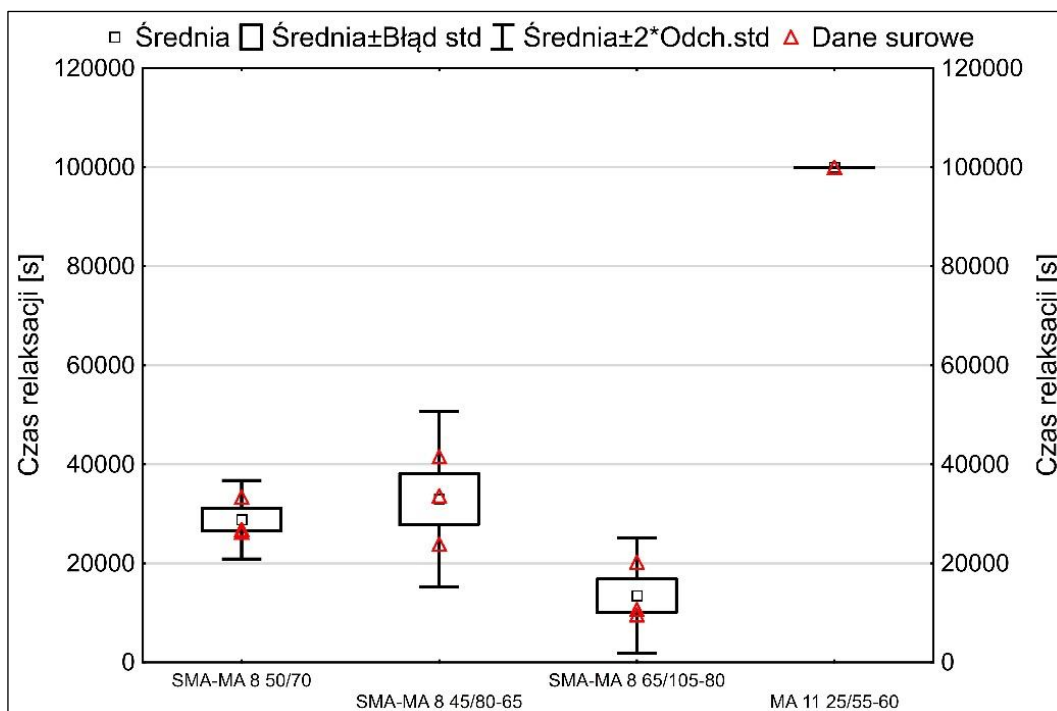
Analizę wpływu czasu relaksacji naprężeń od rodzaju lepiszcza asfaltowego w badaniu RT rozpoczęto od przeanalizowania wykresów ramka-wąsy (Rys. 4-27, Rys. 4-28, Rys. 4-29).



Rys. 4-27 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -10°C



Rys. 4-28 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -15°C



Rys. 4-29 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze  $-25^{\circ}\text{C}$

Otrzymane wartości czasu relaksacji w badaniu RT są w znacznym stopniu zbieżne z wynikami otrzymanymi w badaniu TCT, przy czym rozrzuty pomiędzy wynikami są znacznie mniejsze (przykładowo w temperaturze  $-15^{\circ}$  dla mieszanki SMA-MA z asfaltem 50/70 w teście TCT rozrzuty wyniosły 1000 s, natomiast w badaniu RT – 365 s). Skutkuje to węższymi przedziałami ufności dla średnich. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że do wyznaczenia czasu relaksacji w badaniu RT nie jest potrzebne wykonywanie dodatkowych obliczeń w celu uzyskania parametrów modelu reologicznego. Również sam czas relaksacji w badaniu RT nie jest obciążony niepewnością wynikającą z metody najmniejszych kwadratów.

Najdłuższym czasem relaksacji w każdej temperaturze badania cechuje się mieszanka typu asfalt lany MA 11 PmB 25/55-60 (od 921 s do ponad 100 000 s). Najkrótszym czasem relaksacji cechuje się mieszanka SMA-MA 8 HiMA 65/105-80 (od 107 do 13483 s).

Przeprowadzona analiza wariancji wraz z wynikami testu Tukeya, wskazują, że różnice w pomierzonych czasach relaksacji w temperaturze  $-10^{\circ}\text{C}$  dla wszystkich mieszanek SMA-MA 8 są statystycznie istotne (Tab. 4-20). Istotnie różni się mieszanka MA 8 PmB 25/55-60 (dotyczy to wszystkich temperatur badania).

Tab. 4-20 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu RT (-10 °C)

<b>Test HSD Tukeya; zmienna Czas relaksacji -10</b>			
<b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b>			
<b>Błąd: MS międzygrupowe = 9417,2; df = 8,0000</b>			
<b>Mieszanka</b>	<b>Czas relaksacji Średnia [s]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	106,6133	****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	135,2267	****	
SMA-MA 8 50/70	256,7200	****	
MA 11 PmB 25/55-60	920,7467		****

Tab. 4-21 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu RT (-15 °C)

<b>Test HSD Tukeya; zmienna Czas relaksacji -15</b>				
<b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b>				
<b>Błąd: MS międzygrupowe = 24313, df = 8,0000</b>				
<b>Mieszanka</b>	<b>Czas relaksacji Średnia [s]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	257,533	****		
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%).	547,840	****		
SMA-MA 8 50/70	1142,253		****	
MA 11 PmB 25/55-60	7301,547			****

Tab. 4-22 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu RT (-25 °C)

<b>Test HSD Tukeya; zmienna Czas relaksacji -25</b>				
<b>Grupy jednorodne, alfa = 0,05000</b>				
<b>Błąd: MS międzygrupowe = 3214E4, df = 8,0000</b>				
<b>Mieszanka</b>	<b>Czas relaksacji Średnia [s]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	257,533	****		
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	547,840	****		
SMA-MA 8 50/70	1142,253		****	
MA 11 PmB 25/55-60	100000,0			****

Różnice czasu relaksacji mieszanek SMA-MA 8 z asfaltami modyfikowanymi (PmB 45/80-65 oraz HiMA 65/105-80) w temperaturze -15°C są statystycznie nieistotne (Tab. 4-21). Mieszanka SMA-MA 8 50/70 różni się istotnie od mieszanek SMA-MA z asfaltem modyfikowanym. Analogiczne wyniki uzyskano w temperaturze -25°C (Tab. 4-22).

W najniższej temperaturze (-25°C) zaobserwowano największe zróżnicowanie pomierzonych wartości w danej serii pomiarowej. Wzrost rozrzutów pomiędzy wartościami z oznaczenia wraz z spadkiem temperatury badania jest wynikiem systemu pomiarowego. Spadek temperatury badania skutkuje zmniejszaniem wielkości przykładanych odkształceń. Utrzymanie ich na niezmiennym

poziomie (z każdym kolejnym spadkiem temperatury – mniejszym) jest utrudnione. Zmniejsza to powtarzalność metody badawczej. Współczynnik zmienności dla mieszanki SMA-MA8 z asfaltem PmB 45/80-65 wzrósł z 11,4% w temperaturze -10°C do 26,8% w temperaturze -25°C.

Kolejnym etapem było poszukiwanie korelacji pomiędzy właściwościami wyekstrahowanego asfaltu z próbek MMA a czasem relaksacji w badaniu RT. Podobnie jak przy badaniu TCT najlepszą korelację uzyskano dla wartości penetracji w 25°C. Do opisanie tej zależności przyjęto funkcję wykładniczą opisaną wzorem (4.5):

$$t_r = e^{aPEN+b} \quad (4.5)$$

gdzie:

$t_r$  – czas relaksacji, s;

$PEN$  – penetracja asfaltu wyekstrahowanego z MMA,  $\times 0.1$  mm;

$a, b$  – współczynniki szukanej funkcji.

W przypadku badania RT nie wyznaczono krzywych dla temperatury -25°C. Było to podyktowane brakiem wyników zmian w relaksacji naprężeń w mieszance asfaltu lanego (w tej temperaturze nie uzyskano miarodajnych wyników, a przyjęto do porównań czas, po którym przerwano badanie, tj. 100 000 s).

Dopasowanie modelu prowadzono w dwóch wariantach (Tab. 4-23). W pierwszym wariacie uwzględniono wszystkie asfalty, w tym niemodyfikowany 50/70. W drugim analizowano wyłącznie asfalty modyfikowane polimerem. W rozważaniach pominięto wyniki uzyskane dla SMA-MA 8 PmB 45/80-65 z zawartością asfaltu różną od optymalnej ( $\pm 0.5\%$ ). Otrzymane wykresy przebiegu funkcji przedstawiono na rysunkach (Rys. 4-30, Rys. 4-31).

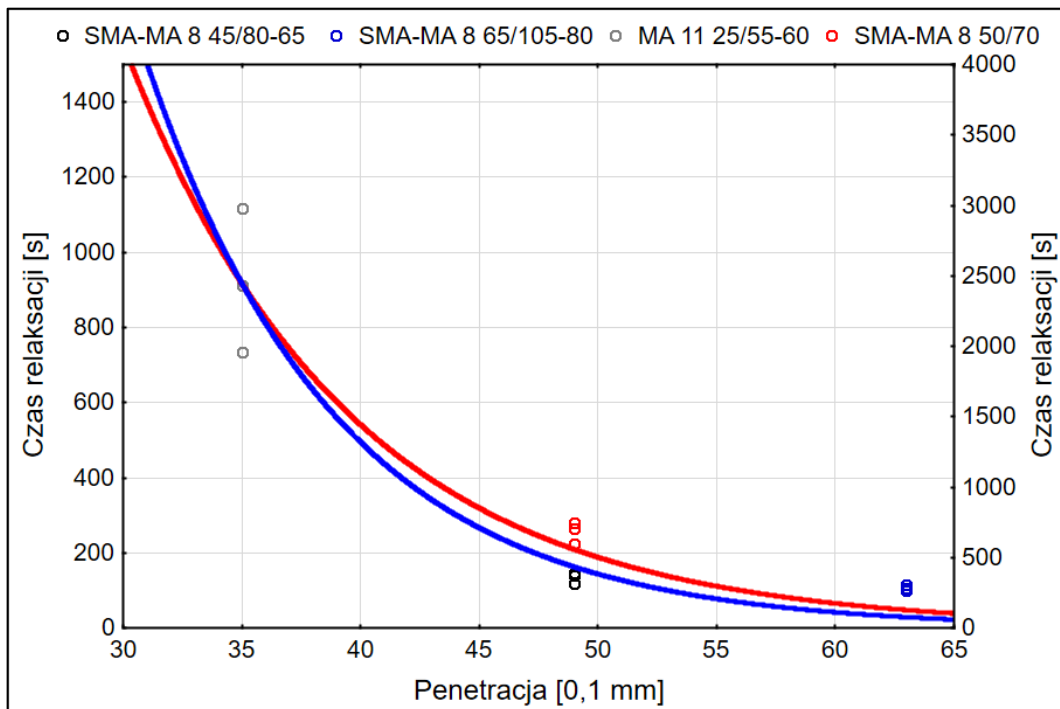
Podobnie jak w przypadku testu TCT uzyskano dopasowanie funkcji wykładniczej do punktów pomiarowych, co potwierdza wysoka wartość współczynnika determinacji  $R^2$  ( $\geq 0.92$ ). Korelacja pomiędzy penetracją w 25°C wyekstrahowanego asfaltu i czasem relaksacji RT jest bardzo silna. Krzywe z asfaltem 50/70 i bez tego asfaltu pokrywają się w mniejszym stopniu niż w przypadku badania TCT. Uwzględnienie asfaltu 50/70 przesunęło krzywą w górę na osi rzędnych, co wskazuje na dłuższy czas relaksacji.

Uzyskane zależności, pokazane na rys. 4-29 i rys. 4-29, świadczą o tym, że twarde asfalty znacznie wolniej relaksują naprężenia indukowane w mieszankach mineralno-asfaltowych, co może przekładać się na ich niższą odporność na niskie (ujemne) temperatury.

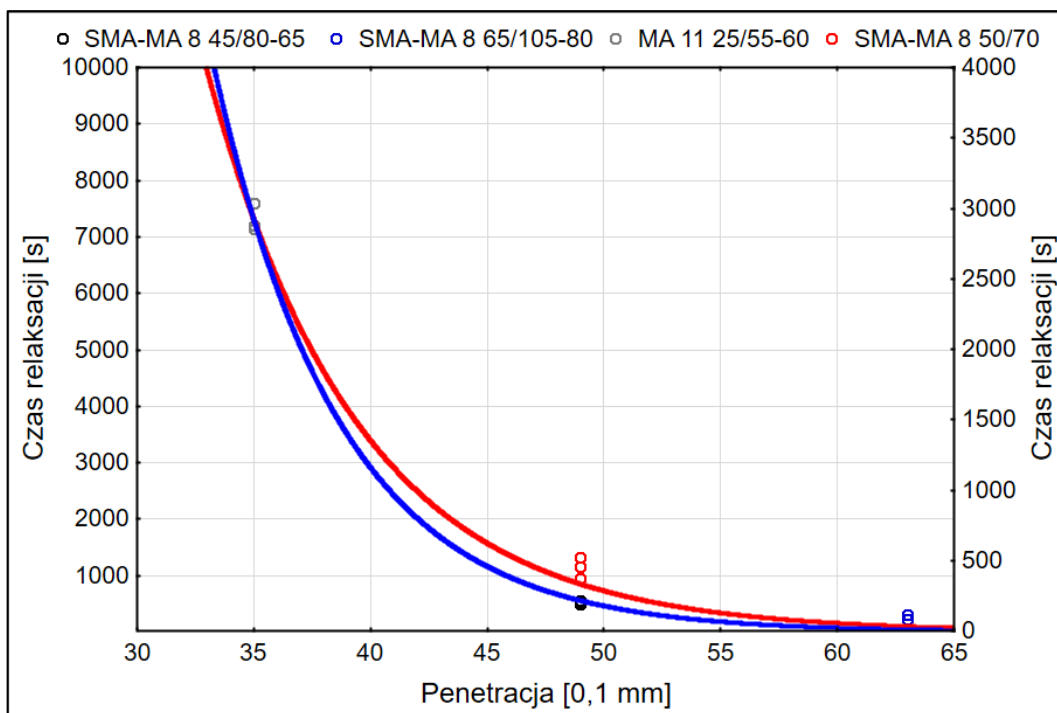
Tab. 4-23 Wyniki metody najmniejszych kwadratów w badaniu RT

Temp	Krzywa	Parametr	Ocena	Błąd	Wartość t	Dolna granica ufności	Dolna granica ufności	R <sup>2</sup>
-10	z 50/70	a	-0,106	0,015	-7,262	-0,138	-0,073	0,96
		b	10,516	0,533	19,747	9,329	11,702	
	bez 50/70	a	-0,124	0,028	-4,401	-0,190	-0,057	0,96
		b	11,148	0,998	11,168	8,787	13,508	
-15	z 50/70	a	-0,154	0,010	-15,407	-0,176	-0,131	0,99
		b	14,274	0,353	40,389	13,486	15,061	
	bez 50/70	a	-0,184	0,014	-12,688	-0,218	-0,150	0,99
		b	15,336	0,509	30,140	14,133	16,539	

Poziom ufności: 95.0% ( alfa=0,050)



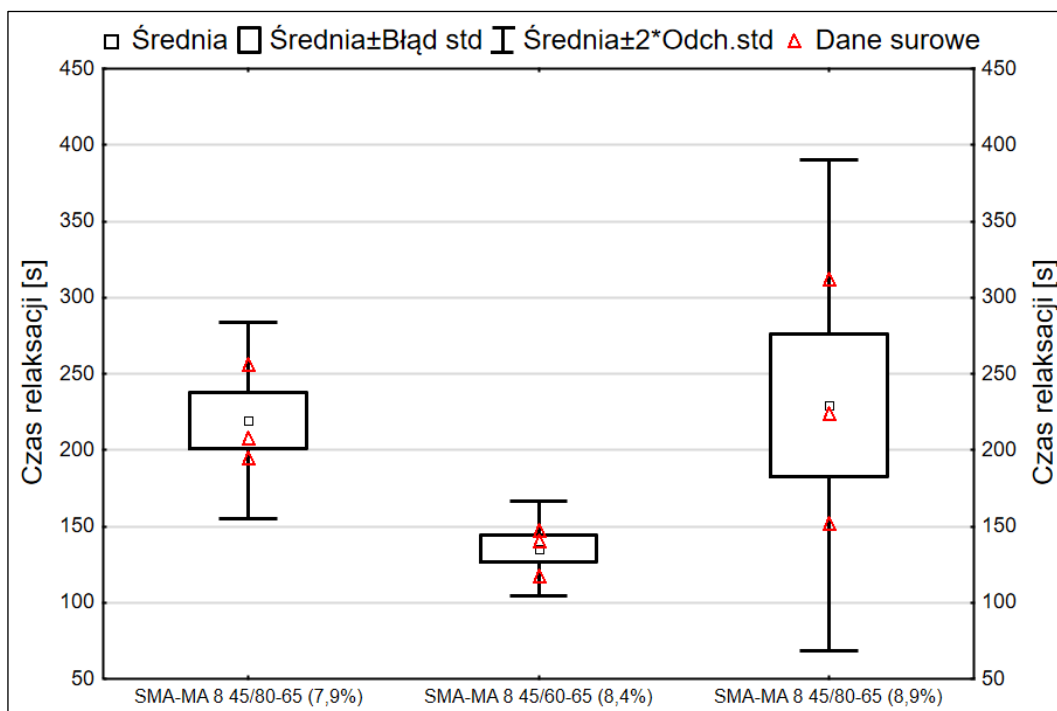
Rys. 4-30 Czas relaksacji naprężeń w badaniu RT w zależności od penetracji asfaltu wykstrahowanego (temperatura -10°C), krzywa czerwona z asfaltem 50/70, niebieska bez asfaltu 50/70



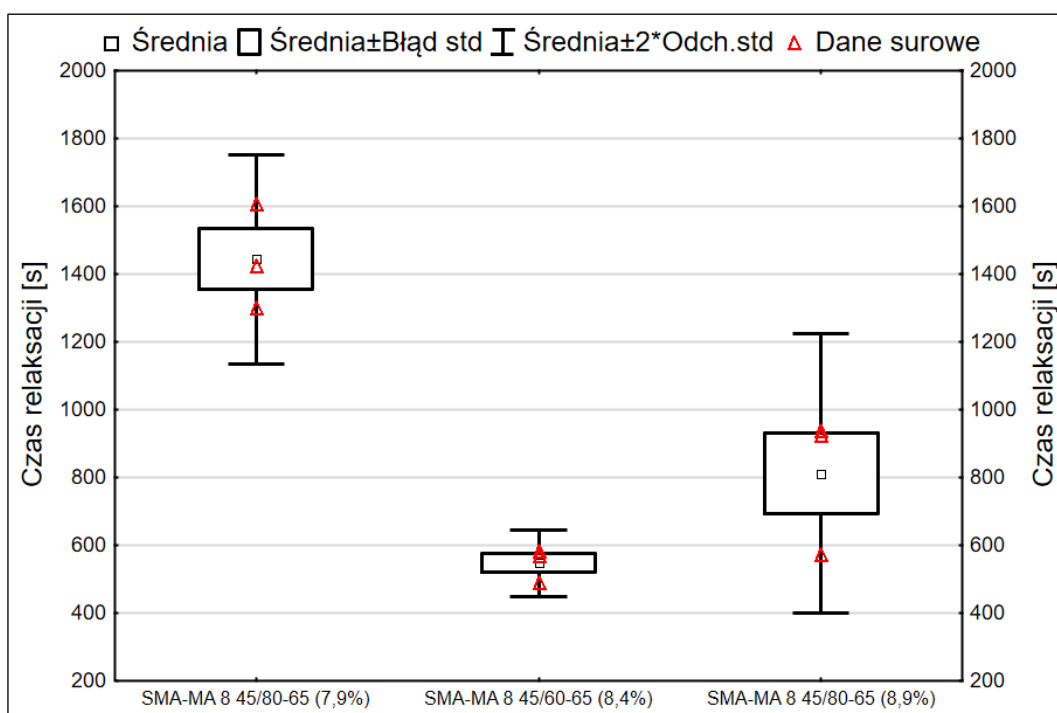
Rys. 4-31 Czas relaksacji naprężeń w badaniu RT w zależności od penetracji asfaltu wykstrahowanego (temperatura  $-15^{\circ}\text{C}$ ), krzywa czerwona z asfaltem 50/70, niebieska bez asfaltu 50/70

#### 4.4.3. Zależność czasu relaksacji od zawartości lepiszcza w badaniu RT

Analizę wpływu czasu relaksacji naprężeń od zawartości lepiszcza asfaltowego w badaniu RT dla mieszanki SMA-MA PmB 45/80-65 rozpoczęto od przeanalizowania wykresów ramka-wąsy (Rys. 4-32, Rys. 4-33, Rys. 4-34).

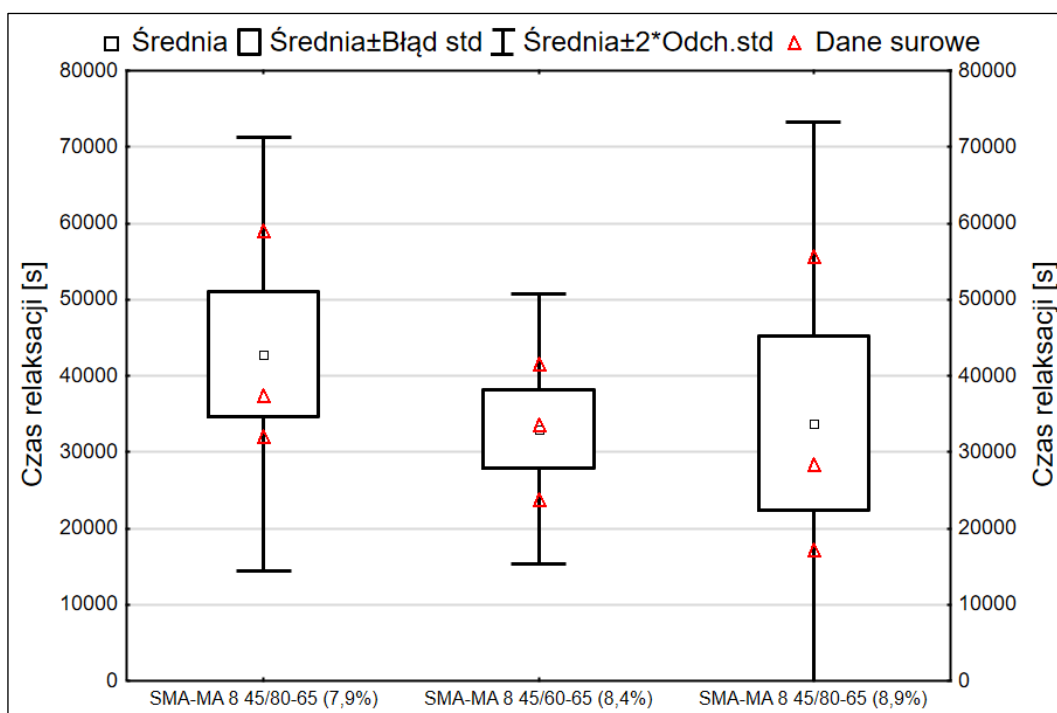


Rys. 4-32 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -10°C (zawartość lepszczu)



Rys. 4-33 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -15°C (zawartość lepszczu)





Rys. 4-34 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -25°C (zawartość lepiszcza)

W każdej z temperatur badania średnia wartość uzyskanego czasu relaksacji dla mieszanki z zawartością asfaltu 8,4% (zawartość optymalna) była najmniejsza i wynosiła kolejno 135, 548 i 33000 sekund.

W celu sprawdzenia istotności różnic pomiędzy uzyskanymi wynikami przeprowadzono analizę wariancji. Tylko w przypadku temperatury -15°C uzyskano istotne różnice. Z tego względu przeprowadzono tylko jeden test post-hoc (test Tukey’a Tab. 4-24).

Tab. 4-24 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu RT (-15 °C), różna zawartość lepiszcza

Test HSD Tukeya; zmienna Czas relaksacji -15			
Grupy jednorodne, alfa = 0,05000			
Błąd: MS międzygrupowe = 23037, df = 6,0000			
Mieszanka	Czas relaksacji Średnia [s]	1	2
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,4%)	547,8	****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (8,9%)	812,0	****	
SMA-MA 8 PmB 45/80-65 (7,9%)	1443,7		****

Należy stwierdzić, że tylko w temperaturze -15°C różnice między uzyskanymi wynikami są istotne. Istotnie krótszy czas relaksacji zaobserwowano w mieszankach SMA-MA z zawartością

asfaltu 8,4% i 8,9%. Przy zawartości asfaltu 7,9% czas relaksacji znacząco się zwiększył, co może być efektem większego usztywnienia lepiscza w wyniku jego strukturyzacji na powierzchni kruszywa (przy cienkiej błonce zwiększa się poziom strukturyzacji lepiscza).

Wyniki badań dla mieszanki SMA-MA z zawartością asfaltu 8,9% cechują się bardzo dużym rozrzutem wyników we wszystkich temperaturach badania. Jest to kolejny dowód na to, że w mieszance o podwyższonej zawartości lepiscza może dochodzić do segregacji.

#### 4.4.4. Zależność czasu relaksacji w badaniu RT od temperatury badania

Temperatura mieszanek SMA-MA i MA wpływa na czas ich relaksacji (a dokładniej logarytm dziesiąty z czasu relaksacji), co przedstawiono na wykresie (Rys. 4-35). Podobnie, jak w przypadku testów TCT, wykonano regresję liniową opisaną wzorem (4.6):

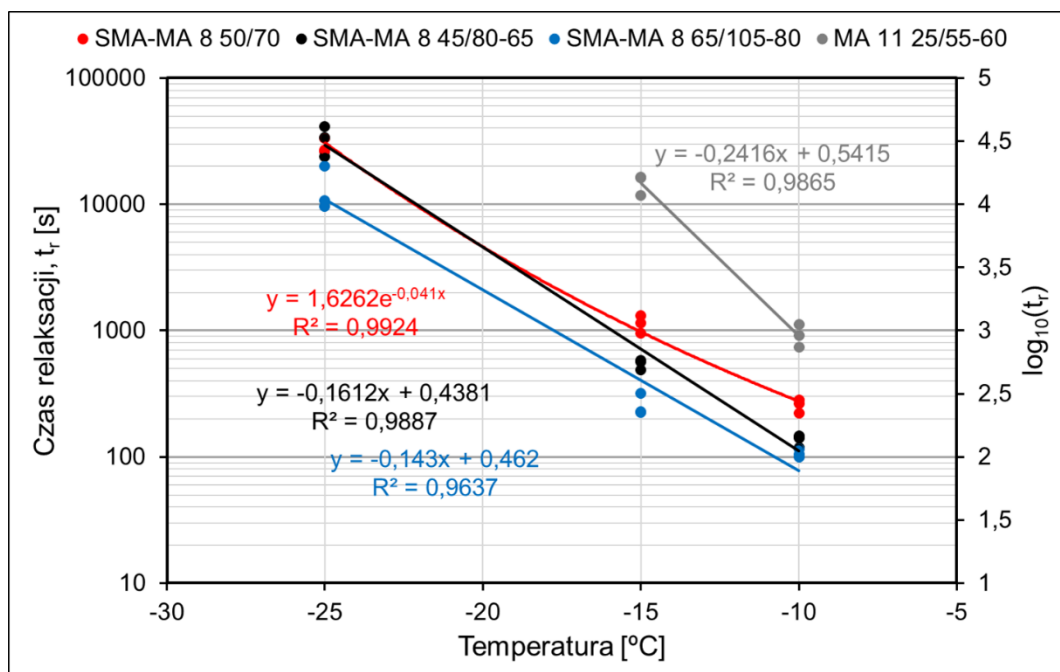
$$\log_{10}(t_r) = aT + b \quad (4.6)$$

gdzie:

$\log_{10}(tr)$  – logarytm z czasu relaksacji;

$T$  – temperatura wykonywanego oznaczenia, °C;

$a, b$  – współczynniki regresji liniowej.



Rys. 4-35 Zależność czasu relaksacji od temperatury oznaczenia w badaniu RT

Wyniki przeprowadzonej regresji przedstawiono w tabeli (Tab. 4-25). Dopasowanie wyrażone współczynnikiem determinacji  $R^2$  jest bardzo duże ( $> 0.96$ ).

Porównując zależności przedstawione na rys. Rys. 4-24 i Rys. 4-35 (oraz w Tab. 4-17 i Tab. 4-25) można zaobserwować pewne różnice. Najważniejsza dotyczy wartości bezwzględnej współczynnika kierunkowego „a” dla asfaltu lanego, który w badaniu RT był największy (w badaniu TCT była to najmniejsza wartość). W mieszankach SMA-MA 8 wartości tego współczynnika są do siebie zbliżone, przy czym najbardziej podatną na zmiany temperatury jest mieszanka SMA-MA PmB 45/80-65.

Tab. 4-25 Wyniki regresji liniowej zależności logarytmu z czasu relaksacji naprężeń od temperatury w badaniu RT (zależność liniowa)

Mieszanka	a	b	R <sup>2</sup>
MA 11 PmB 25/55-60	-0,242	0,542	0,99
SMA-MA 8 50/70	-0,137	1,020	0,99
SMA-MA8 PmB 45/80-65	-0,161	0,438	0,99
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	-0,143	0,462	0,96

Wykresy przedstawione na rys. 4-35 pokazują, że w przypadku asfaltów modyfikowanych PmB 45/80-65 oraz HiMA 65/105-80 wartości czasów relaksacji dla temperatury -15°C przebiegają poniżej wyznaczonej funkcji regresji liniowej. Umieszczenie wartości pomiarowych wskazuje na przebieg wykładniczy, co można opisać zależnością (4.7):

$$\log_{10}(t_r) = ae^{bT} \quad (4.7)$$

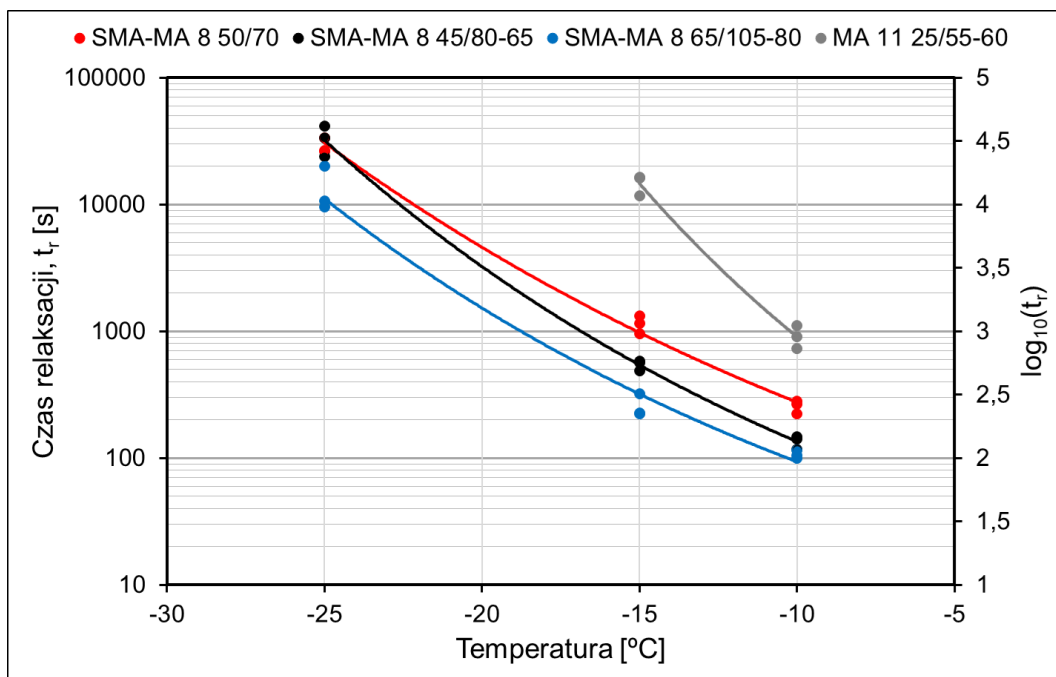
gdzie:

$\log_{10}(tr)$  – logarytm z czasu relaksacji;

$T$  – temperatura wykonywanego oznaczenia, C;

$a, b$  – współczynniki regresji.

Wykres przedstawiono na rysunku Rys. 4-36, natomiast wyniki regresji przedstawiono w tabeli (Tab. 4-26). Dopasowanie wyrażone współczynnikiem determinacji R<sup>2</sup> jest bardzo duże ( $\geq 0.98$ ). Wyniki uzyskane dla asfaltów lanych należy uznać za wiarygodne, ale wyłącznie dla zakresu temperatur od -15°C do -10°C. Jest to efektem braku wiarygodnych wyników w temperaturze -25°C.



Rys. 4-36 Zależność logarytmu z czasu relaksacji od temperatury oznaczenia w badaniu RT (dopasowanie do funkcji wykładniczej)

Tab. 4-26 Wyniki regresji zależności logarytmu z czasu relaksacji naprężeń od temperatury w badaniu RT (zależność wykładnicza)

Mieszanka	a	b	R <sup>2</sup>
MA 11 PmB 25/55-60	1,49	-0,069	0,98
SMA-MA 8 50/70	1,62	-0,041	0,99
SMA-MA 8 PmB 45/80-65	1,29	-0,050	0,99
SMA-MA 8 HiMA 65/105-80	1,22	-0,048	0,98

Porównanie uzyskanych wyników z przeprowadzonych regresji prowadzi do wniosku, że w przypadku badania RT funkcja wykładnicza lepiej opisuje zależność logarytmu z czasu relaksacji od temperatury.

#### 4.4.5. Podsumowanie wyników badań w teście RT

Analiza wyników z przeprowadzonych oznaczeń w teście RT pozwala na sformułowanie wniosków i konkluzji, dotyczących zarówno analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych jak i samego badania. Do najważniejszych można zaliczyć:

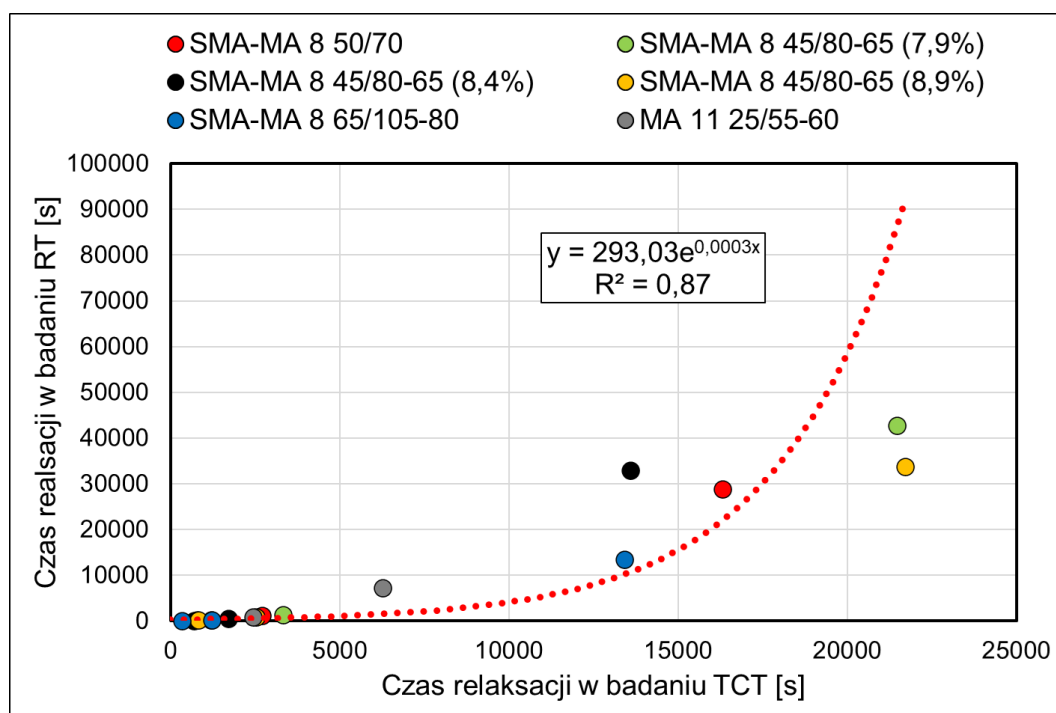
- czas relaksacji w badaniu RT zależy przede wszystkim od temperatury badania oraz rodzaju (twardości) asfaltu;
- różnice w czasie relaksacji dla mieszanki SMA-MA 8 PmB 45/80-65 o różnej zawartości lepiszcza są w większości statystycznie nieistotne;

- badanie w teście RT jest trudne w wykonaniu ze względu na potrzebę wykorzystania zaawansowanej aparatury badawczej, zapewniającej nadanie i utrzymanie odpowiedniego poziomu odkształceń;
- w przypadku materiałów o długim czasie relaksacji znacząco wydłuża się czas wykonywania oznaczenia (ponad 24 godz.),
- w przypadku badania materiałów cechujących się w danej temperaturze krótkim czasem relaksacji (relaksacja natychmiastowa) różnice w wynikach mogą być statystycznie nieistotne,
- w dalszych badaniach należy skupić się gromadzeniu kolejnych danych z różnymi asfaltami, cechującymi się różną twardością (lub innymi właściwościami, np. opisującymi cechy niskotemperaturowe lepiszczy), tak aby można było znaleźć zależności o charakterze fizycznym pomiędzy badanymi cechami.

## 4.5. OCENA ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY WYKONYWANYMI TESTAMI

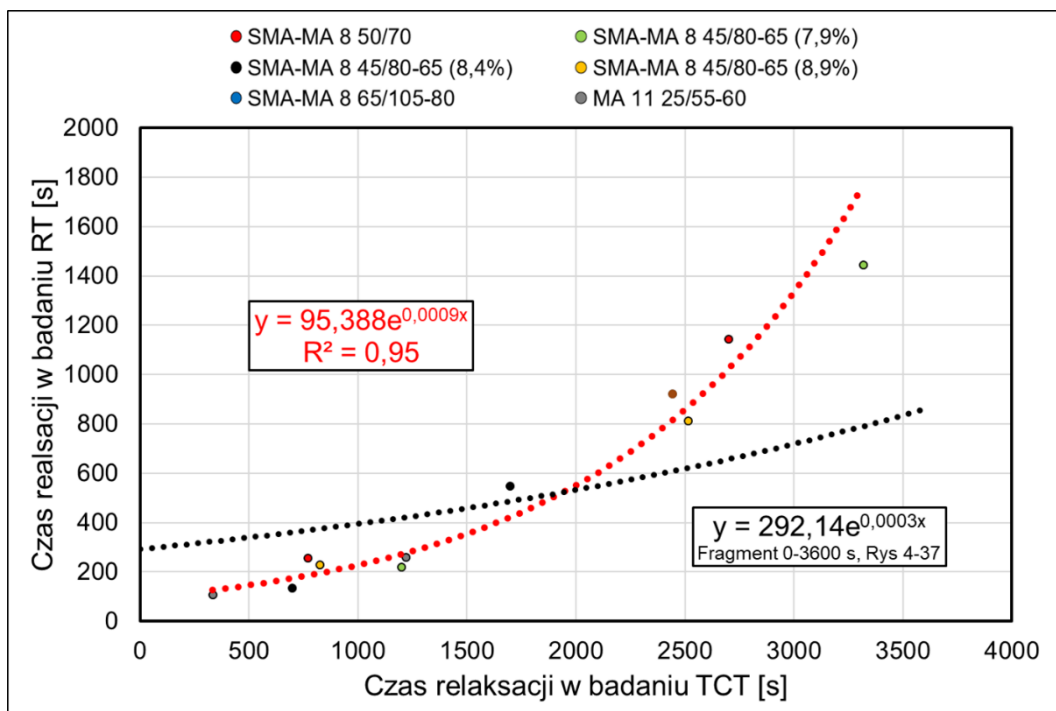
### 4.5.1. Zależność czasów relaksacji uzyskanych w testach TCT i RT

Na podstawie uzyskanych czasów relaksacji, otrzymanych w badaniach TCT (podrozdział 4.3) oraz RT (podrozdział 4.4), ustalono zależność pomiędzy wynikami z poszczególnych metod. Mimo, że czas relaksacji uzyskiwany w teście pełzania (TCT) każdorazowo był istotnie większy od czasu relaksacji uzyskiwanego w teście relaksacji (RT), to otrzymano silną korelację pomiędzy otrzymanymi wynikami. Na wykresie (Rys. 4-37) przedstawiono uzyskane wyniki (wartości średnie czasów relaksacji) wraz z krzywą wykładniczą, opisującą zależność, w całym zakresie prowadzenia badań.



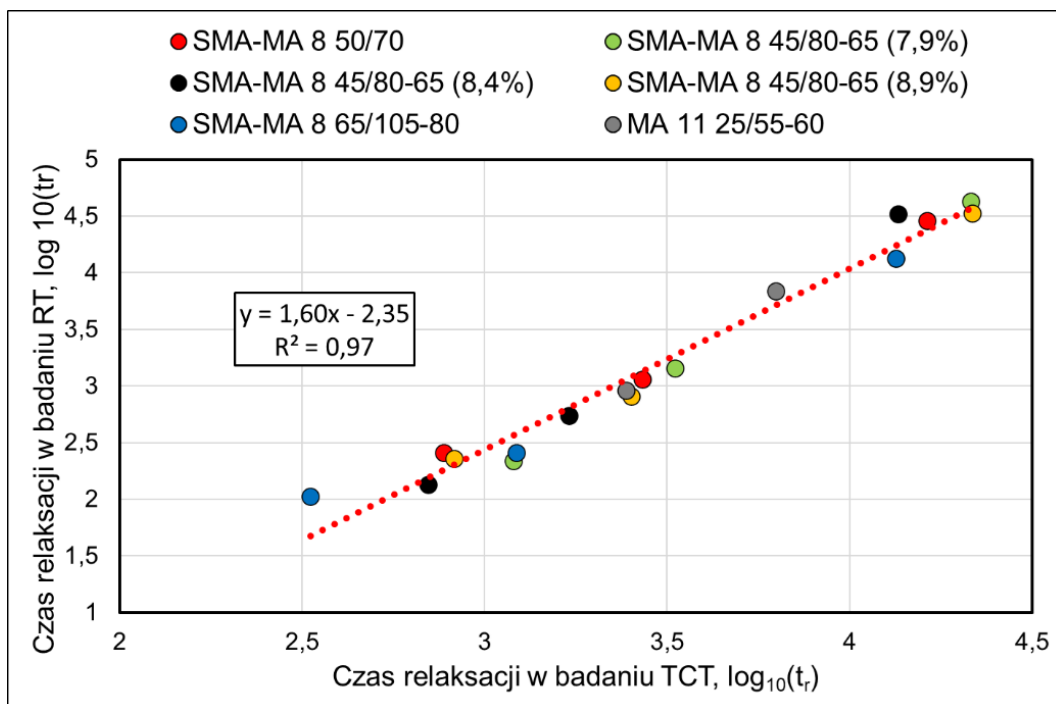
Rys. 4-37 Zależność czasów relaksacji uzyskanych w badaniu TCT oraz RT

Uzyskane dopasowanie jest niesatysfakcjonujące, w szczególności dla uzyskanych wyników czasu relaksacji w badaniu TCT poniżej 3600 s (Rys. 4-38). Z tego powodu ograniczono analizę do czasu jednej godziny i otrzymano funkcję wykładniczą. Uzyskana korelacja okazała się bardzo silna (wartość współczynnika determinacji wyniosła  $R^2 = 0,95$ ). Na wykresie (Rys. 4-38) przedstawiono wyniki w zakresie 0-3600 s, z uwzględnieniem otrzymanej funkcji dla całego przedziału prowadzenia badań.



Rys. 4-38 Zależność czasów relaksacji uzyskanych w badaniu TCT oraz RT, w przedziale czasu 0-3600 s, kolor czarny fragment funkcji z Rys. 4-37

Przedstawienie wyników czasów relaksacji uzyskanych w poszczególnych badaniach w skali logarytmicznej pozwoliło uzyskać funkcję liniową o współczynniku determinacji  $R^2 = 0,97$ . W tym przypadku uzyskana zależność dobrze opisuje wyniki w całym zakresie prowadzonych badań.



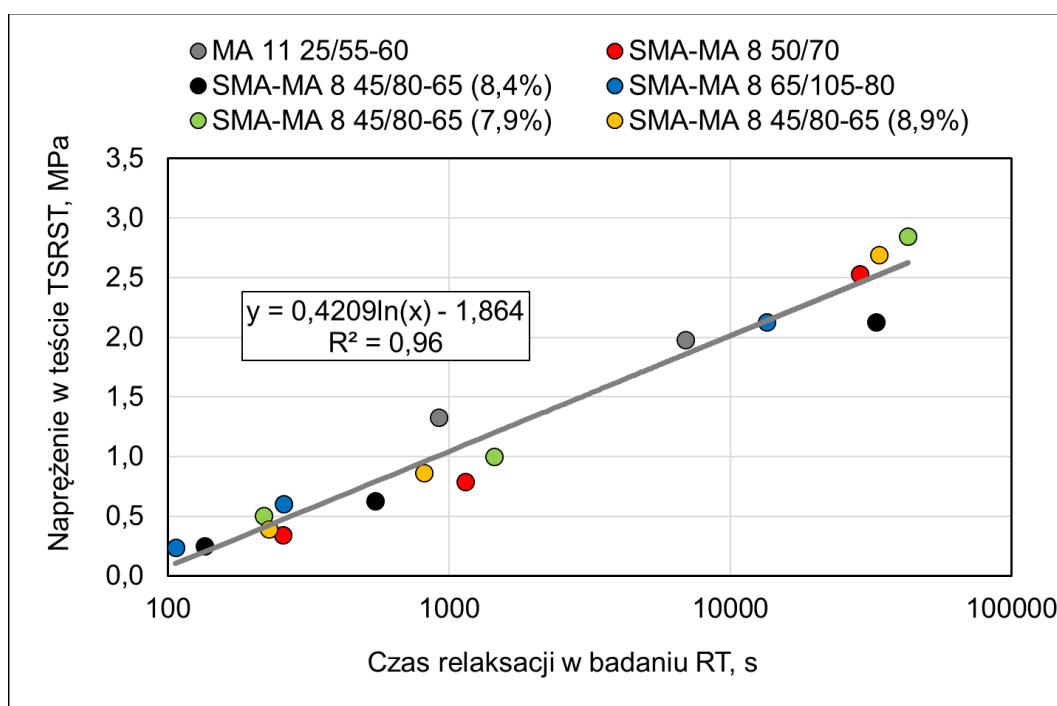
Rys. 4-39 Zależność czasów relaksacji uzyskanych w badaniu TCT oraz RT, w układzie log-log

Wykonanie badania relaksacji naprężeń RT jest dość kłopotliwe i wymaga zaawansowanej aparatury badawczej. Ocena tego parametru (czasu relaksacji) pośrednio w badaniu pełzania (TCT) wydaje się dobrą alternatywą. Z drugiej strony kryterium oceny w teście RT (spadek naprężeń o 63,2%) jest dużo prostsze w zastosowaniu niż poszukiwanie parametrów modelu Burgersa.

Uzyskane zależności (Rys. 4-38, Rys. 4-39) mogą okazać się pomocne w dalszych badaniach nad zachowaniem się mieszanek mineralno-asfaltowych w ujemnych temperaturach.

#### 4.5.2. Zależność między czasem relaksacji w testach TCT i RT i parametrami badania TSRST

Wartości pomierzonych naprężeń w teście TSRST (Rys 4-5) w charakterystycznych temperaturach (-10°C, -15°C, -25°C) i odpowiadające im czasy relaksacji RT wykorzystano do znalezienia zależności między tymi cechami (Rys. 4-40). Przebieg zależności naprężenie (z testu TSRST) – czas relaksacji RT w funkcji logarytmicznej wskazuje na bardzo silną korelację między wartościami pomierzonymi w badaniach ( $R^2 = 0,96$ ). Zarówno mieszanki SMA-MA jak i MA dobrze wpisują się w wyznaczoną funkcję.

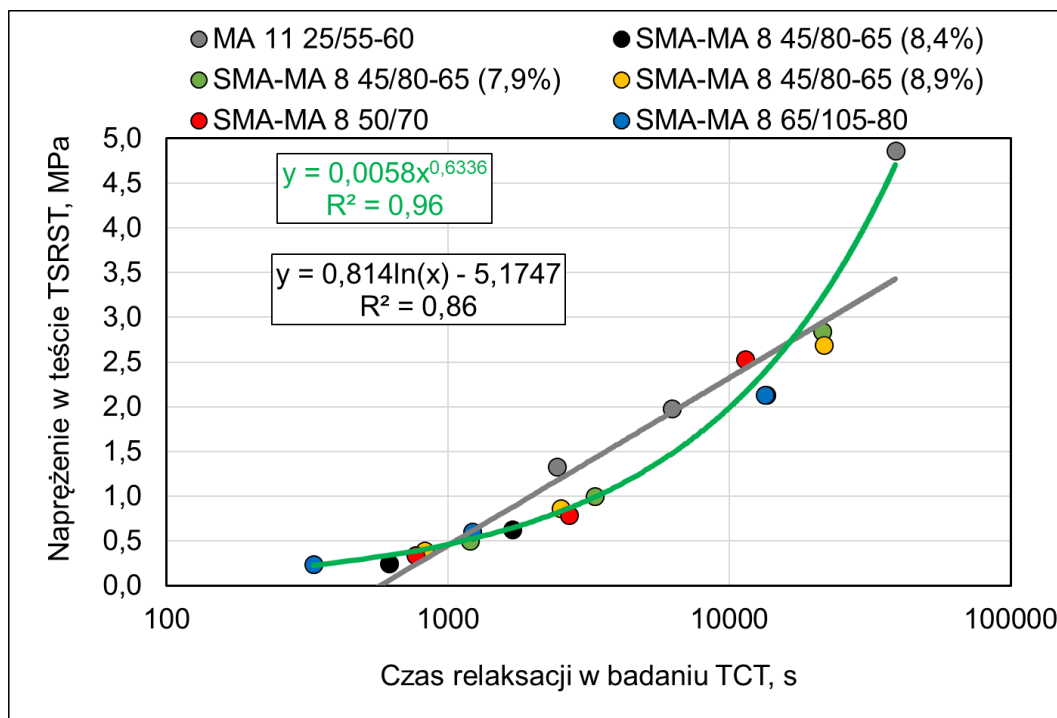


Rys. 4-40 Zależność naprężeń uzyskanych w badaniu TSRST od czasu relaksacji uzyskanego w badaniu RT

Na rysunku (Rys. 4-41) przedstawiono zależność między naprężeniami (pomierzonymi w temperaturze -10°C, -15°C, -25°C) w badaniu TSRST a czasem relaksacji w badaniu TCT. W tym przypadku do opisanie zależności wykorzystano funkcję logarytmiczną (kolor szary) oraz potęgową (kolor zielony). Funkcja potęgowa cechuje się lepszym dopasowaniem oraz współczynnikiem



determinacji równym  $R^2=0,9588$ . Należy zwrócić uwagę, że część wyników otrzymanych dla mieszanki typu asfalt lany odbiega od wyznaczonej funkcji potęgowej (punkty koloru szarego). Efektu takiego nie obserwowano dla analogicznych analiz dla badania w teście RT, gdzie mieszanki MA również dobrze wpisały się w otrzymaną funkcję logarytmiczną (Rys. 4-40).



Rys. 4-41 Zależność naprężeń uzyskanych w badaniu TSRST od czasu relaksacji uzyskanego w badaniu TCT

Mając na uwadze powyższe analizy można wnioskować, że czas relaksacji uzyskany w badaniu RT oraz TCT może służyć do modelowania zachowywania się mieszanek mineralno-asfaltowych w badaniu TSRST. Powinno to jednak być obszarem dalszych poszukiwań, bazujących na znacznie większej ilości wyników (czasów relaksacji) w różnych temperaturach oraz różnych mieszankach.

#### 4.5.3. Podsumowanie porównań pomiędzy poszczególnymi testami

Analiza wyników z przeprowadzonych oznaczeń w testach TSRST, TCT i RT pozwala na sformułowanie wniosków i konkluzji odnośnie zależności pomiędzy nimi. Do najważniejszych można zaliczyć:

- wyniki uzyskane w testach RT i TCT cechują się bardzo silną korelacją w zakresie 0-3600 s. Zależność tą opisuje funkcja wykładnicza (rys. 4-36), natomiast w pełnym zakresie przeprowadzonych badań powyższą zależność lepiej opisuje funkcja liniowa w układzie log-log (Rys. 4-39);

- funkcja logarytmiczna dobrze opisuje zależność pomiędzy naprężeniami rejestrowanymi w badaniu TSRST a wartościami czasu relaksacji w badaniu RT (rys. 4-38);
- funkcja potęgowa dobrze opisuje zależność pomiędzy naprężeniami rejestrowanymi w badaniu TSRST a wartościami czasu relaksacji w badaniu TCT (w odróżnieniu do badania RT zauważalny jest wpływ rodzaju mieszanki – MA);
- należy prowadzić dalsze badania w celu gromadzenia wyników, które pozwolą opisać w sposób bardziej precyzyjny zależności pomiędzy wynikami poszczególnych oznaczeń.

Badanie mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach w schemacie rozciągania prostego jest kłopotliwe, przy czym uzyskiwane wyniki badań należy uznać za pomocne w zrozumieniu procesów zachodzących w strukturze mieszanek. Wykonanie badań wiąże się z przygotowaniem mieszanek, ich zagęszczeniem, późniejszym docięciem próbek, a następnie przyklejeniem do płyt montażowych. Próbki należy poddać kondycjonowaniu w temperaturze badania. Kondycjonowanie powinno odbywać się bezpośrednio w aparacie, w którym prowadzone będzie badanie. To pozwoli uniknąć niekontrolowanych zmian temperatury, zarówno w badanej próbce jak i w komorze klimatycznej, w której prowadzone będą badania.

## **5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI**

### **5.1. WNIOSKI KOŃCOWE**

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury, wykonanych badań, analiz i obliczeń, sformułowano następujące wnioski końcowe:

- mieszanki mastyksowo-grysowe o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA cechują się lepszymi parametrami niskotemperaturowymi w stosunku do asfaltu lanego, stosowanego do warstwy ochronnej obiektów mostowych. Wynika to w głównej mierze z zastosowania miękkiego lepiszcza w mieszankach SMA-MA;
- rodzaj zastosowanego lepiszcza asfaltowego ma kluczowe znaczenie w przypadku pracy mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach. Przekłada się to na wyniki uzyskiwane w teście TSRST, a także rejestrowanych czasów relaksacji w testach TCT i RT;
- czas relaksacji dobrze opisuje zachowanie się mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach. Uzyskano wysoką korelację między czasem relaksacji i naprężeniami rejestrowanymi w badaniu TSRST;
- oznaczenie czasu relaksacji w badaniu RT w mieszankach z twardymi lepiszczami (asfalt lany) jest kłopotliwe w wykonaniu ze względu na bardzo długi czas trwania testu;
- na podstawie badania pełzania w teście TCT otrzymane parametry modelu Burgersa mogą posłużyć do oceny mieszanek w niskich temperaturach. Uzyskane czasy relaksacji w tym badaniu wykazują się wysoką korelacją z wynikami uzyskanymi w badaniu RT;
- zawartość lepiszcza w sposób niejednoznaczny przekłada się na parametry analizowanej mieszanki SMA-MA w niskich temperaturach.

### **5.2. KIERUNEK DALSZYCH BADAŃ**

Pomimo dość szerokiego (a przede wszystkim czasochłonnego) programu badawczego zrealizowanego w ramach pracy doktorskiej konieczne jest dalsze poszukiwanie kryteriów oceny mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach. Istotne wydaje się również znalezienie zależności pomiędzy parametrami mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach a podstawowymi parametrami lepiszcza asfaltowego (penetracja, indeks penetracji czy też właściwości niskotemperaturowe). Kierunek dalszych badań przedstawiono w punktach poniżej:

- istnieje potrzeba modyfikacji metody oznaczenia parametrów w teście TSRST. Obok pomiaru naprężeń niszczących (obecnie wykonywanych) powinno się przeprowadzać jednoczesny pomiar odkształceń próbki niezamocowanej, pozwoli to na określenie skurczu materiału, a także powiązanie badanych cech (przyrostu naprężeń wskutek skurczu);

- mając na uwadze znaczenie twardości lepiscza asfaltowego (wyrażonego penetracją w 25°C) i jego korelacji z parametrami niskotemperaturowymi (w tym z czasem relaksacji) należy zaplanować dalsze, poszerzone badania, w kierunku dokładniejszego opisu tej zależności;
- prowadzenie badań na mieszankach wykonywanych na wytwórniach MMA (zamiast na mieszankach wytworzonych w mieszalniku laboratoryjnym) stanowi przejście na wyższy poziom technologiczny, uwzględniający m.in. zróżnicowanie w poziomie jednorodności mieszanki i w stopniu zesterzenia użytego lepiscza;
- należy określić wpływ starzenia eksploatacyjnego (długotrwałego) lepiscza w mieszankach przeznaczonych do warstwy ścieralnej (w szczególności z asfaltami wysokomodyfikowanymi, które są bardziej podatne na procesy starzeniowe, m. in. promieniowanie UV) na jego właściwości niskotemperaturowe;
- należy prowadzić dalsze badania mające na celu powiązanie innych parametrów lepiscza asfaltowego (uzyskanego np. w reometrze belki zginanej BBR) na parametry niskotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Judycki, J.; Jaskuła, P.; Pszczoła, M.; Ryś, D.; Jaczewski, M.; Alenowicz, J.; Dołżycki, B.; Stiness, M. *Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*; WKŁ: Warszawa, 2014; ISBN 978-83-206-1928-7.
2. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report, Part 3 – Design and Analysis, NCHRP, TRB, NRC, March 2004*;
3. *French Design Manual for Pavement Structures, Guide technique, Ministere de l'Equipement, des Transports et du Tourisme, LCPC, SETRA, May 1997*;
4. Radziszewski, P.; Piłat, J.; Sarnowski, M.; Kowalski, K.; Pokorski, P.; Liphardt, A. Rozwiązania Materiałowo-Technologiczne Izolacji i Nawierzchni Obiektów Mostowych, Raport Końcowy 2013.
5. Caliendo, C. Simplified Models for Estimating Stresses and Strains in Pavements on Concrete and Steel Bridges. *IJCIET* **2017**, 8, 1273–1282.
6. Castro, M. Structural Design of Asphalt Pavement on Concrete Bridges. *Can. J. Civ. Eng.* **2004**, 31, 695–702, doi:10.1139/104-032.
7. Piłat, J.; Radziszewski, P.; Kowalski, K. Jaka Nawierzchnia, Taki Most. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* **2007**.
8. Lv, S.; Xia, C.; Liu, C.; Zheng, J.; Zhang, F. Fatigue Equation for Asphalt Mixture under Low Temperature and Low Loading Frequency Conditions. *Construction and Building Materials* **2019**, 211, 1085–1093, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.312.
9. Madaj, A.; Wołowicki, W. *Budowa i utrzymanie mostów*; WKŁ: Warszawa, 2009; ISBN 978-83-206-1848-8.
10. Sybilski, D. Bitumiczne Nawierzchnie Mostowe. *Drogownictwo* **1994**.
11. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w Sprawie Warunków Technicznych, Jakim Powinny Odpowiadać Drogowe Obiekty Inżynierskie i Ich Usytuowanie, Dz.U. 2000 Nr 63 Poz. 735 2000.
12. Surfacing of Concrete Bridges, Report 106 2000.
13. Heinz, A. Maximizing Life Cycle Cost Performance with New Generation Mastic Asphalt Pavements. **2012**, 8.
14. Héritier, B.; Olard, F.; Saubot, M.; Krafft, S. Design of a Specific Bituminous Surfacing for Orthotropic Steel Bridge Decks : Application to the Millau Viaduct. *BCRRA* **2005**.
15. Pokorski, P.; Radziszewski, P.; Sarnowski, M. Fatigue Life of Asphalt Pavements on Bridge Decks. *Procedia Engineering* **2016**, 153, 556–562, doi:10.1016/j.proeng.2016.08.191.
16. Liu, X.; Li, J.; Tzimiris, G.; Scarpas, T. Modelling of Five-Point Bending Beam Test for Asphalt Surfacing System on Orthotropic Steel Deck Bridges. *International Journal of Pavement Engineering* **2019**, 0, 1–22, doi:10.1080/10298436.2019.1697440.
17. Huang, W.; Pei, M.; Liu, X.; Wei, Y. Design and Construction of Super-Long Span Bridges in China: Review and Future Perspectives. *Front. Struct. Civ. Eng.* **2020**, 14, 803–838, doi:10.1007/s11709-020-0644-1.
18. Chen, C.; Eisenhut, W.O.; Lau, K.; Buss, A.; Bors, J. Performance Characteristics of Epoxy Asphalt Paving Material for Thin Orthotropic Steel Plate Decks. *International Journal of Pavement Engineering* **2020**, 21, 397–407, doi:10.1080/10298436.2018.1481961.
19. Medani, T.O.; Scarpas, A.; Kolstein, M.H.; Molenaar, A. a. A. Design Aspects for Wearing Courses on Orthotropic Steel Bridge Decks.; August 2002.
20. Głomb, J. Tendencje Rozwojowe w Projektowaniu Nawierzchni Mostów Drogowych. *Drogownictwo* **1972**.
21. Śliwiński, J.; Furtak, K. *Materiały budowlane w mostownictwie*; WKŁ: Warszawa, 2004; ISBN 978-83-206-1531-9.

22. Piłat, J.; Radziszewski, P. *Nawierzchnie asfaltowe*; WKŁ: Warszawa, 2007; ISBN 978-83-206-1759-7.
23. Kolarski, A. *Analiza i Ocena Materiałów Hydroizolacyjnych Na Pomosty Obiektów Mostowych* 1996.
24. Piłat, J.; Radziszewski, P. *Izolacje Przeciwwodne Obiektów Mostowych. Materiały Budowlane* **2003**.
25. *Katalog Zabezpieczeń Powierzchniowych Drogowych Obiektów Inżynierskich*; Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 2002;
26. Radziszewski, P.; Piłat, J.; Sarnowski, M.; Kowalski, K.; Król, K.J. *Nawierzchnie asfaltowe na obiektach mostowych*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa, 2016;
27. Mieczkowski, P. *Nowe Papy Termozgrzewalne - Układy Wentylowane. Izolacje* **2010**.
28. Danowski, M. *Doświadczenia z Izolacjami i Nawierzchniami Na Obiektach Mostowych. Zagranicznej Techniki Drogowej* **2000**.
29. Radziszewski, P.; Piłat, J.; Sarnowski, M. Influence of High Temperature on Properties of Materials Used in Bridge Asphalt Pavement Structures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty* **2015**, 175–191, doi:10.7409/rabdim.015.012.
30. Budziński, B.; Mieczkowski, P. Application of Innovative SMA-MA Mixtures on Bridges. *Applied Sciences* **2020**, *10*, 6958, doi:10.3390/app10196958.
31. *WT-2 2014 - część I Mieszanki mineralno-asfaltowe, Wymagania Techniczne*; Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad: Warsaw, 2014;
32. Oberbach, I. *Drogi bitumiczne*; Instytut Badawczy Budownictwa: Warszawa, 1949;
33. Brato, E. *Budowa i utrzymanie dróg*; 2nd ed.; Księgarnia Polska Bernarda Połonieckiego: Lwów, 1932;
34. Zou, G.; Xu, X.; Li, J.; Yu, H.; Wang, C.; Sun, J. The Effects of Bituminous Binder on the Performance of Gussasphalt Concrete for Bridge Deck Pavement. *Materials* **2020**, *13*, 364, doi:10.3390/ma13020364.
35. Luo, S.; Qian, Z.; Yang, X.; Wang, H. Design of Gussasphalt Mixtures Based on Performance of Gussasphalt Binders, Mastics and Mixtures. *Construction and Building Materials* **2017**, *156*, 131–141, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.171.
36. Widiatmoko, I.; Elliott, R.C.; Read, J.M. Development of Heavy-Duty Mastic Asphalt Bridge Surfacing, Incorporating Trinidad Lake Asphalt and Polymer Modified Binders. *Road Materials and Pavement Design* **2005**, *6* (4), 469–483, doi:10.1080/14680629.2005.9690016.
37. Nikolaidēs, A. *Highway engineering: pavements, materials and control of quality*; 2017; ISBN 978-1-138-89376-4.
38. Sarnowski, M.; Kowalski, K.; Król, J.; Radziszewski, P. Influence of Overheating Phenomenon on Bitumen and Asphalt Mixture Properties. *Materials* **2019**, *12*, 610, doi:10.3390/ma12040610.
39. Mazumder, M.; Kim, H.; Lee, S.-J. Performance Properties of Polymer Modified Asphalt Binders Containing Wax Additives. *International Journal of Pavement Research and Technology* **2016**, *9*, 128–139, doi:10.1016/j.ijprt.2016.03.004.
40. Butt, A.A.; Jelagin, D.; Tasdemir, Y.; Birgisson, B. The Effect of Wax Modification on the Performance of Mastic Asphalt. *International Journal of Pavement Research and Technology* **2010**, *3*.
41. Butt, A.; Tasdemir, Y.; Edwards, Y. *Environmental friendly wax modified mastic asphalt*; 2009;
42. Das, P.K.; Tasdemir, Y.; Birgisson, B. Low Temperature Cracking Performance of WMA with the Use of the Superpave Indirect Tensile Test. *Construction and Building Materials* **2012**, *30*, 643–649, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.013.
43. Budziński, B.; Mieczkowski, P.; Sarnowski, M. *Doświadczenia w Zastosowaniu Technologii SMA-MA.*; Kraków, 2016.

44. Mieczkowski, P. Warstwy Ochronne z Mieszanek Mineralno-Asfaltowych Na Obiektach Mostowych Izolacje. *Izolacje* **2012**, 54–61.
45. Alternatywne Systemy Izolacji Płyt Obiektów Mostowych. *Magazyn Autostrady* **2014**, 30–34.
46. Mieczkowski, P. Hydroizolacja Płyt Pomostów Na Obiektach Mostowych. *Budownictwo Mostowe Vademecum* **2015**, 11–17.
47. Giu-Lian, Z.; Xiao-Ning, Z.; Chung, W. Evaluation of Steel Bridge Deck Mixture Properties during Construction. *Journal of Marine Science and Technology* **2015**, *23*, 293–301, doi:10.6119/JMST-014-0327-2.
48. Hailesilassie, B.; Partl, M. Mechanisms of Asphalt Blistering on Concrete Bridges. *Journal of ASTM International* **2012**, *9*.
49. Stosh, H.J. *Błędy wykonawstwa nawierzchni bitumicznych*; WKŁ: Warszawa, 1977;
50. Graczyk, M.; Zbiciak, A.; Michalczyk, R.; Kowalewski, Ł. Numerical Modelling of Bubbles Formation in the Bridge Asphalt Pavement Under Gas Pressure Impact. *Transportation Research Procedia* **2016**, *14*, 3925–3934, doi:10.1016/j.trpro.2016.05.484.
51. Rosenberg, J. *Thin pavements with synthetic binder used in Denmark*; Roskilde, 2001; ISBN 978-87-90145-73-6.
52. Hailesilassie, B.W.; Partl, M.N. Adhesive Blister Propagation under an Orthotropic Bituminous Waterproofing Membrane. *Construction and Building Materials* **2013**, *48*, 1171–1178, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.047.
53. Vapours and Aerosols of Bitumen: Exposure Data Obtained by the German Bitumen Forum. *The Annals of Occupational Hygiene* **2006**, doi:10.1093/annhyg/mel001.
54. Raulf-Heimsoth, M.; Marczyński, B.; Spickenheuer, A.; Pesch, B.; Welge, P.; Rühl, R.; Bramer, R.; Kendzia, B.; Heinze, E.; Angerer, J.; et al. Bitumen Workers Handling Mastic versus Rolled Asphalt in a Tunnel: Assessment of Exposure and Biomarkers of Irritation and Genotoxicity. *Arch Toxicol* **2011**, *85*, 81–87, doi:10.1007/s00204-011-0685-2.
55. Hansen, E.S. Cancer Incidence in an Occupational Cohort Exposed to Bitumen Fumes. *Scand J Work Environ Health* **1989**, *15*, 101–105, doi:10.5271/sjweh.1875.
56. Rumler, R.; Rühl, R.; Nies, E.; Rode, P.; Heger, M. Health Complaints of German Mastic Asphalt Workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **2007**, *4*, 233–236, doi:10.1080/15459620701337635.
57. Weiss, F.; Baloh, P.; Pfaller, C.; Cetintas, E.C.; Kasper-Giebl, A.; Wonaschütz, A.; Dimitrov, M.; Hofko, B.; Rechberger, H.; Grothe, H. Reducing Paving Emissions and Workers' Exposure Using Novel Mastic Asphalt Mixtures. *Building and Environment* **2018**, *137*, 51–57, doi:10.1016/j.buildenv.2018.03.060.
58. Cheraghian, G.; Cannone Falchetto, A.; You, Z.; Chen, S.; Kim, Y.S.; Westerhoff, J.; Moon, K.H.; Wistuba, M.P. Warm Mix Asphalt Technology: An up to Date Review. *Journal of Cleaner Production* **2020**, *268*, 122128, doi:10.1016/j.jclepro.2020.122128.
59. T. Calabi-Floody, A.; A. Valdés-Vidal, G.; Sanchez-Alonso, E.; A. Mardones-Parra, L. Evaluation of Gas Emissions, Energy Consumption and Production Costs of Warm Mix Asphalt (WMA) Involving Natural Zeolite and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Sustainability* **2020**, *12*, 6410, doi:10.3390/su12166410.
60. Autelitano, F.; Bianchi, F.; Giuliani, F. Airborne Emissions of Asphalt/Wax Blends for Warm Mix Asphalt Production. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *164*, 749–756, doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.247.
61. Brandt, H.C.A.; de Groot, P.C. A Laboratory Rig for Studying Aspects of Worker Exposure to Bitumen Fumes. *American Industrial Hygiene Association Journal* **1999**, *60*, 182–190, doi:10.1080/00028899908984433.
62. Mieczkowski, P.; Budziński, B. Ochrona Środowiska w Aspekcie Produkcji i Wbudowywania Mieszanek Mineralno-Asfaltowych. *Magazyn Autostrady* **2016**, *11–12*, 40–44.
63. Olard, F.; Noan, C. Low Energy Asphalts, Routes Roads, 336/337 2008.

64. Liu, Y.; Qian, Z.; Hu, J.; Jin, L. Temperature Behavior and Stability Analysis of Orthotropic Steel Bridge Deck during Gussasphalt Pavement Paving. *Journal of Bridge Engineering* **2018**, *23*, 04017117, doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001163.
65. Wang, Q.; Ji, B.; Fu, Z.; Wang, H. Effect of High-Temperature Pavement Paving on Fatigue Durability of Bearing-Supported Steel Decks. *Applied Sciences* **2020**, *10*, 7196, doi:10.3390/app10207196.
66. Mieczkowski, P. Mastyks Grysowy (SMA) Jako Warstwa Izolacyjna Pod Nawierzchnie Bitumiczne Na Obiektach Inżynierskich / Splittmastix as an Insulation for Roads' Pavements on an Engineering Objects.; Kielce, May 9 2000; pp. 155–161.
67. Radziszewski, P.; Sarnowski, M.; Piłat, J.; Mieczkowski, P.; Król, K.J. Innovative SMA-MA Mixture for Bridge Asphalt Pavement.; Prague, June 1 2016.
68. Sarnowski, M.; Radziszewski, P.; Piłat, J.; Kowalski, K.J.; Król, J.B. Ocena trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do izolacji i nawierzchni obiektów mostowych. *Budownictwo i Architektura* **2014**, *Vol. 13*.
69. Pokorski, P.; Radziszewski, P.; Sarnowski, M. Odporność Na Deformacje Trwałe Asfaltowych Nawierzchni Mostowych. *ZNPRzBiS* **2016**, doi:10.7862/rb.2016.103.
70. Pokorski, P.; Radziszewski, P.; Sarnowski, M. Rheological Properties of Asphalt Mixtures for Bridge Pavements. *Procedia Engineering* **2015**, *111*, 637–644, doi:10.1016/j.proeng.2015.07.060.
71. Sarnowski, M.; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej *Zagadnienie przegrzania technologicznego mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie trwałości nawierzchni mostowych*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa, 2019; ISBN 978-83-7814-891-3.
72. Gałęcki, M.; Kasprzak, A.; Berger, A.; Nadolny, A. Aspekty Wykonawcze Przebudowy Mostu Gen. Grota-Roweckiego w Warszawie. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska* **2015**, *Nr 19*, 57–73.
73. Mieczkowski, P. Izolacje z Pap Asfaltowych Na Mostach. *Izolacje* **2010**.
74. Majer, S.; Sołowczuk, A.; Stefańczyk, B. Przyczyny awarii i technologia wymiany nawierzchni na Moście Cłowym w Szczecinie. In; 1999; pp. 519–526 ISBN 978-83-87423-77-3.
75. Żółtowski, K.; Binczyk, M.; Kalitowski, P. Most Cłowy w Szczecinie. Historia i Przyszłość.; Dolnośląskiego Wydawnictwo Edukacyjne: Wrocław, 2016; pp. 467–474.
76. Hołowaty, J. Multi-Span Bridge Crossing for Improved Road Access to Szczecin Sea Port.; CRC Press: Porto, Portugal, July 1 2015.
77. Dokumentacja Projektowa Dla Zadania Pn. “Remont Trasy Zamkowej w Ciągu Drogi Wojewódzkiej Nr 115 w m. Szczecin – Jezdnia Północna” - Zarząd Dróg i Transportu Miejskiego w Szczecinie, 2017.
78. Kisiel, I. *Reologia w budownictwie*; Arkady: Warszawa, 1967;
79. Uzan, J. Asphalt Concrete Characterization for Pavement Performance Predictions. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **1996**, *65*.
80. Partl, M.N. Towards Improved Testing of Modern Asphalt Pavements. *Mater Struct* **2018**, *51*, 166, doi:10.1617/s11527-018-1286-9.
81. Mazurek, G.; Politechnika Świętokrzyska (Kielce); Wydawnictwo *Liniowa i nieliniowa lepkość sprężysta charakterystyka mastyksu asfaltowego w zakresie wysokich temperatur eksploatacyjnych nawierzchni*; Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej: Kielce, 2019; ISBN 978-83-65719-60-7.
82. Chehab, G.; Kim, Y.; Schapery, R.; Witczak, M.W.; Bonquist, R. Characterization of Asphalt Concrete in Uniaxial Tension Using a Viscoelastoplastic Model. In Proceedings of the Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions; 2003; Vol. 72, pp. 315–355.



83. Błażejowski, K.; Olszacki, J.; Peciakowski, H. *Poradnik asfaltowy*; ORLEN Asphalt sp. z o.o.: Płock, 2014;
84. Teguedy, M.C.; Blaysat, B.; Toussaint, E.; Moreira, S.; Liandrat, S.; GréDiac, M. Investigation of the Tensile Behavior of Recycled Asphalts in the Small-Strain Domain with the Grid Method. *Exp Mech* **2018**, *58*, 1291–1304, doi:10.1007/s11340-018-0412-5.
85. *Modeling of asphalt concrete*; Kim, Y.R., Ed.; McGraw-Hill construction; ASCE Press; McGraw-Hill: Reston, VA : New York, 2009; ISBN 978-0-07-146462-8.
86. Nagórski, R. *Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie*; PWN: Warszawa, 2014; ISBN 978-83-01-17467-5.
87. Liu, S.; Cao, W.; Shang, S.; Qi, H.; Fang, J. Analysis and Application of Relationships between Low-Temperature Rheological Performance Parameters of Asphalt Binders. *Construction and Building Materials* **2010**, *24*, 471–478, doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.015.
88. Judycki, J.; Pszczoła, M.; Jaskuła, P. Modyfikacja Metody Zginania Belek z Mieszanek Mineralnoasfaltowych Ocena Ich Parametrów Reologicznych.; Kielce, May 8 2001.
89. Judycki, J.; Pszczoła, M.; Jaczewski, M.; Mejłun, Ł.; Ryś, D. *Badanie wpływu zastosowania warstw betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC-WMS) w konstrukcjach nawierzchni na spękania niskotemperaturowe i na zmniejszenie powstawiania deformacji trwałych*; Politechnika Gdańska, 2014;
90. Cheng, Y.; Li, H.; Li, L.; Zhang, Y.; Wang, H.; Bai, Y. Viscoelastic Properties of Asphalt Mixtures with Different Modifiers at Different Temperatures Based on Static Creep Tests. *Applied Sciences* **2019**, *9*, 4246, doi:10.3390/app9204246.
91. Rutczyńska-Wdowiak, K.; Zbiciak, A. Zastosowanie algorytmu genetycznego w procesie identyfikacji parametrów modeli reologicznych. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* **2016**, *R. 17, nr 12*.
92. Nagorski, R.; Blazejowski, K.; Nagórska, M. Comparative Analysis of Deflections and Strains of Two Road Pavements with High Traffic Load. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty* **2015**, *14*, 31–46, doi:10.7409/rabdim.015.003.
93. Nagorski, R.; Wiśniakowski, P.; Blazejowski, K.; Nagórska, M. Comparative Analysis of Properties of Bürgers', Boguslavskis' and Zener's Materials in View of Tests of Stress and Strain in Reference to Properties of Asphalt Mixes. **2012**, 7–34.
94. Géber, R.; Apkaryan, A.; Kulkov, S.; Gömze, L. Linear Viscoelastic Properties of Asphalt Mastics Using Creep-Recovery Technique. *Materials Science and Engineering-A publication of the University of Miskolc* **2014**, *39*, 5.
95. Findley, W.N.; Lai, J.S.; Onaran, K. *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials, with an introduction to linear viscoelasticity*; 1976; ISBN 978-0-444-60192-6.
96. Vinson, T.; Janoo, V.; Haas, R. *Low Temperature and Thermal Fatigue Cracking*; 1989;
97. Behnia, B.; Buttlar, W.; Reis, H. Evaluation of Low-Temperature Cracking Performance of Asphalt Pavements Using Acoustic Emission: A Review. *Applied Sciences* **2018**, *8*, 306, doi:10.3390/app8020306.
98. Jung, H.D. *Low temperature cracking: test selection*; Strategic Highway Research Program, SHRP-A; Washington, DC, 1994; ISBN 978-0-309-05807-0.
99. Adwan, I.; Milad, A.; Memon, Z.; Md. Yusoff, N.I. Asphalt Pavement Temperature Prediction Models: A Review. *Applied Sciences* **2021**, doi:10.3390/app11093794.
100. Pszczola, M.; Szydłowski, C. Influence of Bitumen Type and Asphalt Mixture Composition on Low-Temperature Strength Properties According to Various Test Methods. *Materials* **2018**, *11*, 2118, doi:10.3390/ma11112118.
101. Isacsson, U.; Zeng, H. Relationships between Bitumen Chemistry and Low Temperature Behaviour of Asphalt. *Construction and Building Materials* **1997**, *11*, 83–91, doi:10.1016/S0950-0618(97)00008-1.

102. Marasteanu, M.; Moon, K.; Teshale, E.; Falchetto, A.; Turos, M.; Buttlar, W.; Dave, E.; Paulino, G.; Ahmed, S.; Leon, S.; et al. *Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements National Pooled Fund Study - Phase II*; 2012;
103. Aliha, M.R.M.; Behbahan, H.; Fazaeli, H.; Rezaifar, M. Experimental Study on Mode I Fracture Toughness of Different Asphalt Mixtures. *Scientia. Iranica. Transaction A. Civil Engineering* **2015**, *22*, 120–130.
104. Teltayev, B.; Radovskiy, B. Low Temperature Cracking Problem for Asphalt Pavements in Kazakhstan. In *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements*; Chabot, A., Buttlar, W.G., Dave, E.V., Petit, C., Tebaldi, G., Eds.; RILEM Bookseries; Springer Netherlands: Dordrecht, 2016; Vol. 13, pp. 139–144 ISBN 978-94-024-0866-9.
105. Teltayev, B.; Radovskiy, B. Predicting Thermal Cracking of Asphalt Pavements from Bitumen and Mix Properties. *Road Materials and Pavement Design* **2018**, *19*, 1832–1847, doi:10.1080/14680629.2017.1350598.
106. Pszczoła, M.; Judycki, J. Evaluation of Thermal Stresses in Asphalt Layers Incomparison with TSRST Test Results. In *Proceedings of the RILEM Bookseries*; 2012; Vol. 4.
107. Isacson, U.; Zeng, H. Low-Temperature Cracking of Polymer-Modified Asphalt. *Mat. Struct.* **1998**, *31*, 58–63, doi:10.1007/BF02486415.
108. Roy, S.D.; Hesp, S.A.M. Low-Temperature Binder Specification Development: Thermal Stress Restrained Specimen Testing of Asphalt Binders and Mixtures. *Transportation Research Record* **2001**, *1766*, 7–14, doi:10.3141/1766-02.
109. Błażejowski, K.; Wójcik-Wiśniewska, M. Wytrzymałość Zmęczeniowa i Odporność Na Pękanie Mieszanek Mineralno-Asfaltowych z Różnymi Asfaltami.; Chorzów, April 13 2016.
110. Tabor, Z. Przykłady Zastosowania Asfaltów Wysokomodyfikowanych Podczas Remontów Dróg Wojewódzkich.; Chorzów, April 13 2016.
111. Du, Z.; Jiang, C.; Yuan, J.; Xiao, F.; Wang, J. Low Temperature Performance Characteristics of Polyethylene Modified Asphalts – A Review. *Construction and Building Materials* **2020**, *264*, 120704, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120704.
112. Rys, D.; Jaczewski, M.; Pszczoła, M.; Jaskula, P.; Bankowski, W. Effect of Bitumen Characteristics Obtained According to EN and Superpave Specifications on Asphalt Mixture Performance in Low-Temperature Laboratory Tests. *Construction and Building Materials* **2020**, *231*, 117156, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117156.
113. Lu, X.; Isacson, U.; Ekblad, J. Influence of Polymer Modification on Low Temperature Behaviour of Bituminous Binders and Mixtures. *Materials and Structures* **2003**, *36*, 652–656, doi:10.1007/BF02479497.
114. Blab, R. Performance-Based Asphalt Mix and Pavement Design. *Romanian Journal of Transport Infrastructure* **2013**, *2*, 21–38, doi:10.1515/rjti-2015-0009.
115. Tušar, M.; Hribar, D.; Hofko, B. Impact of Characteristics of Asphalt Concrete Wearing Courses on Crack Resistance at Low Temperatures.; April 2014.
116. Hribar, D.; Tušar, M. Properties of Asphalt Concrete at Low Temperatures. *Gradëvinar* **2012**, *64*, 825–831, doi:10.14256/JCE.662.2012.
117. Ma, T.; Zhang, Y.; Wang, H.; Huang, X.; Zhao, Y. Influences by Air Voids on the Low-Temperature Cracking Property of Dense-Graded Asphalt Concrete Based on Micromechanical Modeling. *Advances in Materials Science and Engineering* **2016**, *2016*, 1–10, doi:10.1155/2016/6942696.
118. Sudbury, D.S.; Romero, P.; Li, Y.; Gong, X. Evaluating the Effect of Air Voids and Binder Content in Cold Temperature Testing of Asphalt Mixtures with the Bending Beam Rheometer. In *Proceedings of the Cold Regions Engineering 2015*; American Society of Civil Engineers: Salt Lake City, Utah, July 17 2015; pp. 229–240.

119. Pszczola, M.; Szydłowski, C.; Jaczewski, M. Influence of Cooling Rate and Additives on Low-Temperature Properties of Asphalt Mixtures in the TSRST. *Construction and Building Materials* **2019**, *204*, 399–409, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.148.
120. Tasdemir, Y.; Agar, E. Investigation of the Low Temperature Performances of Polymer and Fiber Modified Asphalt Mixtures. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* **2007**, *14*.
121. Jaskuła, P.; Stienss, M.; Szydłowski, C. Effect of Polymer Fibres Reinforcement on Selected Properties of Asphalt Mixtures. *Procedia Engineering* **2017**, *172*, 441–448, doi:10.1016/j.proeng.2017.02.026.
122. Badeli, S.; Carter, A.; Doré, G.; Saliiani, S. Evaluation of the Durability and the Performance of an Asphalt Mix Involving Aramid Pulp Fiber (APF): Complex Modulus before and after Freeze-Thaw Cycles, Fatigue, and TSRST Tests. *Construction and Building Materials* **2018**, *174*, 60–71, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.103.
123. Wang, H.; Yang, J.; Liao, H.; Chen, X. Electrical and Mechanical Properties of Asphalt Concrete Containing Conductive Fibers and Fillers. *Construction and Building Materials* **2016**, *122*, 184–190, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.063.
124. Zhu, J.; Birgisson, B.; Kringos, N. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges. *European Polymer Journal* **2014**, *54*, 18–38, doi:10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005.
125. Zhu, H.; Yang, J.; Cong, L.; Cui, J.; Wan, J. *Influence of polyester fibre on the performance of Asphalt mixes*; SATC, 2007; ISBN 978-1-920017-02-6.
126. Wang, H.; Zhang, C.; Li, L.; You, Z.; Diab, A. Characterization of Low Temperature Crack Resistance of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Semi-Circular Bending Tests. *J. Test. Eval.* **2016**, *44*, 20150145, doi:10.1520/JTE20150145.
127. Lee, S.-J.; Akisetty, C.K.; Amir Khanian, S.N. The Effect of Crumb Rubber Modifier (CRM) on the Performance Properties of Rubberized Binders in HMA Pavements. *Construction and Building Materials* **2008**, *22*, 1368–1376, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.04.010.
128. Ye, H.; Wang, X.; Fang, N.; Su, Z. Low-Temperature Performance and Evaluation Index of Gussasphalt for Steel Bridge Decks. *Advances in Materials Science and Engineering* **2019**, *2019*, 1–11, doi:10.1155/2019/2951412.
129. Chen, Y.; Xu, S.; Tebaldi, G.; Romeo, E. Role of Mineral Filler in Asphalt Mixture. *Road Materials and Pavement Design* **2020**, 1–40, doi:10.1080/14680629.2020.1826351.
130. Jaczewski, M.; Dolzycki, B.; Alenowicz, J.; Jaskuła, P. Impact of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) on Low-Temperature Properties of Asphalt Concrete Wpływ Materiału Odzyskanego z Nawierzchni Asfaltowej (RAP) Na Niskotemperaturowe Właściwości Betonu Asfaltowego. *Drogi i Mosty* **2019**, *18*, 303–315, doi:10.7409/rabdim.019.020.
131. Islam, M.R.; Mannan, U.A.; Rahman, A.A.; Tarefder, R.A. Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Hot-Mix Asphalt. *Adv. Civ. Eng. Matls.* **2014**, *3*, 20140002, doi:10.1520/ACEM20140002.
132. Grishm, I.; Kayumov, R.; Ivanov, G. Asphalt Concrete Pavements of Bridges under Thermal Stress. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **2020**, *890*, 012032, doi:10.1088/1757-899X/890/1/012032.
133. Bichajło, L.; Siwowski, T. Nawierzchnie Na Obiektach Mostowych - Doświadczenia z Nadzoru Nad Realizacją. Symposium „Nawierzchnie i Izolacje Na Obiektach Inżynierskich Betonowych i Stalowych. Konsekwencje i Możliwości Działań”. XVII Międzynarodowe Targi Budownictwa Drogowego AUTOSTRADA – POLSKA, Kielce 11-12 Maja 2011 r.
134. Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Martínez, A.H.; Miró, R. Analysis of the Mechanical Behaviour of Bituminous Mixtures at Low Temperatures. *Construction and Building Materials* **2013**, *46*, 193–202, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.019.
135. *TP 151 - Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT), Warunki techniczne, Praga 2010;*

136. Wagoner, M.; Buttlar, W.; Paulino, G.; Blankenship, P. *Investigation of the Fracture Resistance of Hot-Mix Asphalt Concrete Using a Disk-Shaped Compact Tension Test*; 2005; Vol. 1929, p. 192;.
137. Jaczewski, M.; Judycki, J.; Jaskuła, P. Właściwości Niskotemperaturowe Betonów Asfaltowych o Wysokim Module Sztywności (AC WMS) w Badaniach Trzypunktowego Zginania. *ZNPRzBiS* **2016**, doi:10.7862/rb.2016.78.
138. Sun, Y.; Gu, Z.; Wang, J.; Yuan, X. Research of Method for Solving Relaxation Modulus Based on Three-Point Bending Creep Test. *Materials* **2019**, *12*, 2021, doi:10.3390/ma12122021.
139. Zhao, L.; Chen, J.; Wang, S. Viscoelastic Analysis of Asphalt Mixture Based on Creep Test. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* **2012**, *5*, 819–822.
140. Wang, B.; Hu, X.; Shao, Y.; Xu, O.; Lu, P.; Li, K. Modelling and Testing of Temperature-Dependent Strength and Toughness of Asphalt Concrete from  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$  Using Small Notched Beams. *Construction and Building Materials* **2021**, *294*, 123580, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123580.
141. Velasquez, R.; Zofka, A.; Turos, M.; Marasteanu, M.O. Bending Beam Rheometer Testing of Asphalt Mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* **2011**, *12*, 461–474, doi:10.1080/10298430903289956.
142. Judycki, J.; Pszczoła, M.; Jaczewski, M.; Mejłun, Ł.; Ryś, D. Badanie Wpływu Zastosowania Warstw Betonu Asfaltowego o Wysokim Module Sztywności (AC-WMS) w Konstrukcjach Nawierzchni Na Spękania Niskotemperaturowe i Na Zmniejszenie Powstawiania Deformacji Trwałych 2014.
143. Dias, A.; Silva, H.; Palha, C.; Oliveira, J. Low-Temperature Performance of Polymer-Modified Binders in Stone Mastic Asphalts. *Infrastructures* **2021**, *6*, 58, doi:10.3390/infrastructures6040058.
144. Mandal, T.; Bahia, H. *Measuring Cracking Propagation of Asphalt Mixtures Using Notched Samples in the TSRST*; 2017;
145. Bahia, H.; Tabatabaee, H.; Velasquez, R. Asphalt Thermal Cracking Analyser (ATCA). In *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*; Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I., A., L., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2012; pp. 147–156 ISBN 978-94-007-4565-0.
146. Mensching, D.; Sias, J.; Bennert, T.; Medeiros, M.; Jr; Elwardany, M.; Mogawer, W.; Hajj, E.; Alavi, Z. Low Temperature Properties of Plant-Produced RAP Mixtures in the Northeast. *Road Materials and Pavement Design* **2014**, *15*, doi:10.1080/14680629.2014.926617.
147. AASHTO TP 10 - Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength, AASHTO.
148. PN-EN 12697-46:2012 Mieszanki Mineralno-Asfaltowe -- Metody Badań -- Część 46: Pękanie Niskotemperaturowe i Właściwości w Badaniach Osiowego Rozciągania; PKN: Warszawa 2012 2020.
149. Monismith, C.L.; Secor, G.A.; Secor, K.E. Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **1965**, *34*, 248–285.
150. Steiner, D.; Hofko, B. On the Influence of Basic Thermodynamics on Thermal Cracking Resistance of Asphalt Mixtures in Cooling Tests. *RILEM Tech Lett* **2018**, *3*, 1–7, doi:10.21809/rilemtechlett.2018.54.
151. Lin, P.; Huang, W.; Li, Y.; Tang, N.; Xiao, F. Investigation of Influence Factors on Low Temperature Properties of SBS Modified Asphalt. *Construction and Building Materials* **2017**, *154*, 609–622, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.118.
152. Pszczoła, M.; Judycki, J. Badania Mieszanek Mineralno-Asfaltowych w Niskiej Temperaturze. *Drognictwo* **2013**, *3*.

153. Materiały Udostępnione Przez Pavetest.
154. *Instrukcja obsługi oprogramowania TESTLAB*; Pavetest: Australia, 2019;
155. Cannone Falchetto, A.; Wang, D.; Wistuba, M. *Size Effect in Asphalt Mixture at Low Temperature*; 2017;
156. Cannone Falchetto, A.; Le, J.-L.; Turos, M.I.; Marasteanu, M.O. Indirect Determination of Size Effect on Strength of Asphalt Mixtures at Low Temperatures. *Mater Struct* **2014**, *47*, 157–169, doi:10.1617/s11527-013-0052-2.
157. Karta Techniczna Produktu: Loctite EA 9466, Henkel, Wrzesień 2014.
158. Rabiej, M. *Statystyka z programem Statistica: wydaje ci się, że statystyka jest trudna? - z programem Statistica na pewno nie!*; Helion: Gliwice, 2012; ISBN 978-83-246-4110-9.
159. StatSoft Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL Available online: <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html> (accessed on 9 December 2020).
160. Mohd Razali, N.; Yap, B. Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. *J. Stat. Model. Analytics* **2011**, *2*.
161. Domański, C.; Pruska, K. *Nieklasyczne metody statystyczne*; Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne: Warszawa, 2000; ISBN 978-83-208-1253-4.
162. Guthrie, W.F. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods (NIST Handbook 151) 2020.
163. King, B.M.; Minium, E.W.; Zakrzewska, M.; Brzeziński, J.; Wydawnictwo Naukowe PWN *Statystyka dla psychologów i pedagogów*; Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa, 2020; ISBN 978-83-01-15907-8.
164. PQStat Software (2021). Podręcznik Użytkownika PQStat 1.8.2, <Http://Manuals.Pqstat.Pl>.
165. Hribar, D.; Tušar, M.; Hofko, B.; Blab, R. Influence of Start Temperature on Tensile Stress Testing of Restrained Asphalt Concrete Specimens. *Gradevinar* **2013**, *65*, 987–992, doi:10.14256/JCE.927.2013.
166. JuNG, D.; Vinson, T.S. Thermal Stress Restrained Specimen Test To Evaluate Low-Temperature Cracking of Asphalt-Aggregate Mixtures. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD* **9**.
167. Pszczola, M.; Jaczewski, M.; Rys, D.; Jaskula, P.; Szydłowski, C. Evaluation of Asphalt Mixture Low-Temperature Performance in Bending Beam Creep Test. *Materials* **2018**, *11* (1), doi:10.3390/ma11010100.

## POWOŁANIA NORMATYWNE

1. PN-EN 13108-6:2016-07 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Wymagania -- Część 6: Asfalt lany.
2. PN-EN 14023:2011 Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami.
3. PN-EN 12697-8:2019-01 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni próbek mineralno-asfaltowych.
4. PN-EN 12697-22:2008 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 22: Trasowanie kołem.
5. PN-EN 12697-12:2018-08 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych.
6. PN-EN 12697-18:2017-07 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań-- Część 18: Spływność lepiszcza.
7. PN-EN 12697-3+A1:2019-02 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 3: Odzyskiwanie asfaltu: Wyparka obrotowa.
8. PN-EN 1426:2015-08 Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie penetracji igłą.
9. PN-EN 1427:2015-08 Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie temperatury mięknięcia -- Metoda Pierścień i Kula.
10. PN-EN 13398:2017-12 Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Oznaczanie nawrotu sprężystego asfaltów modyfikowanych.
11. PN-EN 12697-3+A1:2019-02 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 3: Odzyskiwanie asfaltu: Wyparka obrotowa.
12. PN-EN 12697-5:2019-01 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 5: Oznaczanie gęstości.
13. PN-EN 12697-6:2012 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej.
14. PN-EN 12697-12:2018-08 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych.
15. PN-EN 12697-18:2017-07 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań-- Część 18: Spływność lepiszcza.
16. PN-EN 12697-20:2012 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 20: Badanie twardości (penetracji) na próbkach sześciennych lub cylindrycznych (CY).
17. PN-EN 12697-35:2016-05 Mieszanki mineralno-asfaltowe --- Metody badań -- Część 35: Mieszanie laboratoryjne.
18. PN-EN 12697-33:2019-03 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metoda badań -- Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wałującym.
19. PN-EN 12697-5:2019-01 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 5: Oznaczanie gęstości.

## SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2-1 Odształcenia stalowej płyty ortotropowej pomostu pod obciążeniem 14,5-tonowej osi z kołami bliźniaczymi [19] .....	15
Rys. 2-2 Naprężenia stalowej płyty ortotropowej pomostu pod obciążeniem 14,5-tonowej osi z kołami bliźniaczymi [19] .....	15
Rys. 2-3 Typowy układ warstw konstrukcji nawierzchni na obiekcie mostowym .....	16
Rys. 2-4 Porównanie procesu energochłonności różnych technologii produkcji MMA [62,63] .....	19
Rys. 2-5 Konstrukcja o warstwie z mastyksu na powłoce wiążącej wg Stoscha .....	20
Rys. 2-6 Koncepcja mieszanek SMA-MA [71] .....	21
Rys. 2-7 Wykonana konstrukcja nawierzchni na Moście Cłowym w Szczecinie (realizacja w roku 1998) .....	22
Rys. 2-8 Konstrukcja nawierzchni na obiekcie mostowym „Trasa Zamkowa” .....	23
Rys. 2-9 Wbudowywanie warstwy ochronnej z mieszanki mastksowo-grysowej o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA 8 PmB 65/105-60 .....	24
Rys. 2-10 Warstwa SMA-MA 8 PmB 65/105-60 po zagęszczeniu (widoczny wyciśnięty mastyks) .....	24
Rys. 2-11 Wykres odształceń w czasie dla MMA pod obciążeniem, przy przekroczeniu granicy plastyczności [79] .....	29
Rys. 2-12 „Trójkąt reologiczny”, tłumaczenie własne na podstawie [80] .....	30
Rys. 2-13 Zjawiska towarzyszące mieszankom mineralno-asfaltowym [85] .....	31
Rys. 2-14 Model Maxwella w teście relaksacji .....	32
Rys. 2-15 Próba pełzania z odciążeniem ciała Burgersa .....	33
Rys. 2-16 Składowe elementu Burgersa (model Kelvina-Voigta i Maxwella) w teście pełzania w fazie obciążenia .....	34
Rys. 2-17 Przykłady uszkodzenia nawierzchni mostowej, pęknięcie podłużne oraz poprzeczne [46] .....	37
Rys. 2-18 Problem szwów technologicznych w warstwach ochronnych z asfaltu lanego [133] .....	37
Rys. 3-1 Penetrometr półautomatyczny i automatyczny aparat R&B .....	43
Rys. 3-2 Ekstraktor i wyparka obrotowa użyta do odzyskania lepiszcza asfaltowego .....	43
Rys. 3-3 Próbkę zamontowaną w systemie badawczym przygotowania do badania TSRST (3 czujniki temperatury). .....	44
Rys. 3-4 Zasada badania UTST .....	45
Rys. 3-5 Zasada badania TSRST .....	46
Rys. 3-6 Zniszczenie próbki w teście TSRST .....	46
Rys. 3-7 Zasada badania TCT .....	47
Rys. 3-8 Zasada badania RT .....	48
Rys. 3-9 Schemat zaplanowanych badań .....	48
Rys. 3-10 Krzywa uziarnienia mieszanek MA 11 i SMA-MA 8 .....	54
Rys. 3-11 Przygotowane płyty przed cięciem .....	56
Rys. 3-12 Podział płyt na próbki analityczne (kolor zielony), kolor czerwony – materiał odrzucony .....	57
Rys. 3-13 Próbkę analityczne przygotowane do badań .....	57
Rys. 3-14 Klejenie próbek MMA w przymiarze .....	59
Rys. 3-15 Przykładowy wykres normalności wraz z statystykami testu Shaprio-Wilka .....	62
Rys. 4-1 Przykładowy wykres przyrostu naprężenia w czasie dla mieszanek SMA-MA 8 oraz MA 11 w temperaturze -10°C .....	66

Rys. 4-2 Przekładowy wykres w badaniu UTST z uwzględnieniem adaptacji aparatury badawczej (mieszanka SMA-MA 8 PmB 45/80-65, zawartość lepiszcza: 7,9%; temperatura badania: -15°C), końcowa wartość prędkości przyrostu odkształcenia wynosi 0,817%/min ..	67
Rys. 4-3 a) Przykładowy wykres uzyskany w badaniu TSRST wraz zmierzonymi przemieszczeniami czujników LDTV, b) schemat próbki wraz z rejestrowanymi przemieszczeniami i naprężeniami.....	69
Rys 4-4 Wykres naprężeń od temperatury uzyskane w teście TSRST .....	71
Rys 4-5 Wykres naprężeń od temperatury uzyskane w teście TSRST po aproksymacji do wielomianu stopnia 3 i uśrednieniu wyników i ponowną aproksymację.....	71
Rys. 4-6 Wykres ramka-wąsy uzyskanych wyników – naprężenia maksymalne .....	72
Rys. 4-7 Wykres ramka-wąsy uzyskanych wyników – temperatura pęknięcia .....	72
Rys. 4-8 Proste, styczne do wykresu funkcji opisującej wzrost naprężeń mieszanki SMA-MA 8 z asfaltem PmB 45/80-65 (8,4% asf.) w badaniu TSRST .....	74
Rys. 4-9 Wartości rzeczywiste z pomiarów oraz krzywa teoretyczna modelu Burgersa w temperaturze -10°C (SMA-MA 8 50/70) dla fazy obciążenia .....	76
Rys. 4-10 Wykresy uzyskanych wartości parametrów modelu Burgersa .....	77
Rys. 4-11 Wykres zmiany odkształceń w czasie w teście pełzania w -10°C .....	81
Rys. 4-12 Wykres zmiany odkształceń w czasie w teście pełzania w -15°C .....	81
Rys. 4-13 Wykres zmiany odkształceń w czasie w teście pełzania w -25°C .....	82
Rys. 4-14 Porównanie pełzania w różnych temperaturach prowadzonego testu dla mieszanki SMA-MA 8 65/105-80 (powyższe wykresy stanowią uśrednione wartości wyników).....	83
Rys. 4-15 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -10°C.....	84
Rys. 4-16 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -15°C.....	84
Rys. 4-17 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -25°C.....	85
Rys. 4-18 Czas relaksacji naprężeń w badaniu TCT w temperaturze -10°C w zależności od penetracji wyekstrahowanego asfaltu . Ozbaczenia: krzywa czerwona z asfaltem 50/70, krzywa niebieska bez uwzględnienia asfaltu 50/70 (linie pokrywają się) .....	88
Rys. 4-19 Czas relaksacji naprężeń w badaniu TCT w temperaturze -15°C w zależności od penetracji wyekstrahowanego asfaltu . Oznaczenia j.w. ....	88
Rys. 4-20 Czas relaksacji naprężeń w badaniu TCT w temperaturze -25°C w zależności od penetracji asfaltu wyekstrahowanego. Oznaczenia j.w. ....	89
Rys. 4-21 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -10°C (różna zawartość lepiszcza) .....	90
Rys. 4-22 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -15°C (różna zawartość lepiszcza) .....	90
Rys. 4-23 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu TCT w temperaturze -25°C (różna zawartość lepiszcza) .....	91
Rys. 4-24 Zależność logatyrmu z czasu relaksacji od temperatury w badaniu TCT dla mieszanek SMA-MA i MA.....	93
Rys. 4-25 Przykładowy przebieg czasowy w badaniu RT (mieszanka SMA-MA 8 50/70 temperatura -15°C) .....	96
Rys. 4-26 Przebieg czasowy w badaniu RT (mieszanka MA temperatura -25°C), próbka nie osiągnęła 36,8% naprężeń początkowych po 100 000 sekund.....	96
Rys. 4-27 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -10°C.....	98
Rys. 4-28 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -15°C.....	98



Rys. 4-29 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -25°C.....	99
Rys. 4-30 Czas relaksacji naprężeń w badaniu RT w zależności od penetracji asfaltu wykstrahowanego (temperatura -10°C), krzywa czerwona z asfaltem 50/70, niebieska bez asfaltu 50/70.....	102
Rys. 4-31 Czas relaksacji naprężeń w badaniu RT w zależności od penetracji asfaltu wykstrahowanego (temperatura -15°C) , krzywa czerwona z asfaltem 50/70, niebieska bez asfaltu 50/70.....	103
Rys. 4-32 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -10°C (zawartość lepiszcza) .....	104
Rys. 4-33 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -15°C (zawartość lepiszcza) .....	104
Rys. 4-34 Czas relaksacji na wykresie „ramka-wąsy” uzyskany w badaniu RT w temperaturze -25°C (zawartość lepiszcza) .....	105
Rys. 4-35 Zależność czasu relaksacji od temperatury oznaczenia w badaniu RT .....	106
Rys. 4-36 Zależność logarytmu z czasu relaksacji od temperatury oznaczenia w badaniu RT (dopasowanie do funkcji wykładniczej).....	108
Rys. 4-37 Zależność czasów relaksacji uzyskanych w badaniu TCT oraz RT .....	110
Rys. 4-38 Zależność czasów relaksacji uzyskanych w badaniu TCT oraz RT, w przedziale czasu 0-3600 s, kolor czarny fragment funkcji z Rys. 4-37.....	111
Rys. 4-39 Zależność czasów relaksacji uzyskanych w badaniu TCT oraz RT, w układzie log-log.....	111
Rys. 4-40 Zależność naprężeń uzyskanych w badaniu TSRST od czasu relaksacji uzyskanego w badaniu RT .....	112
Rys. 4-41 Zależność naprężeń uzyskanych w badaniu TSRST od czasu relaksacji uzyskanego w badaniu TCT.....	113

## SPIS TABEL

Tab. 2-1 Propozycja wymagań dla mieszanek typu SMA-MA w oparciu o analizę literatury i doświadczenia własne [26].....	28
Tab. 2-2 Wybrane metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach .....	38
Tab. 3-1 Schemat przeprowadzonych badań lepiszczy asfaltowych .....	42
Tab. 3-2 Przeprowadzone badania wraz z otrzymanymi parametrami i wyjaśnieniem celowości przeprowadzenia badań .....	49
Tab. 3-3 Zestawienie badanych mieszanek mineralno-asfaltowych .....	50
Tab. 3-4 Podstawowe parametry lepiszczy asfaltowych (wartości średnie) użytych do wykonania próbek* .....	51
Tab. 3-5 Parametry lepiszcza asfaltowego (wartości średnie) wyekstrahowanego z mieszanek mineralno-asfaltowych .....	52
Tab. 3-6 Wybrane parametry zaprojektowanej mieszanki SMA-MA 8 PmB 45/80-65 .....	53
Tab. 3-7 Wybrane parametry mieszanki MA 11 .....	53
Tab. 3-8 Parametry przygotowania próbek MMA .....	55
Tab. 4-1 Zestawienie wyników i wartości średnich uzyskanych w badaniu UTST .....	65
Tab. 4-2 Wartości temperatury przy zniszczeniu w teście TSRST [°C] .....	69
Tab. 4-3 Wartości maksymalnych naprężeń w teście TSRST [MPa] .....	70
Tab. 4-4 Wyniki testu Tukeya dla naprężeń maksymalnych .....	73
Tab. 4-5 Wyniki testu Tukeya dla temperatury zniszczenia .....	73
Tab. 4-6 Współczynniki kierunkowe prostych w punktach charakterystycznych (wartości bezwzględne).....	74
Tab. 4-7 Parametry modelu Burgersa uzyskane na podstawie testu pełzania dla fazy obciążenia w temperaturze -10°C .....	78
Tab. 4-8 Parametry modelu Burgersa uzyskane na podstawie testu pełzania dla fazy obciążenia w temperaturze -15°C .....	78
Tab. 4-9 Parametry modelu Burgersa uzyskane na podstawie testu pełzania dla fazy obciążenia w temperaturze -25°C .....	79
Tab. 4-10 Charakter i wielkość odkształceń wyznaczonych z modelu Burgersa .....	80
Tab. 4-11 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-10 °C).....	86
Tab. 4-12 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-15 °C).....	86
Tab. 4-13 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-25 °C).....	86
Tab. 4-14 Wyniki metody najmniejszych kwadratów .....	87
Tab. 4-15 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-10 °C; różna zawartość lepiszcza).....	92
Tab. 4-16 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu TCT (-15 °C; różna zawartość lepiszcza).....	92
Tab. 4-17 Wyniki regresji liniowej zależności temperatury od czasu relaksacji naprężeń w badaniu TCT.....	93
Tab. 4-18 Wyniki porównania prostych opisujących zależność wpływu temperatury na czas relaksacji w badaniu TCT .....	94
Tab. 4-19 Wyniki uzyskane w badaniu RT .....	97
Tab. 4-20 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu RT (-10 °C) .....	100
Tab. 4-21 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu RT (-15 °C) .....	100
Tab. 4-22 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu RT (-25 °C) .....	100
Tab. 4-23 Wyniki metody najmniejszych kwadratów w badaniu RT .....	102
Tab. 4-24 Wyniki testu Tukeya dla czasu relaksacji w badaniu RT (-15 °C), różna zawartość lepiszcza .....	105

Tab. 4-25 Wyniki regresji liniowej zależności logarytmu z czasu relaksacji naprężeń od temperatury w badaniu RT (zależność liniowa).....	107
Tab. 4-26 Wyniki regresji zależności logarytmu z czasu relaksacji naprężeń od temperatury w badaniu RT (zależność wykładnicza).....	108

# ZALĄCZNIK NR 1 – Rezepta wyjściowa mieszanki SMA-MA 8

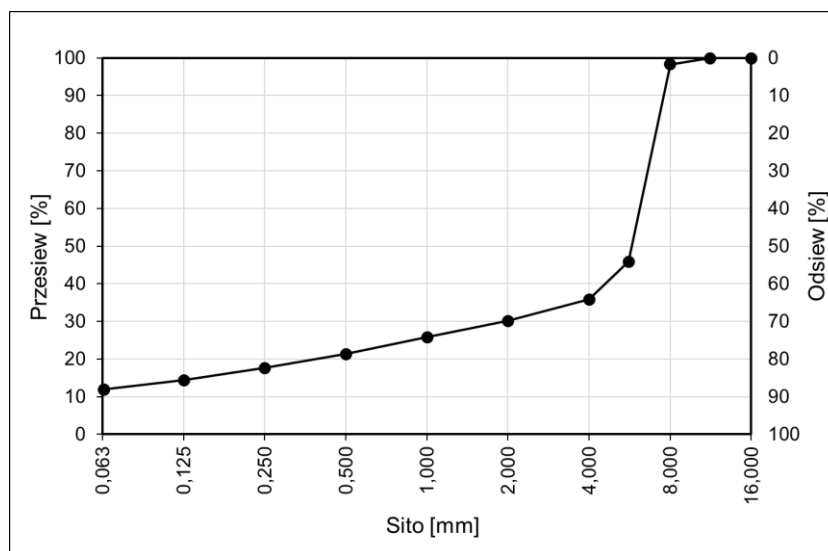
## Skład mieszanki mineralno-asfaltowej

L.P	Material	MM [%]	MMA [%]
1	Kruszywo 5/8 Bazalt Księginki	62,3	56,4
2	Kruszywo 2/5 Bazalt Księginki	6,1	5,5
3	Kruszywo 0/2 Granit Graniczna	18,0	16,3
4	Mączka wapienna, Nordkalk	13,7	12,4
5	Asfalt 45/80-65 producent Orlen	-	8,4
6	Stabilizator Viatop 80 Premium	-	1,0
7	Środek powierzchniowoaktywny Wetfix	-	0,3*

\* w stosunku do asfaltu

## Projektowane uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito [mm]	Odsiew [%]	Przesiew [%]
63	0	100
45	0	100
31,5	0	100
22,4	0	100
16	0	100
11,2	0	100
8	1,7	98
5,6	52,3	46
4	10,1	36
2	5,7	30
1	4,4	26
0,5	4,4	21
0,25	3,7	18
0,125	3,2	15
0,063	2,5	12,0
0,000	12,0	
Suma	100,0	



Krzywa uziarnienia

## Właściwości mieszanki mineralnej

Właściwość	Metoda	Wartość
Zawartość ziaren >2,0 mm [%]	z obliczeń	70
Zawartość ziaren <2,0 mm [%]	z obliczeń	30
Zawartość wypełniacza <0,0063 [%]	z obliczeń	12,0
Gęstość objętościowa ziarn MM ρ <sub>a</sub> [Mg/m <sup>3</sup> ]	z obliczeń	2,950
Współczynnik korygujący α	obliczony wg PN-EN 13108-1:2008	0,898

## Właściwości lepiszcza asfaltowego

Parametr	Metoda badania	Jednostka	Wartość
Penetracja	PN-EN 1426:2015-08	0,1 mm	60
Temperatura mięknięcia	PN-EN 1427:2015-08	°C	65,6
Nawrót sprężysty	PN-EN 13398:2012	%	86

## Warunki przygotowywania i badania próbek MMA

Parametr	Metoda/Wartość
Sposób przygotowania mieszanki mineralno-asfaltowej	PN-EN 12697-35+A1:2008
Temperatura zagęszczania próbek	145±5 °C
Metoda i warunki zagęszczania próbek Marshalla	ubijanie wg PN-EN 12697-30:2012, energia 2x50 uderzeń wg PN-EN 13108-20:2008, C.1.3
Metoda i warunki zagęszczania próbek Marshalla	ubijanie wg PN-EN 12697-30:2012, energia 2x35
Metoda i warunki zagęszczania próbek do badania ITSR	ubijanie wg PN-EN 12697-30:2012, energia 2x35 uderzeń wg WT-2 2014, kondycjonowanie wg WT-2:2014, załącznik 1
Metoda i warunki zagęszczania próbek do koleinowania	wałowanie wg PN-EN 12697-33+A1:2008, wskaźnik zagęszczenia P98-P100 wg PN-EN 13108-20:2008, C1.20, badanie wg PN-EN 13108-20:2008, D.1.6.

## Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej

Rodzaj badania/właściwość	Metoda	Jednostka	Wartość
Zawartość lepiszcza całkowitego B	-	%	8,4
Poprawka na asfalt nierozpuszczony $B_n$	obliczone $B_n=0,014 \cdot F+0,1$	%	0,27
Zawartość lepiszcza rozpuszczonego S	obliczone $S=B-B_n$	%	8,13
Objętość asfaltu całkowitego	obliczone $B \cdot \rho_b / \rho_B$	%	20,2
Gęstość MMA $\rho_{mh}$	PN-EN 12697-5:2019-01	Mg/m <sup>3</sup>	2,504
Gęstość objętościowa MMA $\rho_b$ (2x50 uderzeń)	PN-EN 12697-6:2019-01	Mg/m <sup>3</sup>	2,478
Zawartość wolnych przestrzeni V (2x50 uderzeń)	PN-EN 12697-8:2019-01	%	1,0
Wolne przestrzenie w MM wypełnione lepiszczem VFB (2x50 uderzeń)	PN-EN 12697-8:2019-01	%	95,1
Gęstość objętościowa MMA $\rho_b$ (2x35 uderzeń)	PN-EN 12697-6:2019-01	%	2,469
Zawartość wolnych przestrzeni V (2x35 uderzeń)	PN-EN 12697-8:2019-01	%	1,4
Wolne przestrzenie w MM wypełnione lepiszczem VFB (2x35 uderzeń)	PN-EN 12697-8:2019-01	%	93,5
Odporność na działanie wody ITSR	PN-EN 12697-12:2008	%	97
Spywalność lepiszcza D	PN-EN 12697-18:2017-07	%	0,1
Odporność na def. trwałe PRD <sub>AIR</sub> (metoda B w powietrzu, 45°C, 10000 cykli)	PN-EN 12697-22:2012	%	13,8
Odporność na def. trwałe WTS <sub>AIR</sub> (metoda B w powietrzu, 45°C, 10000 cykli)	PN-EN 12697-20:2012	mm/10 <sup>3</sup> cykl	0,16

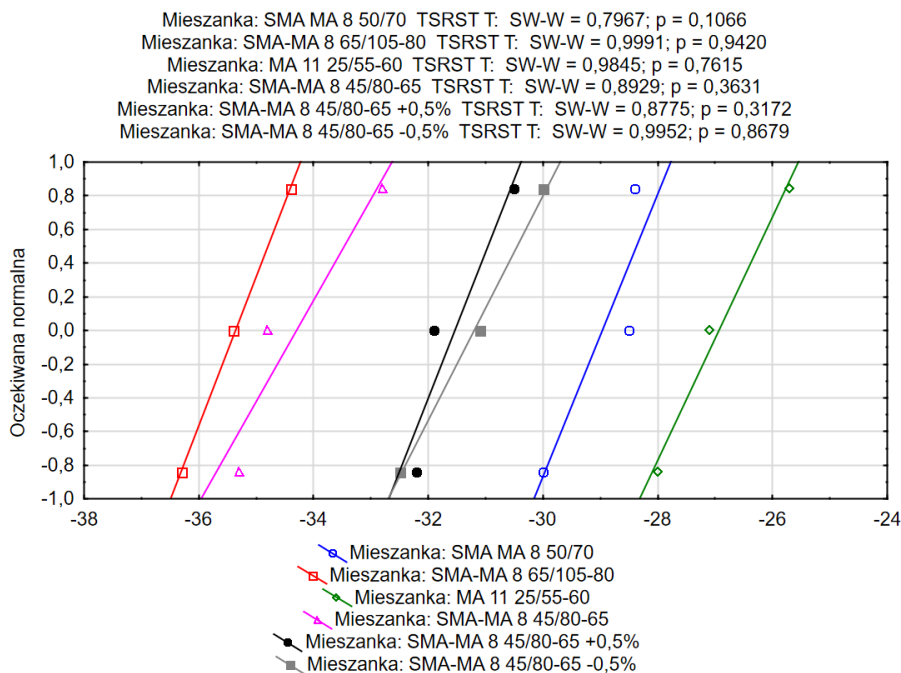
# ZAŁĄCZNIK NR 2 – WYNIKI TESTÓW STATYSTYCZNYCH PRZEPROWADZONYCH W ANALIZIE ZALEŻNOŚCI RODZAJU LEPISZCZA W TEŚCIE TSRST

## ZAŁOŻENIA DO PRZEPROWADZANIA ANALIZY WARIANCJI

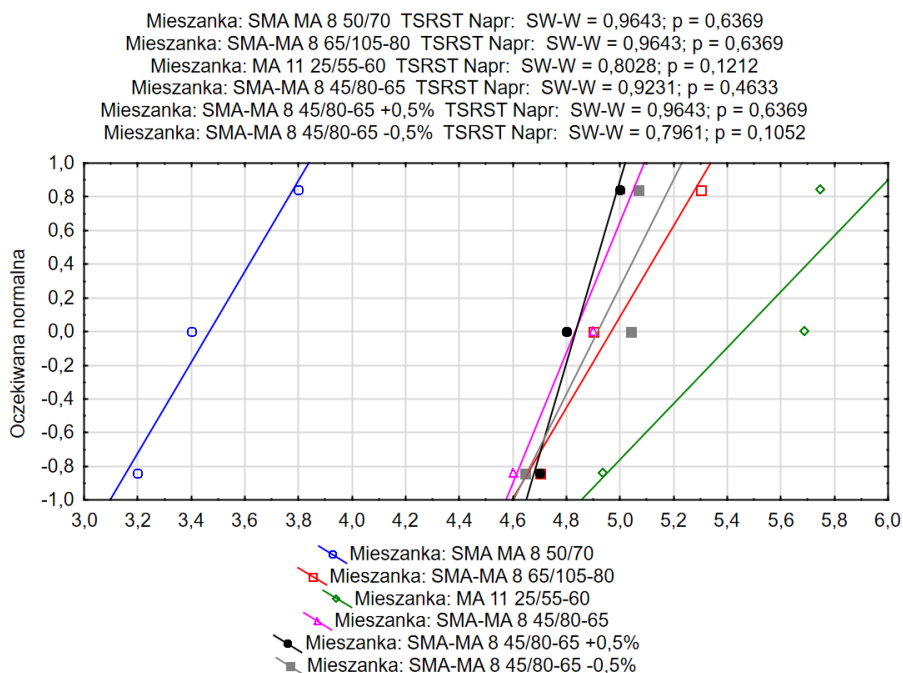
**Test Levene'a jednorodności wariancji, jeżeli  $p \geq 0,05$  to wariancje są jednorodne**

Efekt: "Mieszanka" Stopnie swobody dla każdego F : 5, 12				
	MS Efekt	MS Błąd	F	p
$\sigma$	0,0555061728	0,250987654	0,221151008	0,946474299
T	0,0205432099	0,0138888889	1,47911111	0,267296993

**Wykres normalności temperatury przy zniszczeniu w teście TSRST wraz z testem  
Shapiro-Wilka, jeżeli  $p \geq 0,05$  to rozkład normalny**



## Wykres normalności naprężeń przy zniszczeniu w teście TSRST wraz z testem Shapiro-Wilka, jeżeli $p \geq 0,05$ to rozkład normalny



## WYNIKI TESTU TUKEYA

### Temperatura przy zniszczeniu

	Mieszanka	1	2	3	4	5	6
1	SMA MA 8 50/70		0,0003	0,2752	0,0008	0,1116	0,1991
2	SMA-MA 8 65/105-80	0,0003		0,0002	0,8321	0,0105	0,0057
3	MA 11 25/55-60	0,2752	0,0002		0,0002	0,0027	0,0048
4	SMA-MA 8 45/80-65	0,0008	0,8321	0,0002		0,0776	0,0417
5	SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%	0,1116	0,0105	0,0027	0,0776		0,9988
6	SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%	0,1991	0,0057	0,0048	0,0417	0,9988	

### Naprężenia przy zniszczeniu w teście TSRST

	Mieszanka	1	2	3	4	5	6
1	SMA MA 8 50/70		0,0007	0,0002	0,0015	0,0015	0,0009
2	SMA-MA 8 65/105-80	0,0007		0,4528	0,9933	0,9933	1,0000
3	MA 11 25/55-60	0,0002	0,4528		0,2212	0,2212	0,3846
4	SMA-MA 8 45/80-65	0,0015	0,9933	0,2212		1,0000	0,9983
5	SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%	0,0015	0,9933	0,2212	1,0000		0,9983
6	SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%	0,0009	1,0000	0,3846	0,9983	0,9983	

# ZAŁĄCZNIK NR 3 – OCENA UZYSKANYCH PARAMETRÓW METODY NAJMNIEJSZYCH KWADRATÓW W BADANIU TCT

## Ocena parametrów w temperaturze -10°C

Oznaczenie	Parametr	Ocena	Doln. uf	Górn. uf	R
SMA-MA 8 50/70 - próbka 1	$\eta_1$	8458599	8441923	8475274	0,999521
	$E_2$	2582	2567	2596	
	$\eta_2$	2154309	2119156	2189462	
SMA-MA 8 50/70 - próbka 2	$\eta_1$	7007317	6989543	7025091	0,999416
	$E_2$	1733	1723	1744	
	$\eta_2$	1857614	1831908	1883319	
SMA-MA 8 50/70 - próbka 3	$\eta_1$	9017513	8997685	9037340	0,999384
	$E_2$	2276	2264	2288	
	$\eta_2$	1775184	1747052	1803317	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 1	$\eta_1$	6836656	6809559	6863752	0,998727
	$E_2$	1385	1374	1396	
	$\eta_2$	1562788	1536356	1589220	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 2	$\eta_1$	4735804	4720765	4750842	0,99937
	$E_2$	1042	1035	1050	
	$\eta_2$	1418864	1401413	1436315	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 3	$\eta_1$	6459310	6437399	6481222	0,999084
	$E_2$	1400	1390	1410	
	$\eta_2$	1621330	1596817	1645842	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 1	$\eta_1$	2512261	2508196	2516327	0,999771
	$E_2$	882	877	887	
	$\eta_2$	1020169	1008226	1032113	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 2	$\eta_1$	2768920	2762886	2774954	0,999637
	$E_2$	784	779	789	
	$\eta_2$	971908	960329	983486	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 3	$\eta_1$	3191664	3183417	3199911	0,999558
	$E_2$	809	803	814	
	$\eta_2$	1084333	1071647	1097019	
MA 11 25/55-60 - próbka 1	$\eta_1$	48162960	47872233	48453688	0,997544
	$E_2$	5865	5823	5907	
	$\eta_2$	6714077	6611463	6816692	
MA 11 25/55-60 - próbka 2	$\eta_1$	51122553	50893445	51351661	0,997304
	$E_2$	7532	7487	7577	
	$\eta_2$	4879193	4773888	4984498	
MA 11 25/55-60 - próbka 3	$\eta_1$	46816802	46531923	47101681	0,997442
	$E_2$	5509	5470	5547	
	$\eta_2$	6140629	6046977	6234281	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 1	$\eta_1$	8834645	8792726	8876564	0,998383
	$E_2$	1888	1868	1907	
	$\eta_2$	2373996	2327505	2420487	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 2	$\eta_1$	8519168	8473877	8564460	0,998305
	$E_2$	1475	1461	1489	
	$\eta_2$	1998378	1965361	2031395	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 3	$\eta_1$	7420417	7380672	7460162	0,998438
	$E_2$	1406	1391	1421	
	$\eta_2$	2050719	2016122	2085317	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 1	$\eta_1$	14219048	14144647	14293449	0,998123
	$E_2$	2239	2220	2257	
	$\eta_2$	2710658	2666398	2754917	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 2	$\eta_1$	17144652	17069860	17219444	0,997806
	$E_2$	2575	2560	2591	
	$\eta_2$	2004422	1966703	2042142	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 3	$\eta_1$	11369210	11317741	11420679	0,998649
	$E_2$	1989	1973	2004	
	$\eta_2$	2524505	2486639	2562371	



## Ocena parametrów w temperaturze -15°C

Oznaczenie	Parametr	Ocena	Błąd	Doln. uf	Górn. uf	R
SMA-MA 8 50/70 - próbka 1	η1	38126785	160187,1	37812486	38441085	0,99843082
	E2	4852	25,1	4803	4901	
	η2	5093170	61197,8	4973095	5213245	
SMA-MA 8 50/70 - próbka 2	η1	34447686	114459,6	34223228	34672144	0,99705388
	E2	3945	14,6	3916	3973	
	η2	4331256	35401,7	4261832	4400679	
SMA-MA 8 50/70 - próbka 3	η1	46922820	134627,2	46658813	47186826	0,99672197
	E2	5513	17,3	5479	5547	
	η2	4427637	41685,8	4345890	4509384	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 1	η1	25177986	66083,72	25048394	25307577	0,99790859
	E2	3661	13,54	3634	3687	
	η2	3926028	32998,13	3861318	3990738	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 2	η1	26628079	78404,41	26474326	26781831	0,99758286
	E2	3358	12,14	3334	3382	
	η2	3691989	29562,97	3634016	3749963	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 3	η1	20681920	51210,33	20581496	20782344	0,9981817
	E2	3203	11,98	3180	3227	
	η2	3551107	29153,78	3493936	3608278	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 1	η1	18117682	52609,59	18014458	18220906	0,99843082
	E2	2791	11,83	2767	2814	
	η2	2568732	28834,19	2512158	2625307	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 2	η1	13696896	29256,54	13639524	13754269	0,99875867
	E2	2422	9,06	2404	2439	
	η2	2929433	21851,82	2886581	2972284	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 3	η1	16280518	31803,04	16218151	16342884	0,99852051
	E2	2656	8,00	2641	2672	
	η2	2395328	19472,21	2357143	2433514	
MA 11 25/55-60 - próbka 1	η1	132514937	0,00000	132514937	132514937	0,99508993
	E2	12399	13,86132	12372	12427	
	η2	10939870	0,00000	10939870	10939870	
MA 11 25/55-60 - próbka 2	η1	152408963	0,00000	152408963	152408963	0,99523564
	E2	14923	16,03786	14891	14954	
	η2	10185940	0,00000	10185940	10185940	
MA 11 25/55-60 - próbka 3	η1	145220601	0,00000	145220601	145220601	0,99536204
	E2	14001	15,34056	13971	14031	
	η2	11622767	0,00000	11622767	11622767	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 1	η1	29279407	77242,49	29127933	29430881	0,99739516
	E2	4246	15,37	4216	4277	
	η2	3852257	37414,91	3778885	3925628	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 2	η1	30195428	77070,87	30044291	30346566	0,99793693
	E2	4386	15,69	4355	4416	
	η2	4560731	38291,06	4485641	4635820	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 3	η1	44569973	116506,2	44341502	44798444	0,99727217
	E2	6090	20,4	6050	6130	
	η2	5116788	49296,5	5020116	5213459	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 1	η1	47607500	145109,7	47322937	47892063	0,99680938
	E2	5782	20,3	5742	5822	
	η2	5367478	49506,6	5270394	5464561	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 2	η1	56011930	157743,2	55702593	56321268	0,99695798
	E2	7094	23,7	7047	7140	
	η2	6051346	57536,0	5938516	6164175	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 3	η1	41579300	137720,0	41309228	41849371	0,99682292
	E2	4742	17,3	4708	4776	
	η2	4932625	42189,4	4849891	5015359	

## Ocena parametrów w temperaturze -25°C

Oznaczenie	Parametr	Ocena	Doln. uf	Górn. uf	R
SMA-MA 8 50/70 - próbka 1	η1	424017556	424017556	424017556	0,9918111
	E2	27309	27250	27367	
	η2	17710228	17710228	17710228	
SMA-MA 8 50/70 - próbka 2	η1	344914891	344914891	344914891	0,98948895
	E2	20243	20200	20286	
	η2	14001662	14001662	14001662	
SMA-MA 8 50/70 - próbka 3	η1	446612454	446612454	446612454	0,98904544
	E2	27220	27162	27277	
	η2	15570681	15570681	15570681	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 1	η1	215843049	215843049	215843049	0,99117602
	E2	14495	14463	14526	
	η2	10650575	10650575	10650575	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 2	η1	210518164	210518164	210518164	0,99194984
	E2	15039	15006	15071	
	η2	11021280	11021280	11021280	
SMA-MA 8 45/80-65- próbka 3	η1	309052602	309052602	309052602	0,9909078
	E2	20807	20763	20851	
	η2	12672269	12672269	12672269	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 1	η1	204994477	204994477	204994477	0,99312203
	E2	15976	15942	16011	
	η2	12293459	12293459	12293459	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 2	η1	272490515	272490515	272490515	0,9918111
	E2	19790	19748	19832	
	η2	12451102	12451102	12451102	
SMA-MA 8 65/105-80- próbka 3	η1	309052602	309052602	309052602	0,99090785
	E2	20807	20763	20851	
	η2	12672269	12672269	12672269	
MA 11 25/55-60 - próbka 1	η1	1,097338E+09	1,097338E+09	1,097338E+09	0,98493136
	E2	5,478108E+04	5,466625E+04	5,489591E+04	
	η2	2,813911E+07	2,813911E+07	2,813911E+07	
MA 11 25/55-60 - próbka 2	η1	1,267337E+09	1,267337E+09	1,267337E+09	0,98318969
	E2	5,847449E+04	5,835207E+04	5,859692E+04	
	η2	2,993366E+07	2,993366E+07	2,993366E+07	
MA 11 25/55-60 - próbka 3	η1	1,299750E+09	1,299750E+09	1,299750E+09	0,98512292
	E2	6,090753E+04	6,078530E+04	6,102976E+04	
	η2	3,220471E+07	3,220471E+07	3,220471E+07	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 1	η1	287171476	287171476	287171476	0,99178541
	E2	20790	20745	20835	
	η2	13721149	13721149	13721149	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 2	η1	269451563	269451563	269451563	0,99130996
	E2	18476	18436	18516	
	η2	12921565	12921565	12921565	
SMA-MA 8 45/80-65 +0,5%- próbka 3	η1	437267554	437267554	437267554	0,98951517
	E2	27914	27855	27974	
	η2	16006290	16006290	16006290	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 1	η1	342835864	342835864	342835864	0,99680938
	E2	21222	21176	21268	
	η2	14141218	14141218	14141218	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 2	η1	337887451	337887451	337887451	0,99695798
	E2	20560	20515	20605	
	η2	14199907	14199907	14199907	
SMA-MA 8 45/80-65 -0,5%- próbka 3	η1	638408407	638408407	638408407	0,99682292
	E2	36337	36266	36408	
	η2	12550037	12550037	12550037	

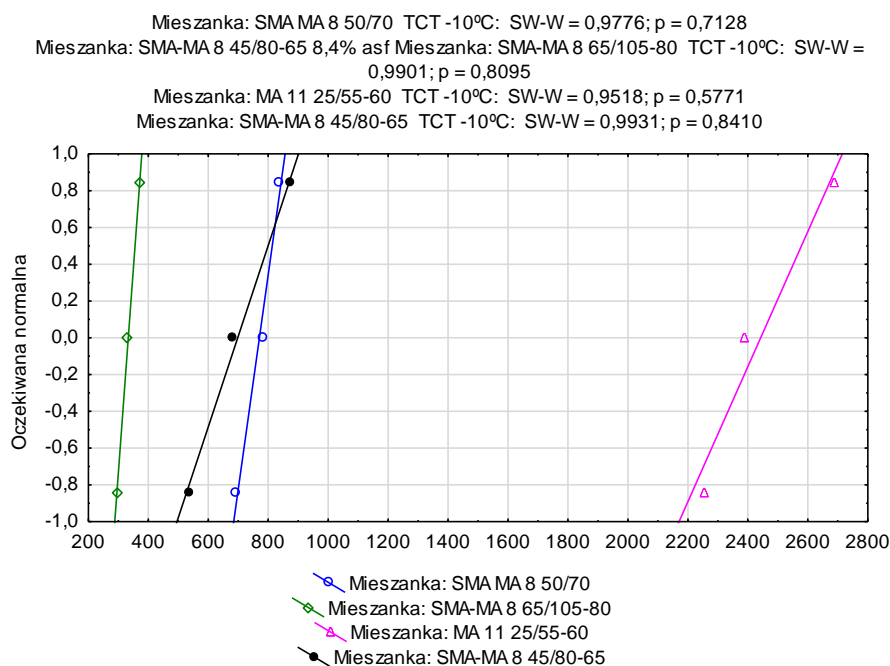
# ZAŁĄCZNIK NR 4 – WYNIKI TESTÓW STATYSTYCZNYCH PRZEPROWADZONYCH W ANALIZIE ZALEŻNOŚCI RODZAJU LEPISZCZA W TEŚCIE TCT I RT

## ZAŁOŻENIA DO PRZEPROWADZANIA ANALIZY WARIANCJI – RODZAJ LEPISZCZA DLA TESTÓW TCT I RT

**Test Levene'a jednorodności wariancji, jeżeli  $p \geq 0,05$  to wariancje są jednorodne**

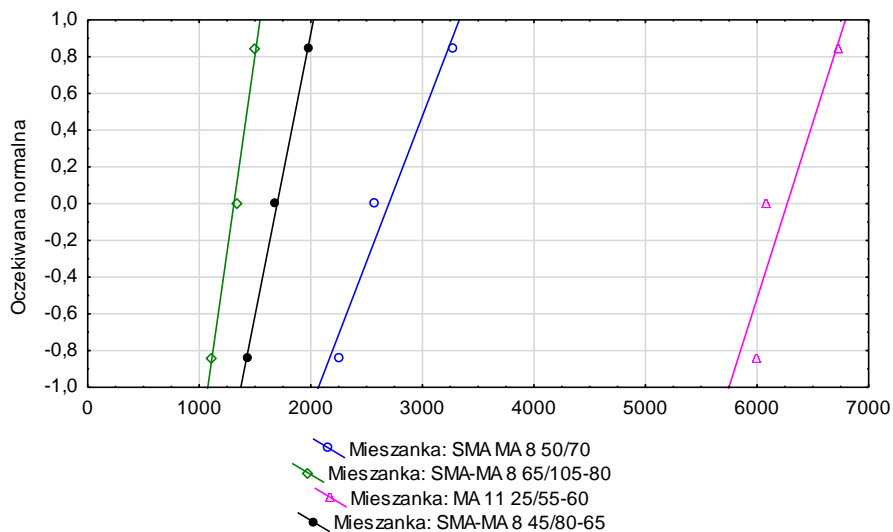
TEST/ TEMPERATURA	Efekt: "Mieszanka" Stopnie swobody dla każdego F : 3, 8			
	MS Efekt	MS Błąd	F	p
TCT -10°C	11870	4726	2,511725	0,132387
TCT -15°C	36526	25361	1,440242	0,301528
TCT -25°C	2179021	3820382	0,570367	0,650075
RT -10°C	10411	2783	3,741599	0,060196
RT -15°C	15095	4434	3,404808	0,073648
RT -25°C	20197985	7123811	2,835278	0,106052

**Wykres normalności TCT -10°C wraz z testem Shapiro-Wilka, jeżeli  $p \geq 0,05$  to rozkład normalny**



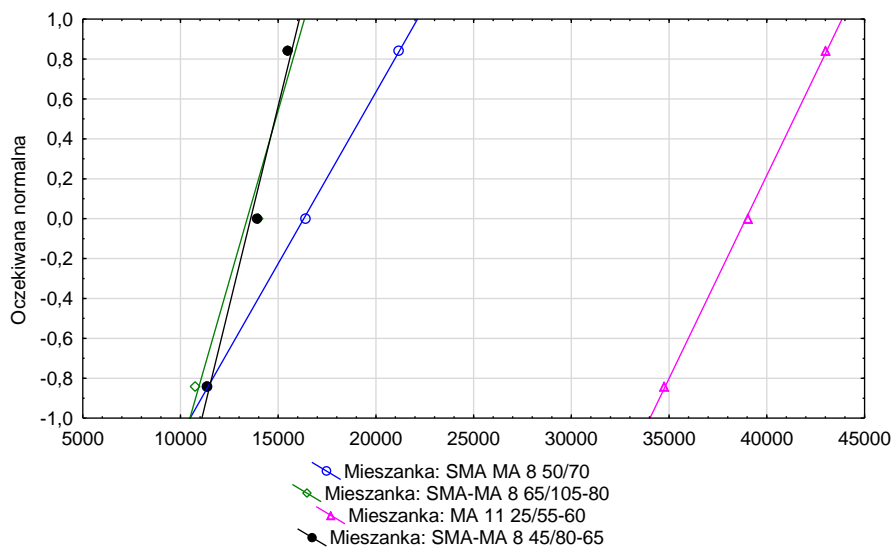
**Wykres normalności TCT -15°C wraz z testem Shapiro-Wilka, jeżeli  $p \geq 0,05$  to rozkład normalny**

Mieszanka: SMA MA 8 50/70 TCT -15°C: SW-W = 0,9508; p = 0,5728  
 Mieszanka: SMA-MA 8 45/80-65 8,4% asf Mieszanka: SMA-MA 8 65/105-80 TCT -15°C: SW-W = 0,9839; p = 0,7569  
 Mieszanka: MA 11 25/55-60 TCT -15°C: SW-W = 0,8434; p = 0,2230  
 Mieszanka: SMA-MA 8 45/80-65 TCT -15°C: SW-W = 0,9959; p = 0,8772



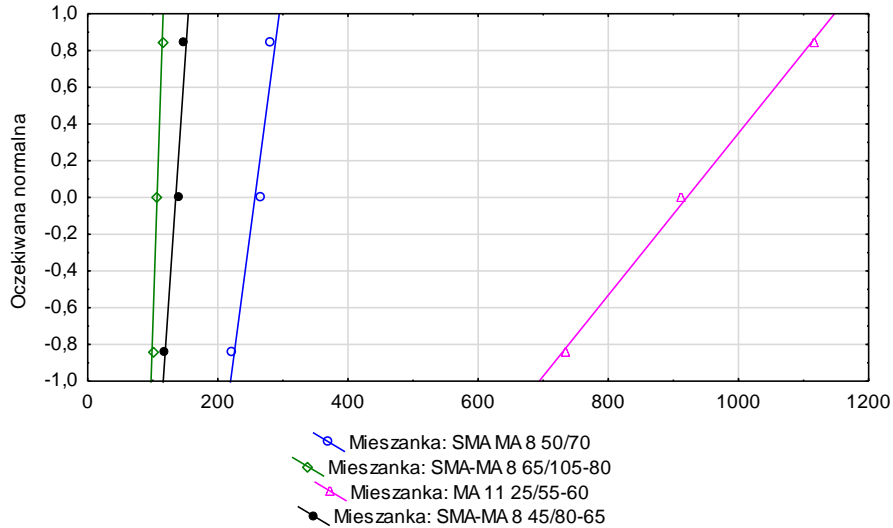
**Wykres normalności TCT -15°C wraz z testem Shapiro-Wilka, jeżeli  $p \geq 0,05$  to rozkład normalny**

Mieszanka: SMA MA 8 50/70 TCT -25°C: SW-W = 0,9997; p = 0,9690  
 Mieszanka: SMA-MA 8 45/80-65 8,4% asf Mieszanka: SMA-MA 8 65/105-80 TCT -25°C: SW-W = 0,9575; p = 0,6036  
 Mieszanka: MA 11 25/55-60 TCT -25°C: SW-W = 0,9995; p = 0,9574  
 Mieszanka: SMA-MA 8 45/80-65 TCT -25°C: SW-W = 0,9819; p = 0,7423



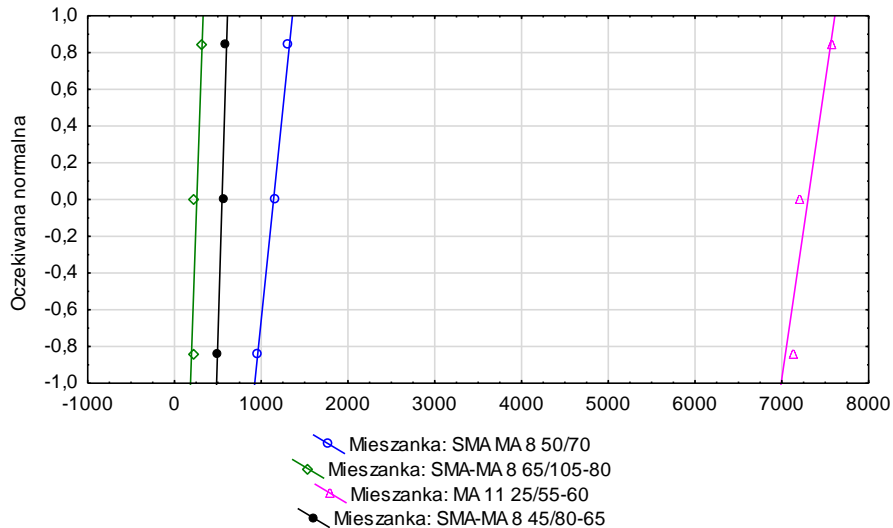
## Wykres normalności RT -10°C wraz z testem Shapiro-Wilka, jeżeli $p \geq 0,05$ to rozkład normalny

Mieszanka: SMA MA 8 50/70 RT -10°C: SW-W = 0,9347; p = 0,5067  
 Mieszanka: SMA-MA 8 45/80-65 8,4% asf Mieszanka: SMA-MA 8 65/105-80 RT -10°C: SW-W = 0,9643; p = 0,6369  
 Mieszanka: MA 11 25/55-60 RT -10°C: SW-W = 0,9981; p = 0,9161  
 Mieszanka: SMA-MA 8 45/80-65 RT -10°C: SW-W = 0,8972; p = 0,3767

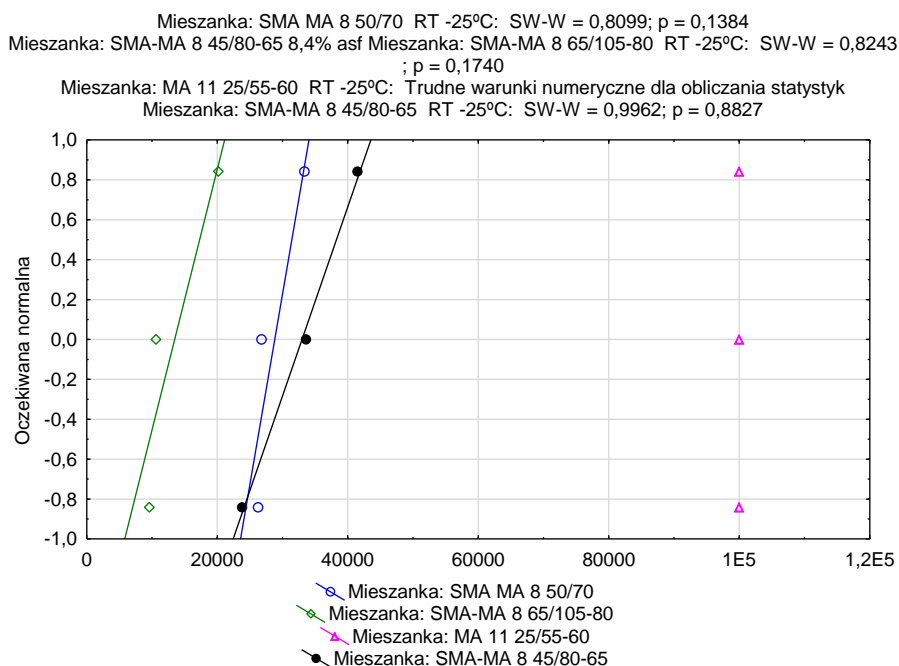


## Wykres normalności RT -15°C wraz z testem Shapiro-Wilka, jeżeli $p \geq 0,05$ to rozkład normalny

Mieszanka: SMA MA 8 50/70 RT -15°C: SW-W = 0,9952; p = 0,8669  
 Mieszanka: SMA-MA 8 45/80-65 8,4% asf Mieszanka: SMA-MA 8 65/105-80 RT -15°C: SW-W = 0,7737; p = 0,0531  
 Mieszanka: MA 11 25/55-60 RT -15°C: SW-W = 0,8677; p = 0,2891  
 Mieszanka: SMA-MA 8 45/80-65 RT -15°C: SW-W = 0,8758; p = 0,3122



## Wykres normalności RT -25°C wraz z testem Shapiro-Wilka, jeżeli $p \geq 0,05$ to rozkład normalny



## WYNIKI TESTU TUKEYA

### TCT -10°C

	Mieszanka	{1}	{2}	{3}	{4}
		770,67	333,33	2442,7	698,33
1	SMA MA 8 50/70		0,026309	0,000231	0,927271
2	SMA-MA 8 65/105-80	0,026309		0,000231	0,061201
3	MA 11 25/55-60	0,000231	0,000231		0,000231
4	SMA-MA 8 45/80-65	0,927271	0,061201	0,000231	

### TCT -15°C

	Mieszanka	{1}	{2}	{3}	{4}
		2699,7	1311,3	6270,3	1698,3
1	SMA MA 8 50/70		0,007643	0,000233	0,042235
2	SMA-MA 8 65/105-80	0,007643		0,000231	0,596271
3	MA 11 25/55-60	0,000233	0,000231		0,000231
4	SMA-MA 8 45/80-65	0,042235	0,596271	0,000231	

**TCT -25°C**

	Mieszanka	{1} 16309,	{2} 13412,	{3} 38935,	{4} 13590,
1	SMA MA 8 50/70		0,758378	0,000437	0,789985
2	SMA-MA 8 65/105-80	0,758378		0,000301	0,999918
3	MA 11 25/55-60	0,000437	0,000301		0,000306
4	SMA-MA 8 45/80-65	0,789985	0,999918	0,000306	

**RT -10°C**

	Mieszanka	{1} 257,00	{2} 106,67	{3} 920,67	{4} 135,33
1	SMA MA 8 50/70		0,300366	0,000339	0,461182
2	SMA-MA 8 65/105-80	0,300366		0,000244	0,982642
3	MA 11 25/55-60	0,000339	0,000244		0,000250
4	SMA-MA 8 45/80-65	0,461182	0,982642	0,000250	

**RT -15°C**

	Mieszanka	{1} 1142,3	{2} 257,67	{3} 7301,7	{4} 548,00
1	SMA MA 8 50/70		0,000717	0,000231	0,007098
2	SMA-MA 8 65/105-80	0,000717		0,000231	0,181873
3	MA 11 25/55-60	0,000231	0,000231		0,000231
4	SMA-MA 8 45/80-65	0,007098	0,181873	0,000231	

**RT -25°C**

	Mieszanka	{1} 28815,	{2} 13483,	{3} 1E5	{4} 33000,
1	SMA MA 8 50/70		0,042949	0,000231	0,803441
2	SMA-MA 8 65/105-80	0,042949		0,000231	0,012616
3	MA 11 25/55-60	0,000231	0,000231		0,000231
4	SMA-MA 8 45/80-65	0,803441	0,012616	0,000231	

## STATYSTYKI OPISOWE

Mieszanka	TCT -10°C Średnie	TCT-10°C Odch.st.	TCT -10°C Bł. std.	TCT -10°C -95,00%	TCT -10°C +95,00%	TCT -15°C Średnie	TCT -15°C Odch.st.	TCT -15°C Bł. std.	TCT -15°C -95,00%	TCT -15°C +95,00%	TCT -25°C Średnie	TCT -25°C Odch.st.	TCT -25°C Bł. std.	TCT -25°C -95,00%	TCT -25°C +95,00%
SMA MA 8 50/70	770,667	71,3045	41,1677	593,536	947,797	2699,667	517,905	299,0124	1413,120	3986,213	16309,33	4896,14	2826,790	4146,64	28472,03
SMA-MA 8 65/105-80	333,333	37,6873	21,7588	239,713	426,954	1311,333	195,582	112,9193	825,481	1797,186	13412,33	2414,84	1394,208	7413,54	19411,13
MA 11 25/55-60	2442,667	223,4554	129,0121	1887,573	2997,761	6270,333	403,428	232,9194	5268,162	7272,505	38934,67	4133,53	2386,492	28666,42	49202,91
SMA-MA 8 45/80-65	698,333	170,0892	98,2010	275,808	1120,858	1698,333	274,066	158,2322	1017,515	2379,152	13590,00	2079,40	1200,543	8424,48	18755,52

Mieszanka	RT -10°C Średnie	RT-10 °C Odch.st.	RT -10°C Bł. std.	RT -10°C -95,00%	RT -10°C +95,00%	RT -15°C Średnie	RT -15°C Odch.st.	RT -15°C Bł. std.	RT -15°C -95,00%	RT -15°C +95,00%	RT -25°C Średnie	RT -25°C Odch.st.	RT -25°C Bł. std.	RT -25°C -95,00%	RT -25°C +95,00%
SMA MA 8 50/70	257,0000	30,5123	17,6163	181,2033	332,797	1142,333	182,443	105,3333	689,121	1595,546	28815,3	3965,25	2289,34	18965,1	38665,6
SMA-MA 8 65/105-80	106,6667	7,6376	4,4096	87,6938	125,640	257,667	54,003	31,1787	123,516	391,818	13483,0	5853,49	3379,51	-1057,9	28023,9
MA 11 25/55-60	920,6667	190,6839	110,0914	446,9817	1394,352	7301,667	242,079	139,7645	6700,309	7903,025	100000,0	0,00	0,00	100000,0	100000,0
SMA-MA 8 45/80-65	135,3333	15,3080	8,8380	97,3063	173,360	548,000	49,153	28,3784	425,898	670,102	33000,0	8863,70	5117,46	10981,3	55018,7