

**Instytut Badawczy Dróg i Mostów
Zakład Technologii Nawierzchni
Pracownia Lepiszcz Bitumicznych**

SPRAWOZDANIE

Temat TN-245

ETAP II

**Ocena wpływu właściwości reologicznych lepiszcza asfaltowego na deformacje trwale
nawierzchni drogowej**

Kierownik Zakładu TN:

prof. dr hab. inż. Dariusz SYBILSKI

Zespół:

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski
dr inż. Marcin Gajewski
dr inż. Wojciech Bańkowski
mgr inż. Renata Horodecka
mgr inż. Andrzej Wróbel
Krzysztof Mirski

Technicy:

Teresa Gawenda
Jadwiga Migdalska
Tomasz Michalski
Dariusz Jasiński

SPIS TREŚCI

I.	Podstawa pracy.....	3
II.	Cel pracy.....	3
III.	Program pracy.....	3
	RAPORT z realizacji ETAPU II.....	4
1.	Wstęp.....	5
1.1.	Uwagi ogólne.....	5
1.2.	Układ raportu.....	5
2.	Badania lepiszczy asfaltowych -weryfikacja dotychczasowych i zapoznanie się z nowymi systemami oceny lepiszczy asfaltowych pod względem ich odporności na deformacje trwałe	6
2.1.	Materiały do badań - lepiszcza	6
2.2.	Badania podstawowe wybranych lepiszczy asfaltowych	6
2.3.	Badania właściwości reologicznych lepiszczy asfaltowych w reometrze DSR.....	7
2.3.1.	Moduł zespolony i kąt przesunięcia fazowego	7
2.3.2.	Lepkość zerowego ścinania.....	8
2.3.3.	Ocena w ramach górnego kryterium PG systemu Superpave	10
2.3.4.	Pełzanie pod obciążeniem powtarzalnym	11
3.	Badania mieszanek mineralno-asfaltowych	22
3.1.	Metodyka	22
3.1.1.	Zawartość wolnych przestrzeni	22
3.1.2.	Odporność na koleinowanie (duży koleinomierz - DK)	22
3.1.3.	Odporność na koleinowanie (mały koleinomierz - MK).....	24
3.2.	Mieszanki mineralno-asfaltowe, recepty, oznakowanie	24
3.3.	Mieszanki mineralno-asfaltowe (projekt, podstawowe właściwości)	25
3.3.1.	Projekt	25
3.3.2.	Badanie koleinowania w temperaturze 60°C (duży koleinomierz - DK).....	28
3.3.3.	Badanie koleinowania w temperaturze 60°C (mały koleinomierz - MK).....	30
3.3.4.	Badanie koleinowania w temperaturze 45°C (mały koleinomierz - MK).....	33
3.3.5.	Zestawienie zbiorcze z badań koleinowania w temperaturze 60°C – koleinomierz duży	35
3.3.6.	Zestawienie zbiorcze z badań koleinowania w temperaturze 45°C i 60°C – koleinomierz mały.....	36
4.	Analiza uzyskanych wyników pod kątem określenia powiązań między badaniem POP a badaniem koleinowania.....	39
5.	Literatura.....	44

I. Podstawa pracy

Badania wykonano na podstawie umowy nr 2175/2008 (temat TN-245) z dnia 06.08.2008 r. zawartej pomiędzy Generalną Dyрекcją Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie, a Instytutem Badawczym Dróg i Mostów w Warszawie.

II. Cel pracy

Celem pracy jest poznanie reologii asfaltów, poznanie parametrów, których interpretacja pozwoliłaby na ocenę zachowania się lepiszcza w mieszankach mineralno-asfaltowych pod względem odporności nawierzchni drogowej na deformacje trwałe.

III. Program pracy

Program pracy zgodnie z założeniami umowy został podzielony na trzy etapy. W części pierwszej przewidziano badania podstawowe materiałów składowych oraz badania reologiczne lepiszczy asfaltowych. W części drugiej na podstawie obszernych badań laboratoryjnych przewidziano przeprowadzenie oceny właściwości funkcjonalnych i użytkowych wybranych asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych z ich zastosowaniem. Na zakończenie pracy przewidziano analizę wyników i wnioski. Niniejsze sprawozdanie dotyczy Etapu II przewidzianego do realizacji w roku 2009, którego program przedstawiono poniżej.

Etap II

c.d. Zadanie 2.2

Badania właściwości reologicznych lepiszczy asfaltowych w reometrze DSR

- moduł zespolony i kąt przesunięcia fazowego
- lepkość zerowego ścinania
- pełzanie pod obciążeniem powtarzalnym

Zadanie 3

Badania mieszanek mineralno-asfaltowych

Zadanie 3.1

Opracowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych

Zadanie 3.2

Badanie odporności na koleinowanie

Badania zostaną przeprowadzone metodą według PN-EN 12697-22 w dużym i małym aparacie

RAPORT

z realizacji

ETAPU II

1. Wstęp

1.1. Uwagi ogólne

W niniejszym raporcie rozważane są zagadnienia, które zostały zasygnalizowane lub wstępnie zaprezentowane w *Raporcie z I etapu*. W szczególności dotyczy to proponowanego badania odporności na deformacje trwale lepiszczy asfaltowych, który w zamierzeniu pozwalałby na przewidywanie odporności na koleinowanie mieszanek mineralno-asfaltowych wykonanych na bazie danego lepiszcza. W stosunku do wyników zaprezentowanych w poprzednim sprawozdaniu, tutaj zwrócono szczególną uwagę na powtarzalność wyników, jako, że każda wartość współczynnika odporności na deformacje trwale została wyznaczona na podstawie co najmniej trzech badań doświadczalnych (w szczególnych przypadkach nawet jako średnia z dziesięciu badań doświadczalnych).

Tak usystematyzowane wyniki badań na lepiszczach, zostały skonfrontowane z wynikami badań koleinowania wykonanych na mieszankach mineralno-asfaltowych, które charakteryzują się tymi samymi parametrami funkcjonalno-mechanicznymi, a różnią się jedynie rodzajem lepiszcza użytego do ich wykonania. Badania przeprowadzono w dwóch typach koleinomierzy, przy różnych temperaturach.

Uzyskane wyniki dotyczące współczynnika deformacji trwałych oraz koleinowania są wstępnie analizowane w poszukiwaniu korelacji między nimi. Szczegółowa analiza ma stanowić główny trzon trzeciej części niniejszej pracy badawczej.

1.2. Układ raportu

Ze względu na przedstawioną krótko w pkt.1.1 zawartość merytoryczną pracy została ona podzielona na cztery zasadnicze części. Pkt.1 stanowi wstęp, podczas gdy w pkt.2, 3 i 4 znajduje się zasadnicza, badawcza część pracy. W pkt.2 prezentowane są wyniki dotyczące lepiszczy asfaltowych, dla których wyznaczane są charakterystyczne parametry funkcjonalne (w tym także mechaniczne). Należy podkreślić, że wyniki dotyczące wybranych parametrów funkcjonalnych były już prezentowane w *Raporcie z I etapu*, tutaj jednak są powtórnie przywołane w uzupełnionej wersji po to, żeby umożliwić całościowe spojrzenie na charakterystyczne parametry wybranych do badań lepiszczy asfaltowych. Najważniejsze są jednak w tym punkcie wyniki badania pełzania przy obciążeniu powtarzalnym (POP), na podstawie których jest wyznaczany współczynnik deformacji trwałej w_d . W pkt.3 pracy znajdują się wyniki badań testu koleinowania przeprowadzonego dla zaprojektowanej mieszanki SMA11. Badania wykonano na próbkach wyprodukowanych na podstawie tej samej recepty przy użyciu badanych lepiszczy asfaltowych. W ostatnim punkcie oznaczonym jako 4-ty podjęto wstępną próbę znalezienia korelacji między wynikami badania POP, a testem koleinowania mieszanek mineralno-asfaltowych.

2. Badania lepiszczy asfaltowych -weryfikacja dotychczasowych i zapoznanie się z nowymi systemami oceny lepiszczy asfaltowych pod względem ich odporności na deformacje trwałe

Deformacja odwracalna i nieodwracalna warstw nawierzchni drogowych zależy od wielu czynników, ale głównie od udziału objętościowego kruszywa i lepiszcza, uziarnienia kruszywa, jego rodzaju oraz od właściwości mechanicznych lepiszcza i kruszywa. Teza postawiona w pierwszej części niniejszego raportu jako główny czynnik odpowiedzialny za powstawanie kolein wskazuje lepiszcze asfaltowe (a właściwie jego niewystarczająco dobre właściwości mechaniczne) [Chen i Tsai 1998, 1999]. Teza ta może być postawiona jedynie przy założeniu, że pozostałe parametry technologiczno-użytkowo-funkcjonalne mieszanki mineralno-asfaltowej nie ulegają zmianie

W większości krajów lepiszcza asfaltowe są charakteryzowane przy użyciu standardowych metod badawczych, które pozwalają wyznaczyć np. penetrację, temperaturę mięknięcia, temperaturę łamliwości Fraassa w określonych ustalonych warunkach. Warunki te (np. temperatura) zazwyczaj nie odpowiadają warunkom pracy lepiszcza w nawierzchni asfaltowej. W wyniku tego szacowanie powstawania deformacji trwałych na podstawie tych konwencjonalnych testów w większości przypadków jest niezadowalające. Co więcej nawet uszeregowanie lepiszczy pod względem ich odporności na deformacje trwałe także jest niemożliwe o ile rozważamy zarówno lepiszcza modyfikowane jak i nie poddane modyfikacji.

W ogólności można stwierdzić, że w celu uniknięcia koleinowania lepiszcze asfaltowe powinno być jak najbardziej sztywne i sprężyste w szerokim zakresie temperatur i obciążeń. Znaczna sztywność lepiszcza gwarantuje nieznaczne deformacje, zaś znaczna wartość części sprężystej zespolonego modułu sztywności skutkuje możliwością powrotu zdeformowanej pod obciążeniem nawierzchni do oryginalnej konfiguracji po zdjęciu obciążenia. Tego typu własności mechaniczne lepiszcza asfaltowego można badać m.in. w reometrze dynamicznego ścinania DSR, [AASHTO T 315-06, 2001].

2.1. Materiały do badań - lepiszcza

Lepiszczka dobrano w taki sposób, aby porównać właściwości reologiczne asfaltów powszechnie stosowanych do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych wbudowywanych w drogi. Wobec tego wybrano następujące lepiszcza asfaltowe produkcji krajowej:

- asfalt **35/50** z produkcji Orlen Asfalt z Płocka,
- asfalt **50/70** z produkcji Lotos Asfalt z Gdańska,
- asfalt modyfikowany **Modbit 30B** z produkcji Lotos Asfalt z Gdańska,
- asfalt modyfikowany **Modbit 80B** z produkcji Lotos Asfalt z Gdańska.

2.2. Badania podstawowe wybranych lepiszczy asfaltowych

Dla wybranych lepiszczy asfaltowych przeprowadzono następujące badania podstawowe:

- penetracja w 25[°C] wg PN-EN 1426,
- temperatura mięknięcia PiK wg PN-EN 1427,
- temperatura łamliwości wg Fraassa wg PN-EN 12593.

Uzyskane wyniki zestawiono w tab.2.1. Na podstawie dwóch z nich, tj. penetracji przy 25[°C] i temperatury mięknięcia, można próbować wskazać najlepsze lepiszcze, ze względu na przewidywaną odporność na koleinowanie. Wydaje się, że jest to asfalt 30B, gdyż ma on najwyższą temperaturę mięknięcia i najniższą wartość penetracji.

Tab.2.1. Podstawowe właściwości asfaltów – wyniki badań

WŁAŚCIWOŚCI	RODZAJ ASFALTU			
	35/50P	50/70	30B	80B
1	2	3	4	5
Penetracja w 25°C, 0,1 [mm]	43	67	33	62
Temp. mięknięcia PiK, [°C]	54,2	48	71,4	56,4
Temp. łamliwości, [°C]	-19	-22	-23	-18

Ranking odporności na deformacje trwałe w świetle wyników z tab.2.1 przedstawia się następująco: 30B, 35/50, 80B i 50/70.

2.3. Badania właściwości reologicznych lepiszczy asfaltowych w reometrze DSR

2.3.1. Moduł zespolony i kąt przesunięcia fazowego

Składowe zespolonego modułu ścinania G^* wyznaczono w przy $T=10[°C]$ i częstotliwości równej $f=10$ [Hz]. Tego typu dane są wykorzystywane w procesie projektowania nawierzchni podatnych przy wykorzystaniu tzw. mechanistycznej metody projektowania.

Tab. 2.2. Wartości części rzeczywistej, urojonej, normy modułu zespolonego oraz kąta przesunięcia fazowego w temperaturze $T=10[°C]$ przy częstotliwości $f=10$ [Hz].

$T=10[°C]$, $f=10$ [Hz].	35/50P	50/70	30B	80B
$ G^* $ [MPa]	35.11	22.55	36.60	26.92
Re G^* [MPa]	28.75	17.27	30.76	21.08
Im G^* [MPa]	20.16	15.26	19.86	16.75
δ [stopnie]	35.05	41.53	32.86	38.48

Uwaga: Wartości w tabeli wyliczono jako średnie z 16 pomiarów (oznacza to, że w tabeli nie zachodzą zależności: $\text{Re } G^* = |G^*| \cos \delta$, $\text{Im } G^* = |G^*| \sin \delta$)

Na podstawie informacji zamieszczonych w tab. 2.2 można stwierdzić, że największą wartość części sprężystej modułu ma asfalt 30B, zaś najniższą 50/70. Fakt ten wraz z informacją, że największy kąt przesunięcia fazowego ma lepiszcze 50/70, zaś najniższy asfalt 30B pozwala wskazać lidera (lepiszcze 30B) oraz asfalt o najgorszej charakterystyce sprężysto lepkiej (lepiszcze 50/70). Na podstawie wyników zgromadzonych w tab.2.2 można ustalić następującą kolejność rozważanych lepiszczy asfaltowych: 30B, 35/50P, 80B i 50/70. Warto podkreślić, że identyczny ranking lepiszczy ustalono na podstawie wyników badań podstawowych zamieszczonych w tab.2.1.

Procedura badawcza wyznaczania zespolonego modułu sztywności oraz lepkości zespolonej

- i) Przygotować próbki zachowując odpowiednie reżimy czasowe i temperaturowe przy rozgrzewaniu lepiszcza i wykonywaniu próbek w kształcie walca o średnicy 8[mm] (25[mm]) i wysokości odpowiednio 2[mm] (i 1[mm]). Próbki przygotowuje się w specjalnych formach silikonowych, tak aby były reprezentatywne i nie zawierały pęcherzyków powietrza.
- ii) Próbkę umieścić w reometrze dbając o odpowiednie przyleganie materiału do powierzchni rotora i podstawy reometru. Odpowiednie połączenie między próbką a powierzchnią metalowych elementów zapewnia wcześniejsze rozgrzanie rotora i podstawy do temperatury około $T = 50 [^{\circ}\text{C}]$ (lub innej w zależności od typu lepiszcza).
- iii) Ustawić zadaną (np. $T = 70 [^{\circ}\text{C}]$) temperaturę łaźni oraz elementów Peltiera reometru i odczekać około 10 [min] w celu ustalenia się równowagi termicznej w badanej próbce (oraz między rotorem i podstawą reometru).
- iv) Sprawdzić czy równowaga termiczna została osiągnięta wykonując pomiar modułu ścinania przy sinusoidalnym wymuszeniu odkształceniowym np. o amplitudzie $\gamma = 0.005$, częstotliwości $f = 10 [\text{Hz}]$ co 60[s] przez 600[s]. Jeżeli wartości uzyskanych wyników (np. normy modułu ścinania) są w granicy błędu takie same oznacza to, że równowaga została osiągnięta.
- v) Wykonać pomiar właściwy tzn. test oscylacyjny z zadanym wymuszeniem odkształceniowym ze skokowo zmieniającą się częstotliwością, por. [Schramm 1998]. Należy wykonać np. trzy pełne cykle oscylacyjne (dla jednej wartości częstotliwości) odrzucić pierwszy a z dwóch pozostałych policzyć średnią.
- vi) Wyniki (np. normę modułu, części sprężystą i lepłą modułu, kąt przesunięcia fazowego, normę lepkości zespolonej, części rzeczywistą i urojoną lepkości zespolonej, temperaturę, częstotliwość itd.) zapisać w pliku wynikowym.
- vii) Zmienić temperaturę (np. $T = 60 [^{\circ}\text{C}]$) i kontynuować wszystkie kroki od punktu iii) itd.

Uwaga: Należy wykonać (najlepiej w całym zakresie temperatur) badanie przy użyciu rotora o średnicy 8[mm] i 25[mm]. W przypadku wysokich temperatur często zadane odkształcenia są realizowane przy minimalnych wartościach momentu skręcającego reometru co powoduje znaczny błąd pomiarowy. Zwiększenie średnicy próbki do 25[mm] powoduje, że wartości tych momentów są znacznie wyższe a przez to błąd pomiarowy dużo mniejszy. Na ostateczny komplet wyników składają się wyniki w niskich temperaturach uzyskane dla rotora o średnicy 8[mm] (często nie da się uzyskać tych wyników przy zastosowaniu rotora o średnicy 25[mm] gdyż napotykamy ograniczenie na najwyższy możliwy do zrealizowania w danym typie reometru moment skręcający, który w przypadku naszego reometru wynosi 0.2[Nm]), a w wyższych temperaturach uzyskane dla rotora o średnicy 25[mm]. W środkowym przedziale temperatur oczywiście wyniki muszą się pokryć, a jeżeli się nie pokrywają (w granicy akceptowalnego błędu pomiarowego) to należy szukać przyczyn, a badanie uznać za nieudane.

2.3.2. Lepkość zerowego ścinania

Lepkość zerowego ścinania (Zero Shear Viscosity – ZSV) jest stałą materiałową w danej ustalonej temperaturze [Sybilski 1996]. ZSV może być wyznaczona na podstawie różnych testów (por. np. [Metzger 2002], [Ward 1975]) reologicznych przeprowadzonych np. w reometrze typu DSR:

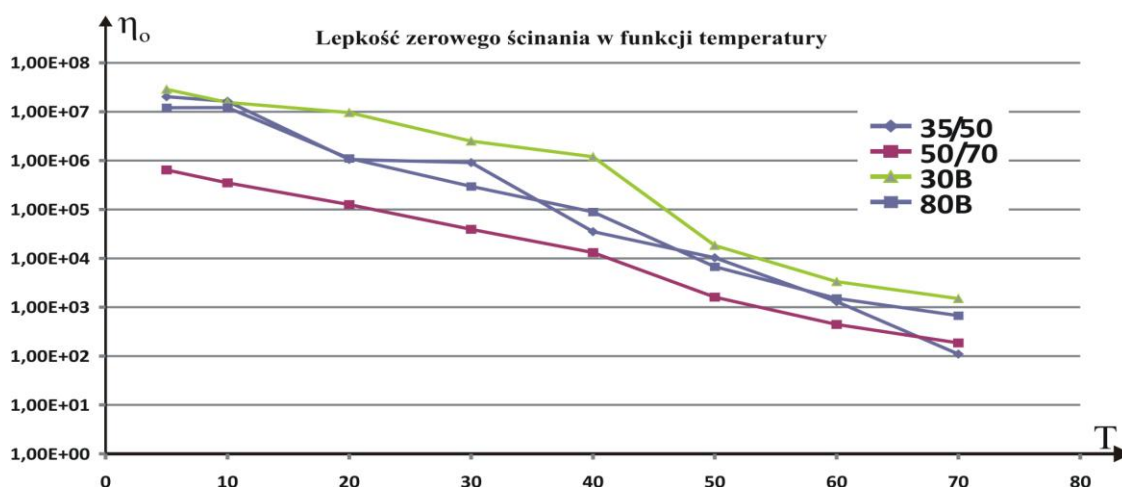
- i) w teście obrotowego ścinania (z wymuszeniem naprężeniowym albo odkształceniowym), jako graniczną wartość funkcji $\eta \dot{\gamma}$, przy $\dot{\gamma} \rightarrow 0$,
- ii) w teście oscylacyjnym przeprowadzonym w szerokim zakresie częstotliwości (częstości kołowej), jako wartość graniczna zespolonej funkcji lepkości $|\eta^*| \omega$, przy $\omega \rightarrow 0$,
- iii) w teście pełzania, jako parametr charakteryzujący tzw. fazę ustalonego pełzania.

W przypadku dwóch pierwszych wariantów, tj. **i)** i **ii)** jest oczywiste, że w celu wyznaczenia ZSV konieczne jest zapostulowanie modeli konstytutywnych (por. [Jemioło i in. 2002]), gdyż ZSV jest wielkością graniczną przy $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ czy $\omega \rightarrow 0$, co oznacza, że nie jest możliwa do wyznaczenia bezpośrednio w eksperymencie. Modele konstytutywnych opisujących $\eta \omega$ czy $\eta \dot{\gamma}$ jest znanych w literaturze bardzo dużo, por. [Barnes i in. 1989] oraz [Sybilski 1996]. W *Raporcie z etapu I* szczegółowo zaprezentowano modele Carreau-Yasudy i Crossa, którymi posłużono się w celu wyznaczenia lepkości zerowego ścinania.

Lepkość zerowego ścinania zgodnie z uwagami zamieszczonymi powyżej można wyznaczyć np. stosując zamieszczoną poniżej procedurę badawczą.

Procedura wyznaczania lepkości zerowego ścinania w teście cyklicznego ścinania

- i) Procedura badawcza wyznaczania lepkości zerowego ścinania bazuje na wynikach: „Procedury badawczej wyznaczania zespolonego modułu sztywności oraz lepkości zespolonej”. Po wykonaniu badania z pliku wyników odzyskujemy dane dotyczące normy lepkości zespolonej w funkcji częstotliwości (częstości kołowej) i temperatury (tj. $|\eta^*| \omega, T$).
- ii) Po podjęciu decyzji odnośnie tego który model konstytutywny stosować będziemy do wyznaczenia lepkości zerowego ścinania, por. np. *Raport z etapu I* gdzie zaprezentowano modele Crossa i Carreau-Yasudy, dla ustalonej temperatury wyznaczamy stosując techniki optymalizacji nieliniowej i zazwyczaj metodę najmniejszych kwadratów wolne parametry w modelu konstytutywnym. Jednym z tych parametrów jest oczywiście η_0 czyli lepkość zerowego ścinania. W naszym przypadku stosujemy algorytm optymalizacji nieliniowej standardowo zaimplementowany w programie RheoWin, tj. programie do obsługi reometru DSR.



Rys. 2.3.1. Lepkości zerowego ścinania dla poszczególnych lepiszczy asfaltowych w funkcji temperatury

Uwaga: Warto zaznaczyć, że tym dokładniejsze jest wyznaczenie lepkości zerowego ścinania przy użyciu tej procedury im w eksperymencie zrealizujemy niższe częstotliwości. Dodatkowo należy zauważyć, że do interpretacji wyników doświadczalnych normy zespolonej lepkości można zastosować także analogię temperaturowo-czasową WLF. Wtedy zakres częstotliwości rozszerzy się znacznie zarówno w kierunku niskich jak i wysokich wartości, a uzyskiwane wyniki będą z pewnością obarczone jeszcze mniejszym błędem.

Na rys.2.3.1 zamieszczono zbiorcze wyniki lepkości zerowego ścinania dla poszczególnych lepiszczy w funkcji temperatury. Warto zauważyć, że na osi odciętych mamy skalę logarytmiczną i dlatego poszczególne wykresy są blisko siebie mimo, że wartości lepkości zerowego ścinania różnią się o kilka rzędów wielkości. Zgodnie z przewidywaniami wszystkie funkcje są malejące, tj. lepkość zerowego ścinania maleje wraz ze wzrostem temperatury.

Na rys.2.3.1 można zaobserwować, że jeżeli uznamy kryterium związane z lepkością zerowego ścinania za pozwalające na przewidywanie odporności na koleinowanie, to w całym zakresie najlepsze jest lepiszcze 30B. Wyniki dla lepiszcza 35/50 i 80B są bardzo zbliżone, z tym że dla wyższych temperatur (zakres $60 - 70 [^{\circ}\text{C}]$) zdecydowanie lepsze wydaje się być lepiszcze 80B. Prawie w całym zakresie temperatur najgorsze jest lepiszcze 50/70, i tylko dla temperatury wynoszącej $70 [^{\circ}\text{C}]$ jest lepsze od lepiszcza 35/50.

Uwaga: Znalezienie jednego punktu na jednym z wykresów zamieszczonych na rys.2.3.1 wymaga przeprowadzenia badania zgodnie z procedurą pt. „*Procedura wyznaczania lepkości zerowego ścinania w teście cyklicznego ścinania*”, które trwa około 8[h], nie wliczając w to czasu potrzebnego na wyznaczenie parametru η_0 w procedurze optymalizacji nieliniowej.

2.3.3. Ocena w ramach górnego kryterium PG systemu Superpave

W celu wyznaczenia górnej temperatury w ramach kryterium PG systemu Superpave zastosowano zamieszczoną poniżej procedurę.

Procedura wyznaczania górnej temperatury w ramach kryterium PG systemu Superpave

- i) Przygotować próbki zachowując odpowiednie reżimy czasowe i temperaturowe przy rozgrzewaniu lepiszcza i wykonywaniu próbek w kształcie walca o średnicy 25[mm] i wysokości 1[mm]. Próbkę przygotowuje się w specjalnych formach silikonowych, tak aby były reprezentatywne i nie zawierały pęcherzyków powietrza.
- ii) Próbkę umieścić w reometrze dbając o odpowiednie przyleganie materiału do powierzchni rotora i podstawy reometru. Odpowiednie połączenie między próbką a powierzchnią metalowych elementów zapewnia wcześniejsze rozgrzanie rotora i podstawy do temperatury około $T = 50 [^{\circ}\text{C}]$ (lub innej w zależności od typu lepiszcza).
- iii) Ustawić zadaną (np. $T = 46 [^{\circ}\text{C}]$) temperaturę łaźni oraz elementów Peltiera reometru i odczekać około 10 [min] w celu ustalenia się równowagi termicznej w badanej próbce (oraz między rotorem i podstawą reometru). Badanie zostanie przeprowadzone od $T = 46 [^{\circ}\text{C}]$ z interwałem równym $6 [^{\circ}\text{C}]$, aż do $82 [^{\circ}\text{C}]$.
- iv) Sprawdzić czy równowaga termiczna została osiągnięta wykonując pomiar modułu ścinania przy sinusoidalnym wymuszeniu odkształceniowym np. o amplitudzie $\gamma = 0.005$, częstotliwości $f = 1.6 [\text{Hz}]$ co 60[s] przez 600[s]. Jeżeli wartości uzyskanych

wyników (np. normy modułu ścinania) są w granicy błędu takie same oznacza to, że równowaga została osiągnięta.

- v) Wykonać test właściwy. Przy sinusoidalnym wymuszeniu odkształceniowym zwiększającym się np. od $\gamma = 0.005$ do $\gamma = 0.5$ wykonać pomiar modułu ścinania (tj. składowych rzeczywistej i urojonej oraz kąta przesunięcia fazowego). Należy wykonać np. trzy pełne cykle oscylacyjne (dla jednej wartości częstotliwości) odrzucić pierwszy a z dwóch pozostałych policzyć średnią.
- vi) Wyniki (np. normę modułu, części sprężystą i lepką modułu, kąt przesunięcia fazowego, normę lepkości zespolonej, części rzeczywistą i urojoną lepkości zespolonej, temperaturę, częstotliwość itd.) zapisać w pliku wynikowym.
- vii) Zmienić temperaturę (np. $T = 52 [^{\circ}\text{C}]$) i kontynuować wszystkie kroki od punktu iii).
- viii) Na podstawie wyników z punktu iv) policzyć właściwe odkształcenie zgodnie ze wzorem

$$\gamma = 12.0 \left| G^* \right|^{0.29}.$$

Odszukać najbliższe odkształcenie w wynikach punktu v). Sprawdzić, jeszcze raz czy zachodzi powyższa zależność z dokładnością do 20%. Policzyć wartość $|G^*|/\sin \delta$.

- ix) Temperaturę przy której parametr $|G^*|/\sin \delta$ jest najbliższy 1[kPa], ale większy niż 1[kPa] uznajemy za wynik, który umieszczamy w tab.2.3.

Uwaga: Zgodnie z kryterium „Superpave” należy jeszcze wykonać analogiczne badania na lepiszczu poddanym starzeniu PAV i RTFOT (parametr $|G^*|/\sin \delta$ musi być wtedy większy niż 2.2[kPa]). Wtedy ostatecznym wynikiem jest niższa temperatura przy której spełniono odpowiedni warunek na parametr $|G^*|/\sin \delta$.

Tab.2.3. Temperatura górna w ramach kryterium PG systemu Superpave (bez uwzględnienia starzenia PAV i RTFOT).

Lepiszczce	35/50P	50/70	30B	80B
Wartość górnego PG	70	64	82 ↑	82

2.3.4. Pełzanie pod obciążeniem powtarzalnym

Wysokotemperaturowy parametr ($|G^*|/\sin \delta$) systemu oceny funkcjonalnej lepiszczy „Superpave” w przypadku lepiszczy modyfikowanych nie pozwala na poprawną ocenę odporności na koleinowanie, co wykazało wielu badaczy [np. Polacco i in. 2008]. Wobec tego potrzebny jest nowy parametr, który prawidłowo pozwoli na przewidywanie odporności na koleinowanie w przypadku lepiszczy poddanych modyfikacji.

W USA wprowadzono wobec tego system zwany „Superpave Plus”. Dość obszerne studium nad zagadnieniem związanym z zastąpieniem systemu oceny funkcjonalnej lepiszczy „Superpave” zawiera praca [D’Angelo i in. 2007] oraz [Dressen i in. 2009]. W pracy tej przeprowadzono badania lepiszczy konieczne do oceny danego lepiszcza przy zastosowaniu kryteriów: $|G^*|/\sin \delta$ (czyli „Superpave”), lepkości zerowego ścinania (ZSV), oraz MSCR. Na tej podstawie uszeregowano lepiszcza, a uzyskaną kolejność zweryfikowano na podstawie badań przeprowadzonych na mieszankach na gorąco w koleinomierzach dwóch typów (Asphalt Pavement Analyzer – APA i Hamburg Wheel Tracking – HWT). Wyniki tych porównań wskazują

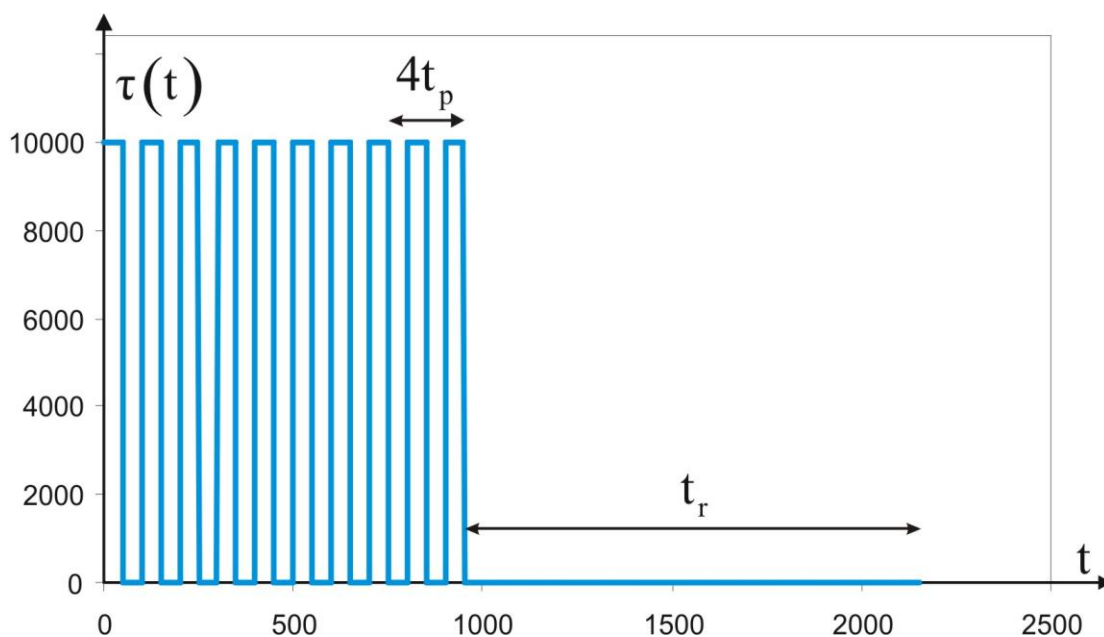
na przewagę (w sensie poprawności przewidywań) parametru wyznaczonego na podstawie testu MSCR w stosunku do pozostałych kryteriów. Jednakże wobec faktu, że badania przeprowadzono na mieszkankach, których nawet nie scharakteryzowano w całej pracy (rodzaj kruszywa, kształt ziaren, uziarnienie itd.), wydaje się, że wnioski o zdecydowanej przewadze proponowanego kryterium MSCR są zbyt daleko idące. Badania należałoby powtórzyć dla różnych typów kruszywa, krzywych uziarnienia, zawartości wolnych przestrzeni, itd.. Także ten powód skłonił nas do zajęcia się tym tematem w kompleksowy sposób.

W IBDiM podjęto próbę wskazania innego parametru reologiczno/funkcjonalnego dla lepiszcza, który mógłby pozwolić na przewidywanie odporności mieszanki na koleinowanie. Proponowany test Pełzania przy Obciążeniu Powtarzalnym (POP) ma charakteryzować własności reologiczne i plastyczne materiału. Test ten jest przeprowadzany przy wymuszeniu naprężeniowym opisanym następującymi wzorami, por. także rys.2.3.2:

$$\tau_k t = \begin{cases} \tau_o, & t \in [k-1 t_p, k t_p] \\ 0, & t \in [k t_p, (k+1)t_p] \end{cases}, k \rightarrow 1, 2, \dots, 9, \quad (2.1)$$

dla $k=10$

$$\tau_{10} t = \begin{cases} \tau_o, & t \in [9t_p, 10t_p] \\ 0, & t \in [10t_p, 10t_p + t_r] \end{cases}. \quad (2.2)$$

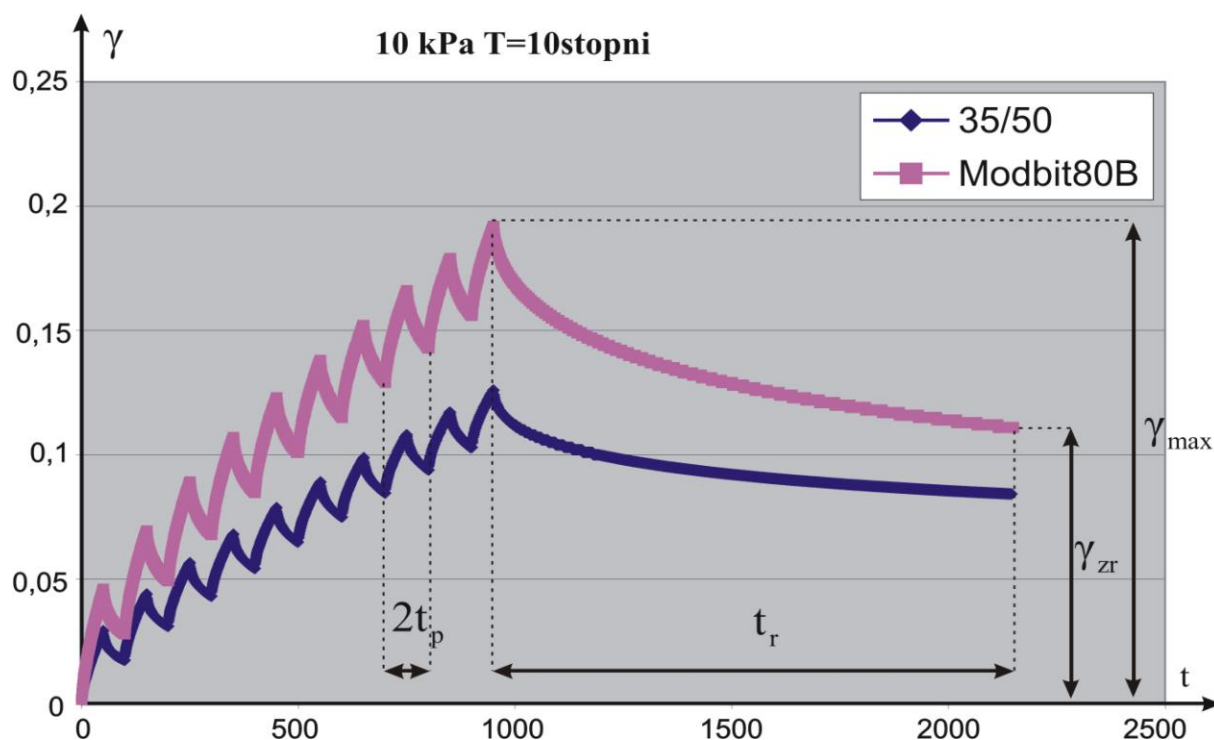


Rys.2.3.2. Wymuszenie naprężeniowe przy $\tau_o=10[\text{kPa}]$ w proponowanym teście pełzania przy obciążeniu powtarzalnym (POP)

We wzorach (2.1) i (2.2) przyjęto następujące wartości charakterystycznych czasów: $t_p=50[\text{s}]$ (czas pełzania) i $t_r=1200[\text{s}]$ (czas relaksacji). Warto zauważyć, że pierwotnie w omawianym teście zamiast ograniczenia na t_r przyjęto warunek na prędkość odkształceń. Założono, że jeżeli prędkość odkształcenia jest zbliżona do zera (z pewną założoną dokładnością), to należy przerwać badanie. Oznaczałoby to, że materiał w pełni uległ procesowi relaksacji, a więc pozostałe odkształcenia można by interpretować jako odkształcenia trwałe. Ponieważ jednak wartości czasów do pełnej relaksacji były znaczne (przekraczające 24h i trudne do oszacowania dla różnych gatunków lepiszczy asfaltowych) to zdecydowaliśmy się na przyjęcie *a priori*

pewnego czasu $t_r=1200[s]$, a pozostałego odkształcenia nie nazywać odkształceniem plastycznym (trwałym) tylko odkształceniem po relaksacji, por. rys.2.3.3. Proponujemy, aby test przeprowadzać dla wartości naprężenia wynoszących $\tau_o=0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0[kPa]$ itd., tak aby wejść w zakres nieliniowych właściwości lepiszcza.

Jako, że proponowane kryterium zostanie zweryfikowane przez badania koleinowania mieszanek mineralno-asfaltowych, to na tym etapie trudno stwierdzić, jakie wartości naprężenia ostatecznie zostaną wybrane. Podobna sytuacja jest z temperaturą w jakiej należy przeprowadzić badanie. Dlatego wstępnie założono, że badanie zostanie przeprowadzone w trzech wybranych temperaturach $T=10, 30, 60 [^{\circ}C]$.



Rys.2.3.3. Odkształcenie w funkcji czasu jako odpowiedź na zadany program naprężeniowy zamieszczony na rys.2.3.2. Interpretacja charakterystycznych wielkości

Jako, że przeprowadzone badanie najlepiej scharakteryzować jedną liczbą (parametrem) to proponujemy wprowadzenie pewnego współczynnika deformacji (trwałej) w_d zdefiniowanego jako:

$$w_d = 1 - \frac{\gamma_{zr}}{\gamma_{max}}, \quad (2.3)$$

gdzie γ_{zr} oznacza odkształcenie pozostałe po relaksacji przez 1200[s], zaś γ_{max} maksymalne odkształcenie po 10 cyklach naprężenia, por. rys. 2.3.3. Warto zauważyć, że:

- $w_d = 1$ kiedy materiał ma **własności sprężyste** ($\gamma_{zr}=0$),
- $w_d = 0$ kiedy materiał ma **własności idealnie plastyczne** ($\gamma_{zr}=\gamma_{max}$).

Wobec tego, z punktu widzenia deformacji trwałych, które są nieodzowne żeby powstała koleina, w naszym przypadku uznajemy za **lepsze to lepiszcze, dla którego wartość współczynnika w_d**

jest większa. W ogólności wprowadzony dla lepiszczy współczynnik jest funkcją poziomu naprężenia i temperatury (tj. $w_d = w_d(\tau_o, T)$). W przyszłości po przeprowadzeniu testów koleinowania będziemy się starali podać racjonalny sposób wyznaczania reprezentatywnych wartości τ_o, T dla danego lepiszcza.

Należy także podkreślić, że tego typu badanie odporności na deformacje trwałe ma sens jedynie dla temperatur znacznie niższych od temperatury mięknięcia asfaltu, gdyż po jej przekroczeniu wynik zawsze będzie wynosił $w_d=0$. W przypadku zaproponowanego kryterium pełzania przy obciążeniu powtarzalnym badania należy przeprowadzić zgodnie z zamieszczoną poniżej procedurą.

Procedura badawcza pełzania przy obciążeniu powtarzalnym POP

- i) Badanie przeprowadza się w reometrze dynamicznego ścinania na próbkach lepiszcza asfaltowego w kształcie walca o średnicy 8 [mm] i wysokości 2 [mm]. Próbkę do badania należy odpowiednio przygotować oraz kondycjonować w temperaturze pokojowej.
- ii) Próbkę umieszczoną w reometrze należy ogrzewać/ochładzać do zadanej temperatury stosując element Peltiera oraz dodatkowo łączyć z nagrzewnicą utrzymując stałą temperaturę przez 600[s].
- iii) Następnie w zadanej temperaturze przez 600[s] wykonuje się pomiar modułu zespolonego przy sinusoidalnym wymuszeniu odkształceniowym o amplitudzie $\gamma=0.0005$ zapisując np. 16 wyników w równych odstępach czasu. Zabieg ten pozwala sprawdzić, czy próbka jest w równowadze termicznej. Jeżeli próbka jest w równowadze termicznej, tzn. kolejne wyniki np. długości modułu zespolonego mają zbliżone wartości można przejść do właściwego etapu badania a mianowicie cyklicznej próby pełzania i relaksacji.
- iv) Na tym etapie (tj. badania właściwego) próbkę poddaje się ścinaniu zadając program naprężeniowy o następującej postaci:

$$\tau_k(t) = \begin{cases} \tau_o, & t \in [k-1 t_p, k t_p] \\ 0, & t \in [k t_p, (k+1)t_p] \end{cases}, k \rightarrow 1, 2, \dots, 9$$

dla $k=10$

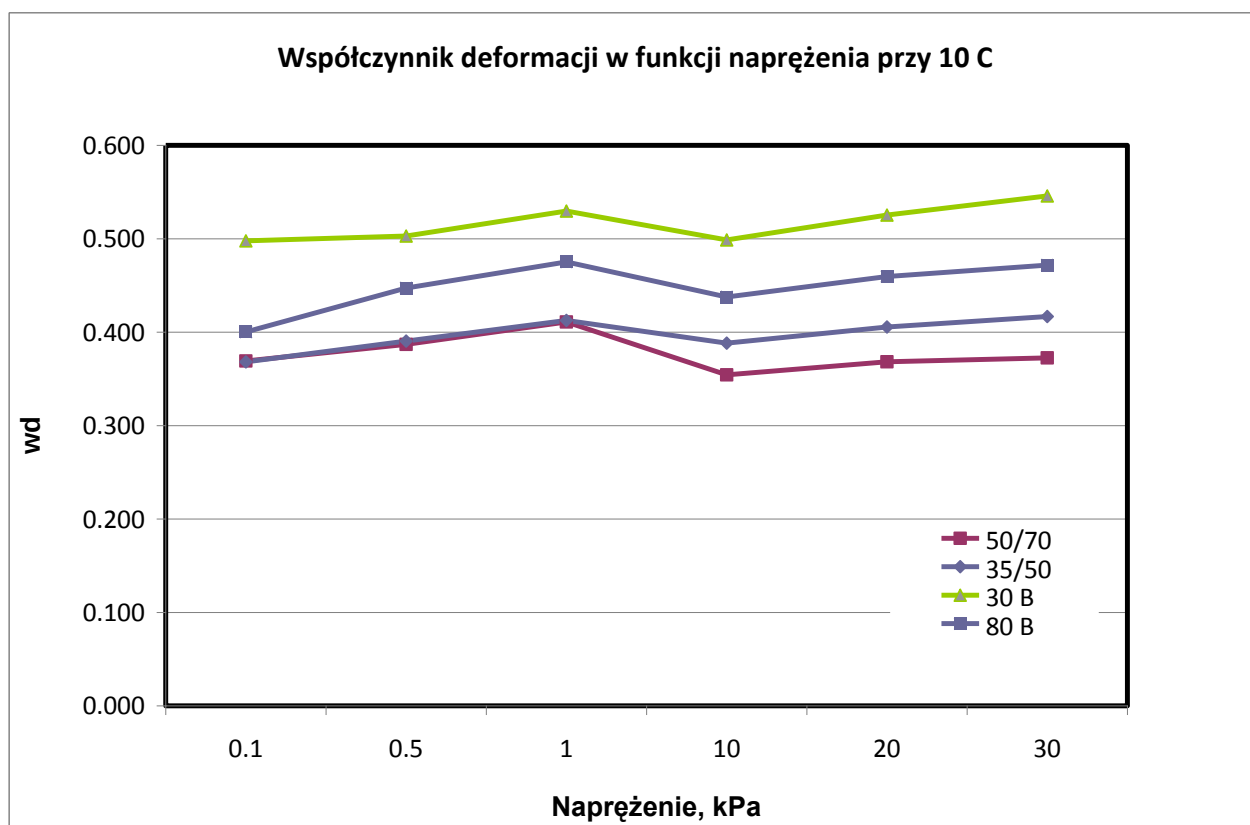
$$\tau_{10}(t) = \begin{cases} \tau_o, & t \in [9t_p, 10t_p] \\ 0, & t \in [10t_p, 10t_p + t_r] \end{cases},$$

gdzie np. $\tau_o=10$ [kPa], $t_p=50$ [s], $t_r=1200$ [s].

- v) Jeżeli chcemy powtórzyć próbę przy innym poziomie naprężeń τ_o na tej samej próbce to należy sprawdzić, czy jest to możliwe przez powtórne badanie z sinusoidalnym wymuszeniem odkształceniowym i rejestracją modułów. Jeżeli wartości te są porównywalne z tymi sprzed badania cyklicznego pełzania i relaksacji to można przystąpić do kolejnego cyklu naprężeniowego np. dla innego poziomu naprężenia τ_o .
- vi) Po wykonaniu badania należy odczytać γ_{zr} i γ_{max} , por. (2.3) i wyliczyć współczynnik w_d .

W przypadku analizowanych lepiszczy badanie współczynnika deformacji przeprowadzono dla trzech wybranych temperatur: $T=10, 30, 45$ i $60[^\circ\text{C}]$ oraz sześciu poziomów naprężenia: $\tau_o=0.1, 0.5, 1.0, 10.0, 20.0, 30.0$ [kPa]. Uzyskane wyniki zamieszczono na poniższych rysunkach.

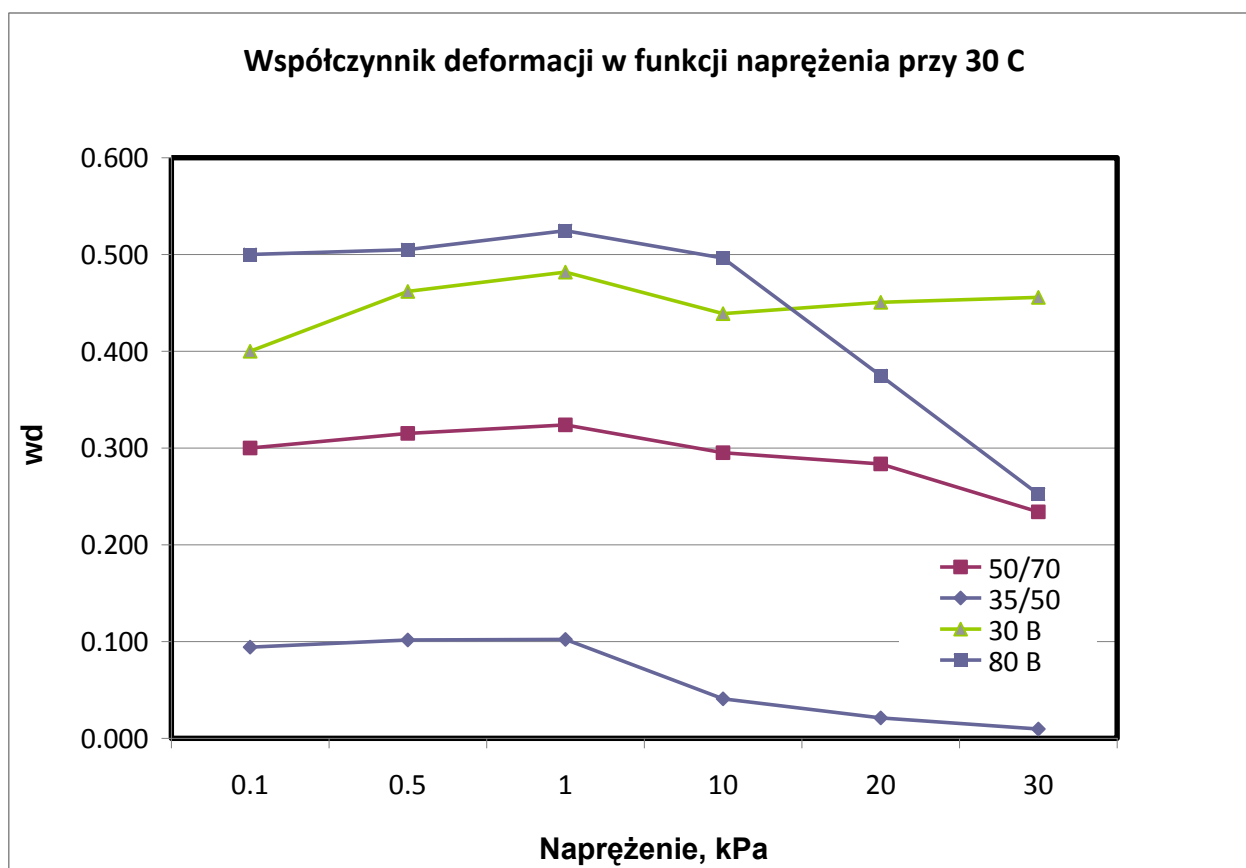
Przykładowo na rys.2.3.4 zamieszczono współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o uzyskany w temperaturze $T=10[^\circ\text{C}]$. W całym zakresie naprężeń współczynnik w_d ma najwyższą wartość dla lepiszcza 30B. Kolejne miejsca w rankingu zajmują następujące lepiszcza: 80B, z wyraźną przewagą nad 35/50 i 50/70.



Rys. 2.3.4. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o uzyskany w temperaturze $T=10[^\circ\text{C}]$

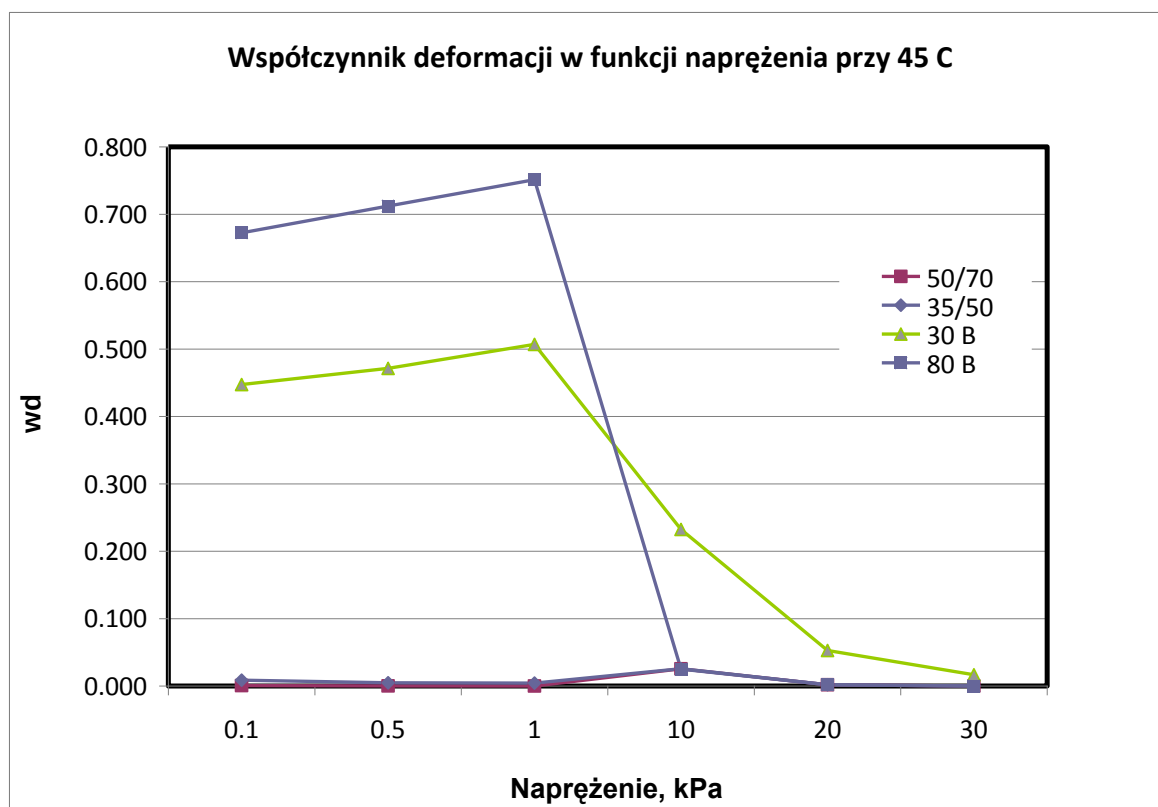
Uwaga: Każdy punkt zamieszczony na powyższym wykresie został wyznaczony jako średnia z minimum trzech pomiarów. Ekstremalny błąd jaki został zanotowany dla najbardziej niekorzystnych warunków temperatury i obciążenia nie przekraczał 5%.

W temperaturze $T=30[^\circ\text{C}]$ widać wyraźny spadek współczynnika w_d dla lepiszczy niemodyfikowanych w całym zakresie naprężeń. Przykładowo dla $\tau_o=0.1$ [kPa] w temperaturze $T=10[^\circ\text{C}]$ wynosił ponad 0.35 dla lepiszcza 50/70 i 35/50, podczas gdy w temperaturze $T=30[^\circ\text{C}]$ przyjmuje odpowiednio wartości 0.3 i 0.1. Lepiszczka modyfikowane wydają się być dużo bardziej odporne na wpływ temperatury, ale tylko w pewnym zakresie naprężeń, tj. od 0.1 do 10 [kPa], por. rys. 2.3.4 i 2.3.5.

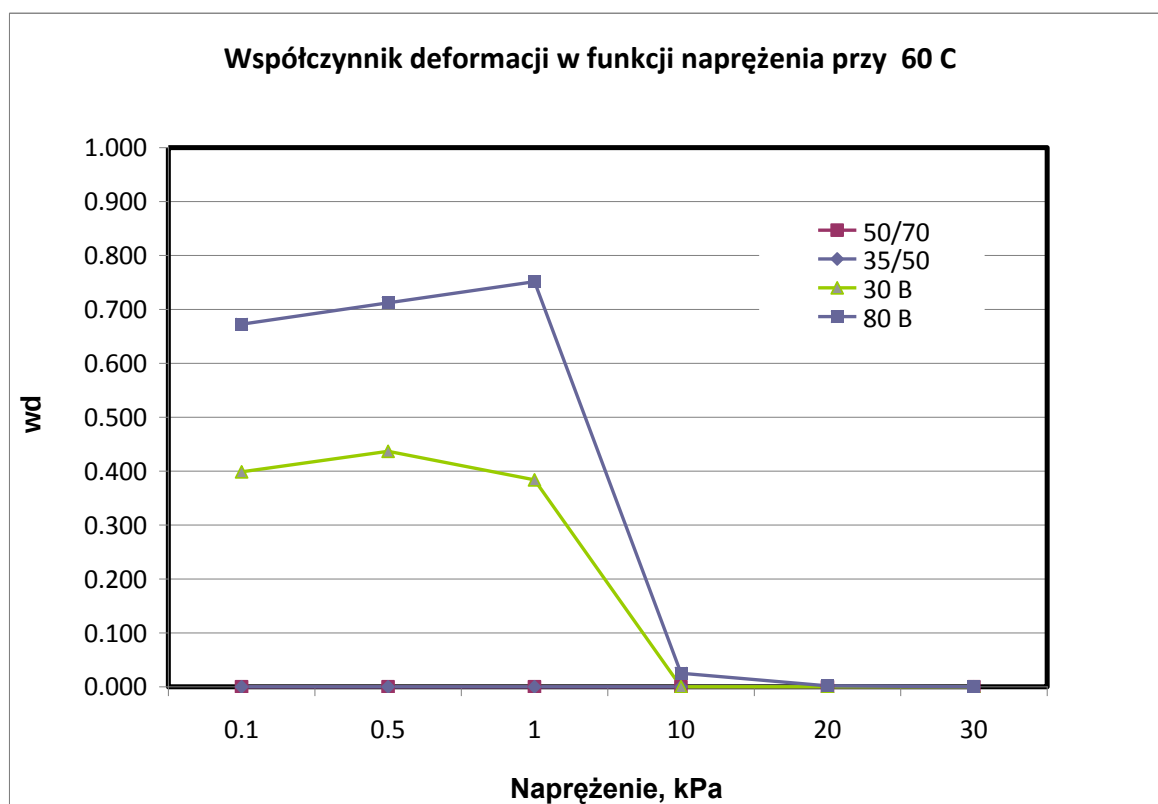


Rys. 2.3.5. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o uzyskany w temperaturze $T = 30 [^{\circ}\text{C}]$

Warto także zauważyć, że w wyższych temperaturach dla umiarkowanych poziomów naprężeń współczynniki deformacji w_d przyjmują wyższe wartości dla lepiszcza 80B, niż dla lepiszcza 30B. W przypadku asfaltów niezmodyfikowanych w temperaturze $T = 45 [^{\circ}\text{C}]$ współczynniki deformacji w całym zakresie naprężeń są zbliżone do zera. Fakt ten jednak jest zgodny z przewidywaniami poczynionymi na podstawie temperatury mięknięcia wyznaczonej w standardowym teście, która dla lepiszcza 35/50 wynosi $54.4 [^{\circ}\text{C}]$, zaś dla lepiszcza 50/70 tylko $49 [^{\circ}\text{C}]$. Oznacza to, że w tych dwóch przypadkach test był przeprowadzany na substancji o własnościach zbliżonych do cieczy a nie ciała sprężystego o własnościach lepkich.



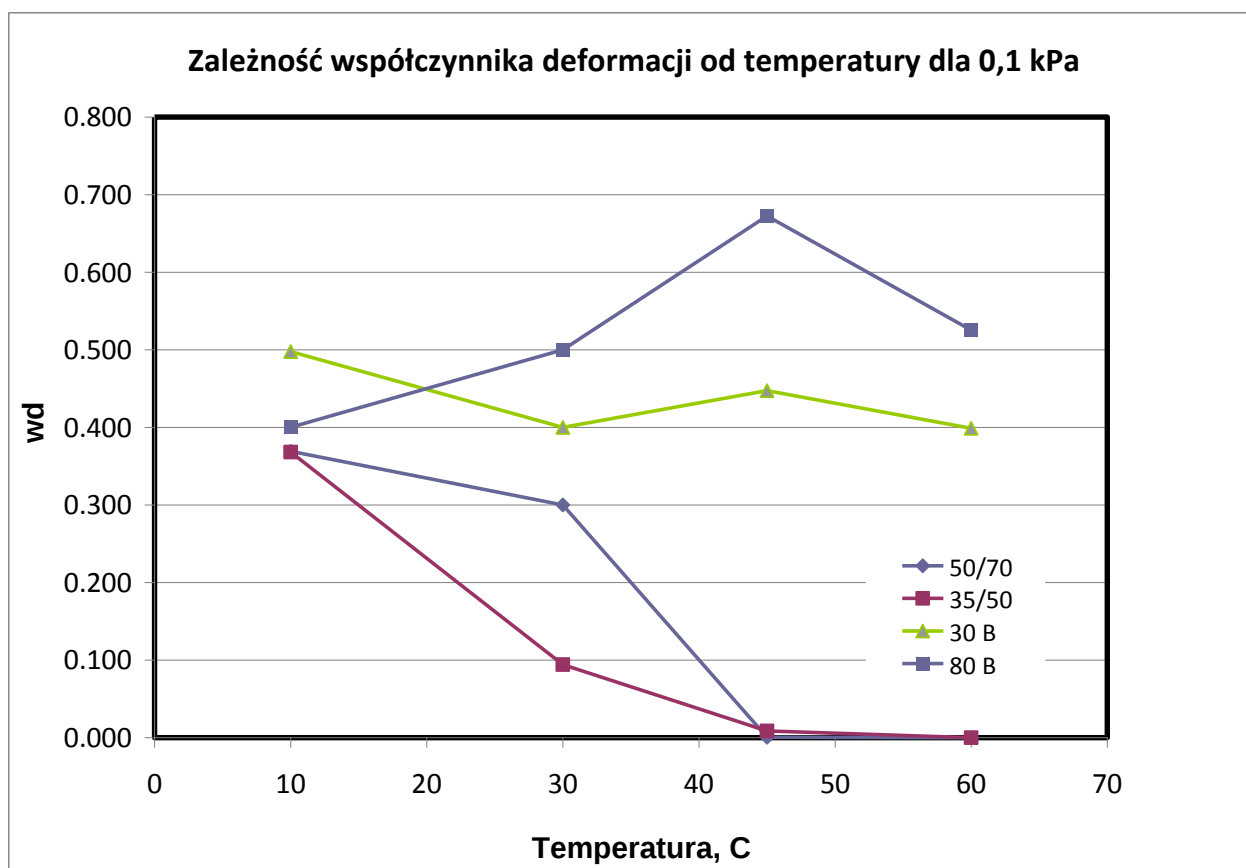
Rys. 2.3.6. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o uzyskany w temperaturze $T = 45 [^{\circ}\text{C}]$



Rys. 2.3.7. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji naprężenia ścinania τ_o uzyskany w temperaturze $T = 60 [^{\circ}\text{C}]$

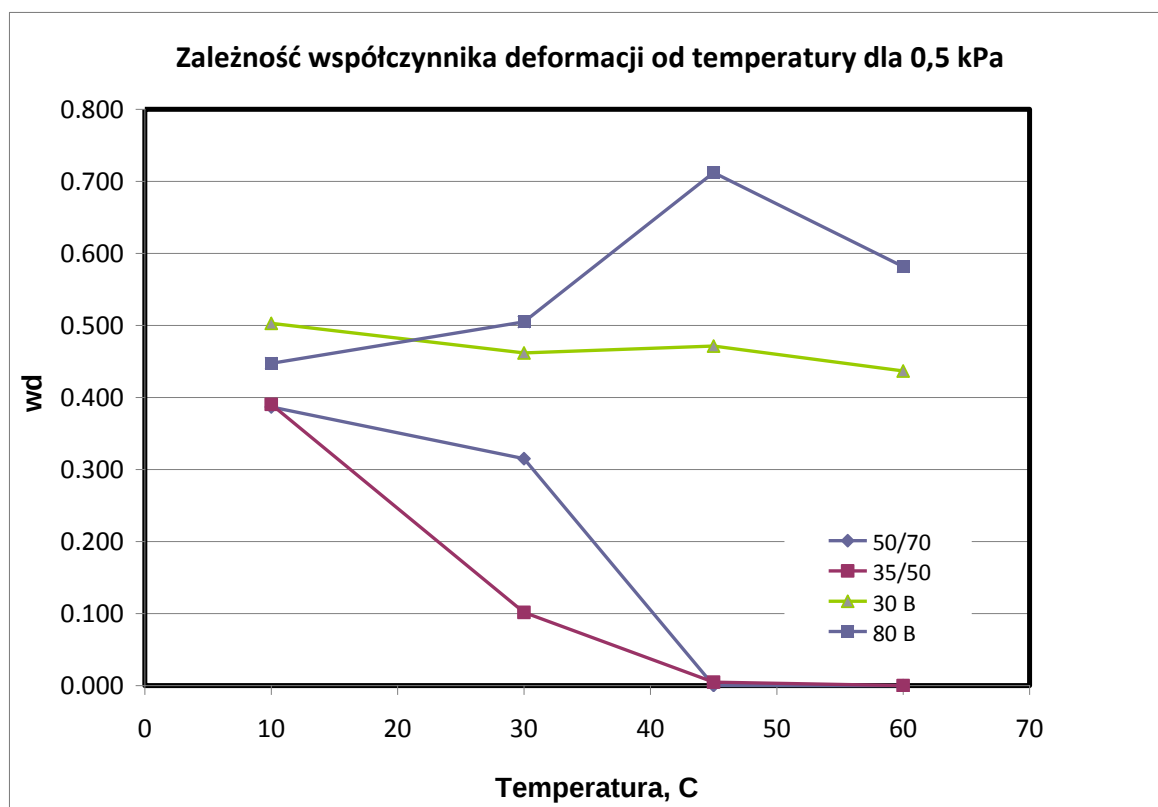
Lepiszczka zmodyfikowane w wysokich temperaturach także wykazują się wyższymi wartościami współczynników deformacji, ale tylko dla umiarkowanych naprężeń. Po przekroczeniu około 10[kPa] wewnętrzna struktura stabilizowana przez modyfikator ulega dezintegracji a to powoduje, że współczynnik w_d jest bliski zeru, por. rys.2.3.7.

Na kolejnych rysunkach zaprezentowano wykresy współczynnika odkształcenia trwałego w funkcji temperatury uzyskane dla ustalonych poziomów naprężenia ścinania. Funkcje te dla lepiszczy nie poddanych modyfikacji są funkcjami malejącymi wraz z przyrostem temperatury, por. rys. 2.3.8-2.3.13. W przypadku lepiszczy modyfikowanych dla zakresu naprężeń od 0.1 do 10kPa funkcje te mają charakter bardziej złożony (np. rosnąco-malejące itp.). Dopiero po przekroczeniu naprężenia 10kPa także w przypadku lepiszczy modyfikowanych wraz ze wzrostem temperatury współczynniki deformacji maleją.

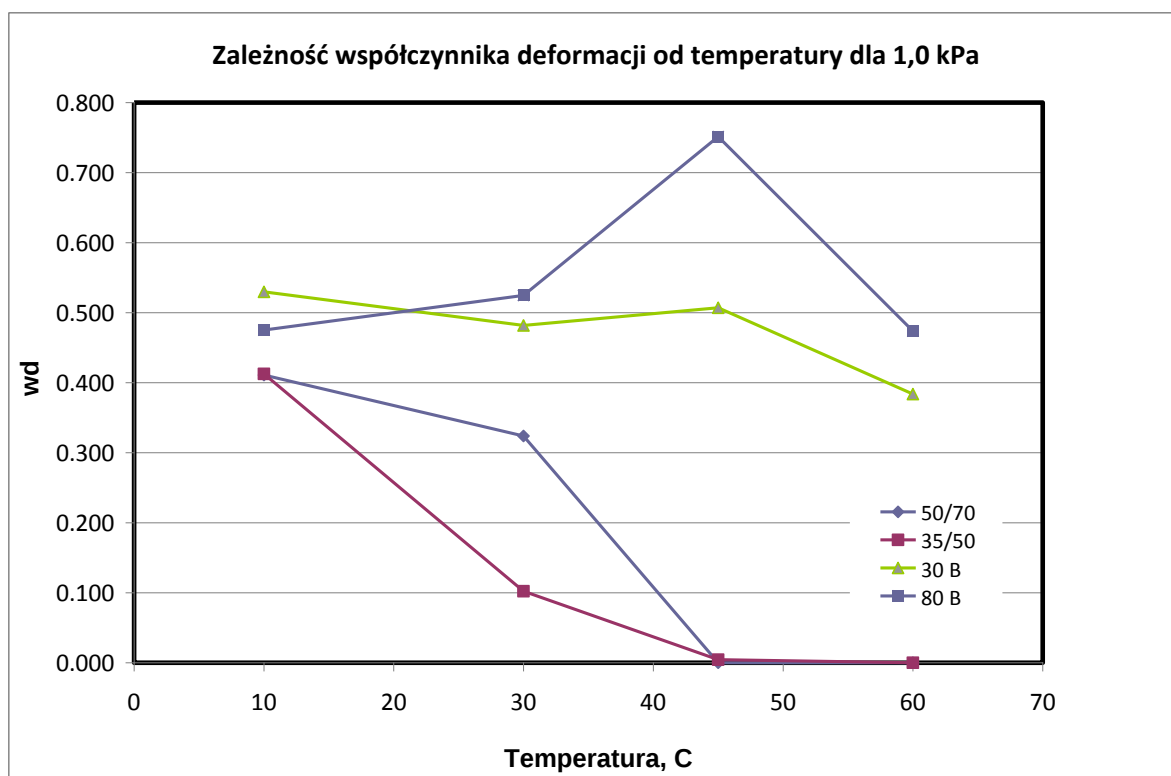


Rys.2.3.8. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji temperatury uzyskany dla naprężenia ścinania $\tau_o = 0.1$ [kPa]

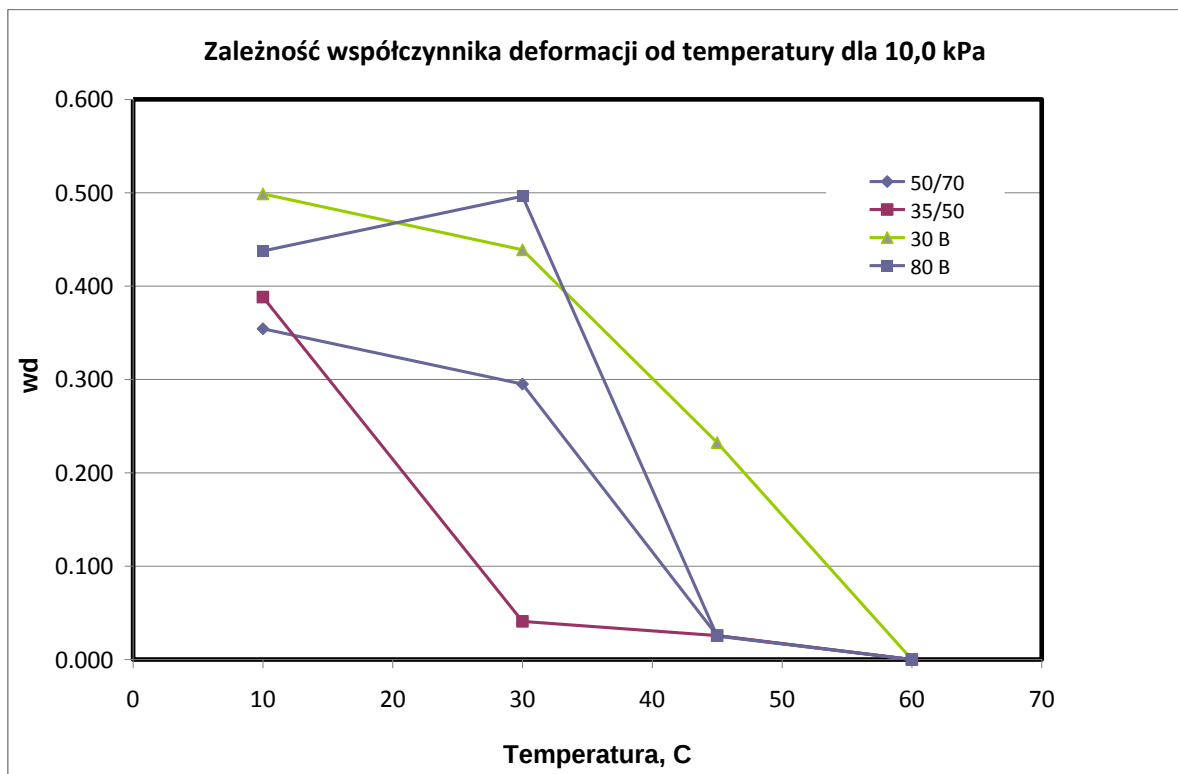
Na rys.2.3.8-2.3.10 widać wyraźną przewagę lepiszcza 80B nad lepiszczem 30B po przekroczeniu temperatury 20 stopni Celsjusza. Dopiero dla naprężeń przekraczających 1kPa w całym zakresie temperatur lepiszcze 30B ma wyższy współczynnik w_d od lepiszcza 80B.



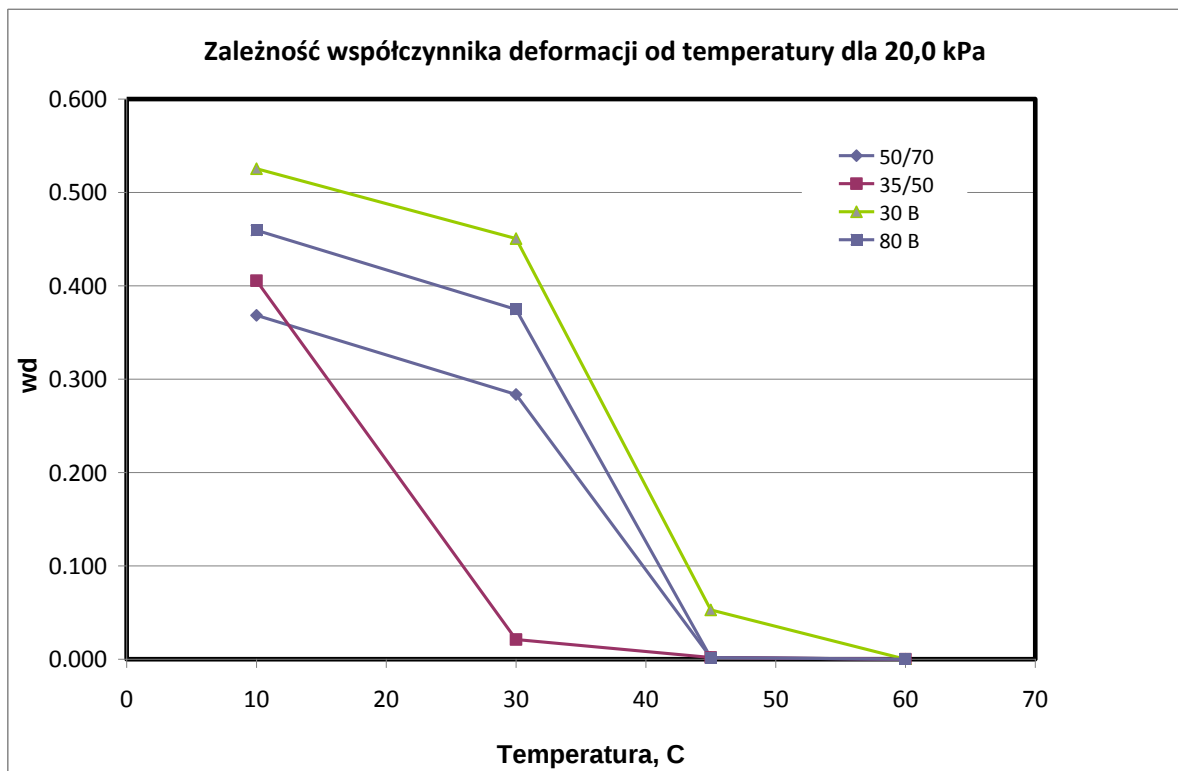
Rys. 2.3.9. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji temperatury uzyskany dla naprężenia ścinania $\tau_o = 0.5[\text{kPa}]$



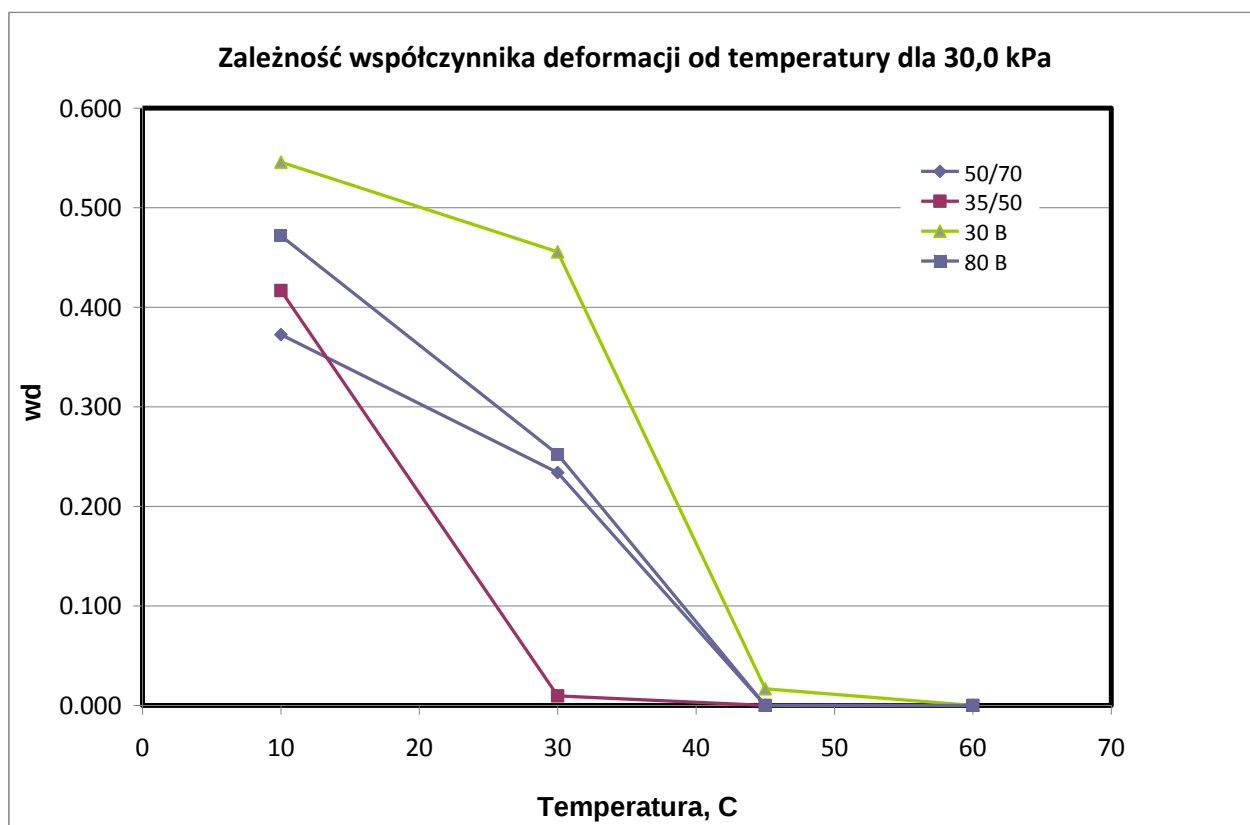
Rys. 2.3.10. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji temperatury uzyskany dla naprężenia ścinania $\tau_o = 1[\text{kPa}]$



Rys. 2.3.11. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji temperatury uzyskany dla naprężenia ścinania $\tau_o = 10[\text{kPa}]$



Rys. 2.3.12. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji temperatury uzyskany dla naprężenia ścinania $\tau_o = 20[\text{kPa}]$



Rys. 2.3.13. Współczynnik odkształcenia trwałego w funkcji temperatury uzyskany dla naprężenia ścinania $\tau_o = 30[\text{kPa}]$

W ogólności funkcja $w_d(T, \tau_o)$ ma maksimum:

- dla lepiszcza 80B przy $T = 45[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1[\text{kPa}]$, które jest bliskie 0.75,
- dla lepiszcza 30B przy $T = 10[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$, które przekracza 0.55,
- dla lepiszcza 35/50 przy $T = 10[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$, które jest bliskie 0.4,
- dla lepiszcza 50/70 przy $T = 10[^\circ\text{C}]$ i $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$, które przekracza 0.4.

Wobec tego można przypuszczać, że dla większości asfaltów badanie POP powinno się przeprowadzać w temperaturze $T = 10[^\circ\text{C}]$ przy $\tau_o = 1.0[\text{kPa}]$. Jeżeli jednak przyjąć tę zasadę to lepiszcze 80B zostałyby sklasyfikowane poniżej lepiszcza 30B, por. rys.2.3.10.

3. Badania mieszanek mineralno-asfaltowych

3.1. Metodyka

3.1.1. Zawartość wolnych przestrzeni

Badanie gęstości i gęstości objętościowej metodą B (dawniej gęstości objętościowej i strukturalnej) wykonano wg PN-EN 12697-5 i 6 [1], [2]. Wolną przestrzeń P_p , w zagęszczonej mieszance mineralno-asfaltowej obliczono wg (3.1):

$$P_p = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \cdot 100, \quad \% (V/V) \quad (3.1)$$

ρ - gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm³,

ρ_0 - gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm³.

Zagęszczenie sprawdzono na próbkach sporządzonych w ubijaku Marshalla stosując 2 x 50 uderzeń na stronę.

3.1.2. Odporność na koleinowanie (duży koleinomierz - DK)

Określanie odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe przy pomocy aparatu LCPC (zwanego w normie PN-EN 12697-22 [3] aparatem dużym) polega na poddaniu zagęszczonej próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej wielokrotnym przejazdowi znormalizowanego koła ogumionego, w znormalizowanych warunkach temperatury, nacisku i liczby przejazdów koła po próbce. Po zakończeniu badania jest mierzona głębokość koleiny utworzonej na próbce przez koło.

Warunki badania:

- długość przejazdu koła 410 mm ± 5 mm,
- częstotliwość ruchu koła: 1 Hz ± 0,1 Hz,
- ciśnienie w oponie: 6 ± 0,1 bar (na początku badania),
- obciążenie ruchome 5000 ± 50 N, pomierzone statycznie na środku próbki, odchylenie osi śladu od osi teoretycznej próbki < 5 mm,
- brak kąta załomu,
- temperatura badania + 60 ± 0,2 °C,
- liczba cykli obciążających kołem wynosi 30 000.

Do badania przygotowuje się dwie próbki o wymiarach (dł. 500 mm * szer. 180 mm * wys. 50 mm lub 100 mm). Formy z próbkami umieszcza się na płycie aparatu. Próbkę poddaje się 1000 cyklom wstępnego obciążenia ruchomego, w temperaturze zawartej pomiędzy 15 a 25 °C. Po wstępnej fazie dostosowania, wykonuje się pomiar zerowy m_{ij}^0 ($j = 1 \div 15$) zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.3.1.1. Dokonuje się ustawienia temperatury pomiaru w komorze na + 60 °C mierzonej w otworze wywierconym w próbce. Próbka jest przechowywana w tych warunkach, co najmniej przez 12 h przed wykonaniem badania. Następnie próbkę obciąża się obciążeniem ruchomym od kół. Po zatrzymaniu koła odczytuje się wartość temperatury próbki. Następnie wykonuje się pomiary głębokości koleiny m_{ij} , w punktach i w kolejności zaznaczonej na rys.3.1.1. Dla każdej próbki wykonuje się pomiary w pięciu przekrojach, po trzy odczyty.

3.1.3. Odporność na koleinowanie (mały koleinomierz - MK)

Mały koleinomierz wykorzystywany jest do oceny odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe. Badanie przeprowadza się zgodnie z normą PN-EN 12697-22. Odpowiednio obciążone koło, z gumową oponą, porusza się cyklicznie po próbce z mieszanki mineralno-asfaltowej z określoną prędkością. W komorze utrzymywana jest zadana temperatura (np. 45°C lub 60°C). Próbkę poddane badaniom mogą być przygotowane w zagęszczarce walcowej i mieć kształt płyty o wymiarach 260 na 320 mm oraz grubości od 30 do 120 mm, ewentualnie mogą być odwierconymi rdzeniami o średnicy 200 mm. Podczas typowego badania koło dociskane jest do próbki z siłą 700 ± 10 N, a przyrost koleiny jest stale monitorowany, za pomocą elektromagnetycznego czujnika w 35 punktach z dokładnością do 0,01 mm. Badanie przeprowadza się jednocześnie na dwóch próbkach. Na poniższej fotografii przedstawiono aparat do koleinowania użyty w poniższych badaniach.



Rys. 3.1.3. Mały koleinomierz w IBDiM (MK)

3.2. Mieszanki mineralno-asfaltowe, recepty, oznakowanie

Mieszanka SMA 11 została zaprojektowana wg wymagań WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe–2008^[4] do warstwy ścieralnej kategorii ruchu KR3-KR6. Do wykonania mieszanki SMA 11 zastosowano następujące materiały składowe:

- Asfalty (35/50, 50/70, DE30B, DE80B)
- Mączka wapienna
- Granit 0/2 [mm]
- Bazalt 2/5, 5/8, 8/11 [mm]
- Środek adhezyjny: Wetfix BE
- Dodatek stabilizujący: ARBOCEL

Do badań przewidziano mieszankę mineralno-asfaltową SMA11, o takim samym składzie mineralnym, z taką samą zawartością lepiszcza i odpowiednio z różnymi asfaltami (35/50, 50/70, Modbit 30B, Modbit 80B, por. pkt.2). Poszczególne mieszanki zostały oznakowane wg poniższego opisu, tj.:

SMA11 (35/50)	SMA11 z asfaltem 35/50 z produkcji Orlen Asfalt z Płocka,
SMA11 (50/70)	SMA11 z asfaltem 50/70 z produkcji Lotos Asfalt z Gdańska,
SMA11 (30B)	SMA11 z asfaltem modyfikowanym Modbit 30B z Lotos Asfalt z Gdańska,
SMA11 (80B)	SMA11 z asfaltem modyfikowanym Modbit 80B z Lotos Asfalt z Gdańska.

3.3. Mieszanki mineralno-asfaltowe (projekt, podstawowe właściwości)

W celu sprawdzenia wpływu lepiszcza na odporność mieszanki mineralno asfaltowej na koleinowanie zaprojektowano jedną mieszankę, w której zmienia się tylko lepiszcze. Mieszanka ta nie ma charakteru „doświadczalnego”, ale spełnia wszystkie wymagania techniczne stawiane przed mieszanką, z której wykonuje się warstwę ścieralną na drogach o kategorii ruchu KR5 i KR6.

3.3.1. Projekt mieszanki

Mieszanka SMA 11 (KR5 - KR6)

o uziarnieniu 0/11 mm do wykonania warstwy ścieralnej

A. Informacje ogólne

Przeznaczenie: temat badawczy TN-245, KR5-KR6
Podstawa projektu: WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe 2008

Tab.3.3.1. Składniki mieszanki

Lp.	Symbol	Rodzaj
1	Mączka wapienna	wypełniacz
2	Granit 0/2 mm (I)	kr. dr. gran.
3	Bazalt 2/5 mm	Grys
4	Bazalt 5/8 mm	Grys
5	Bazalt 8/11 mm	Grys
6	Asfalt (zamiennik)	(35/50, 50/70, Modbit 30B, Modbit 80B)
7	WETFIX BE	Środek adhezyjny Akzo Nobel
8	ARBOCEL ZZ8/1	Włókna celulozowe

B. Uziarnienie materiałów mineralnych

Wymiar oczek sita # [mm]	Mączka wapienna	Granit (I) 0/2 mm	Bazalt 2/5 mm	Bazalt 5/8 mm	Bazalt 8/11 mm
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,6
8	0,0	0,0	0,0	3,3	68,7
5,6	0,0	0,0	1,6	71,9	20,5
2	0,0	9,9	94,4	24,3	2,8
0,125	3,20	85,3	3,8	0,3	0,9
0,063	8,90	3,3	0,1	0,1	0,2
<0,063	87,90	1,5	0,1	0,1	0,3
Łącznie	100	100	100	100	100

C. Skład mieszanki mineralnej (MM) i mineralno-asfaltowej (MMA)

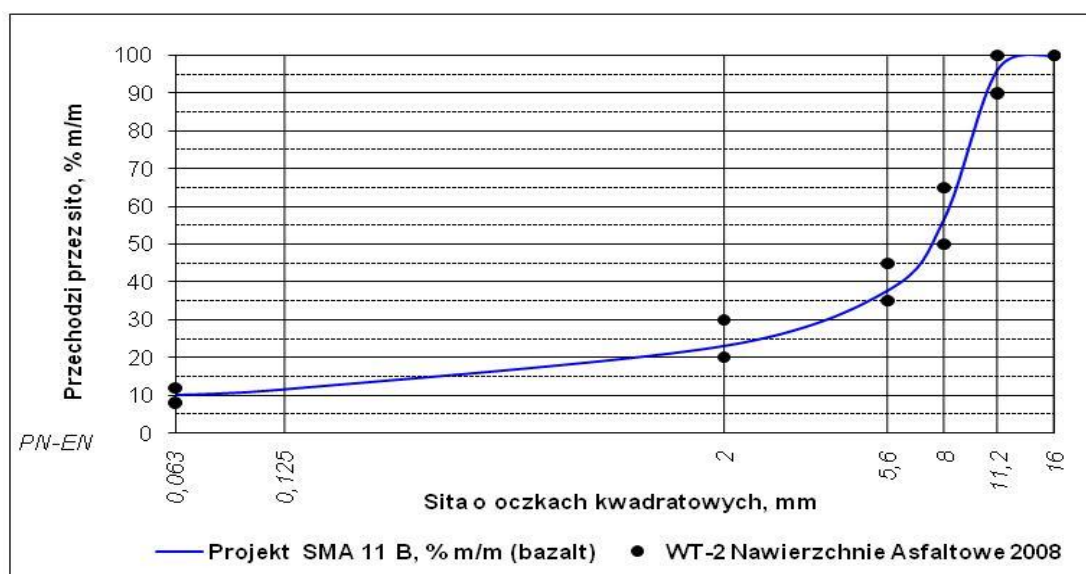
Lp.	Składniki	Mieszanka mineralna % m/m	Mieszanka mineralno- asfaltowa, % m/m
1	Mączka wapienna	11,0	10,16
2	Granit 0/2 mm	12,0	11,3
3	Bazalt 2/5 mm	10,0	9,42
4	Bazalt 5/8 mm	19,0	9,42
5	Bazalt 8/11 mm	57,0	53,7
6	Modbit 80B	-	5,78
7	WETFIX BE	-	0,02
	Razem	100,0	100

W mieszance zastosowano środek adhezyjny: WETFIX BE (0,3 % m/m w stosunku do asfaltu) oraz stabilizator Arbocel ZZ8/1 (0,2 % m/m w stosunku do MM)

D. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito #, mm	Pozostaje na sicie, (%)	Przechodzi przez sito, (%)	Uziarnienie MM wg WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe 2008 wobec SMA 11	
			od	do
16,0	-	100	100	100
11,2	3,76	96,24	90	100
8	39,49	56,75	50	65
5,6	19,04	37,71	35	45
2	14,65	23,06	20	30
0,125	11,51	11,55	-	-
0,063	1,51	10,04	8	12
< 0,063	10,04	-	-	-
	100			

E. Krzywa uziarnienia i uziarnienie mieszanki mineralnej



Rys.3.3.1. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej SMA11 przeznaczonej do warstwy ścieralnej

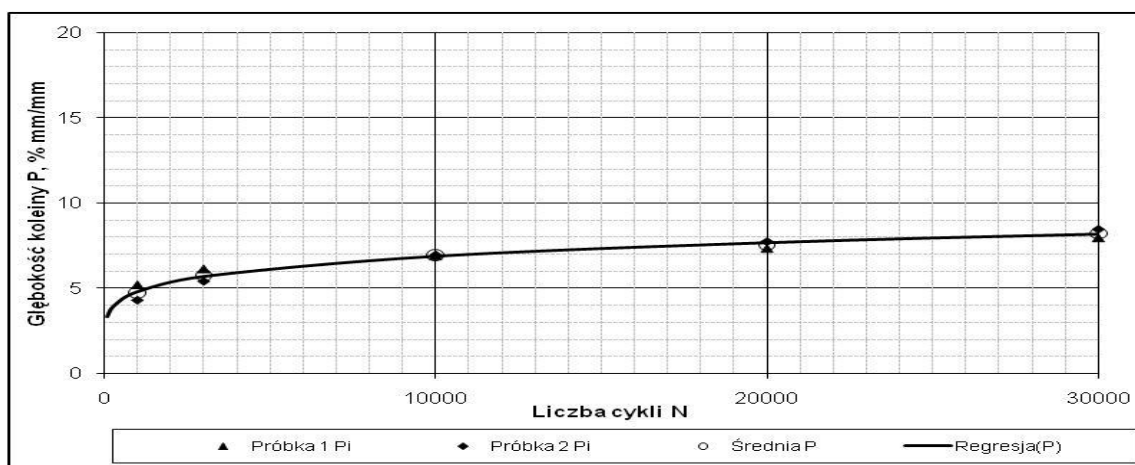
F. Zbadane właściwości mieszanki SMA 11, o składzie optymalnym zawartość asfaltu $A_m=5,8$ % m/m

Lp.	Właściwości	Wyniki				Wymagania wg WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe 2008
		SMA 11 (35/50)	SMA 11 (50/70)	SMA 11 (30B)	SMA 11 (80B)	
1	Gęstość mieszanki-mineralnej, g/cm ³	2,94	2,94	2,94	2,94	-
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,653	2,652	2,644	2,660	-
3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,567	2,570	2,565	2,579	-
4	Zawartość wolnych przestrzeni, % v/v	3,2	3,1	3,0	3,0	V_{min} 3,0 V_{max} 4,0
5	Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	81,8	82,4	83,1	82,8	-
6	Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli)	0,45	-	0,05	0,05	WTS_{AIR} 0,30
		15,2	28,8	4,8	5,7	PRD_{AIR} 5,0
7	Odporność na deformacje trwałe	8,2	8,4	5,4	9,7	

3.3.2. Badanie koleinowania w temperaturze 60°C (duży koleinomierz - DK)

W przypadku MMA zaprojektowanej w pkt.3.3.1 przeprowadzono badania koleinowania w dużym aparacie, por. rys.3.1.2. Na rys.3.3.2-3.3.5 przedstawiono wyniki badań i wykresy głębokości koleiny w funkcji liczby cykli z przebiegu badania koleinowania płyt wykonanych z MMA odpowiednio z lepiszczem 35/50, 50/70, 30B i 80B.

• Mieszanka SMA11 (35/50)

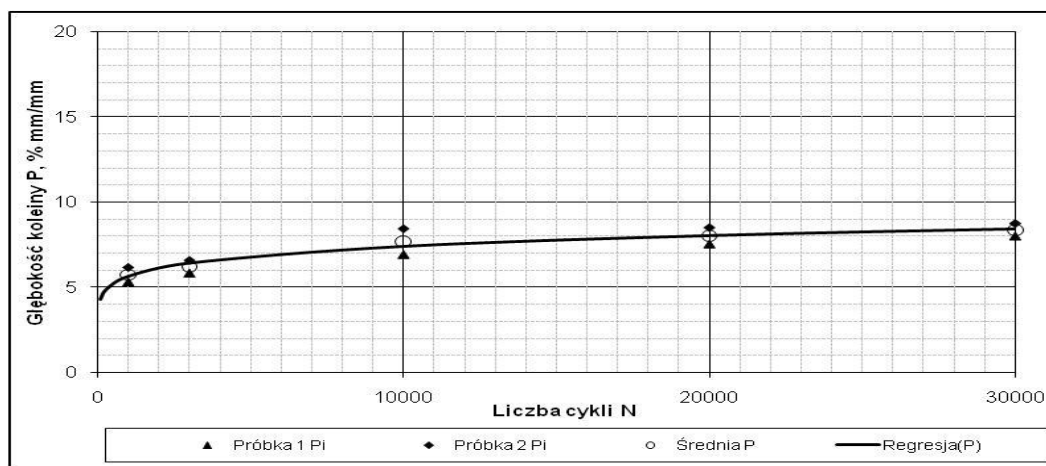


Rys.3.3.2. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (35/50)

Tab.3.3.2. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (35/50) w dużym aparacie

Liczba cykli N	Wyniki koleinowania w 60°C w aparacie LCPC, % (mm/mm)				
	Mieszanka SMA11 (35/50), gr. warstwy 5,0 cm				
	1000	3000	10000	20000	30000
Próbka 1, Pi	5,2 %	6,1 %	6,9 %	7,3 %	8,0 %
Próbka 2, Pi	4,3 %	5,4 %	7,0 %	7,7 %	8,5 %
Średnia, P	4,8 %	5,8 %	6,9 %	7,5 %	8,2 %

• Mieszanka SMA11 (50/70)

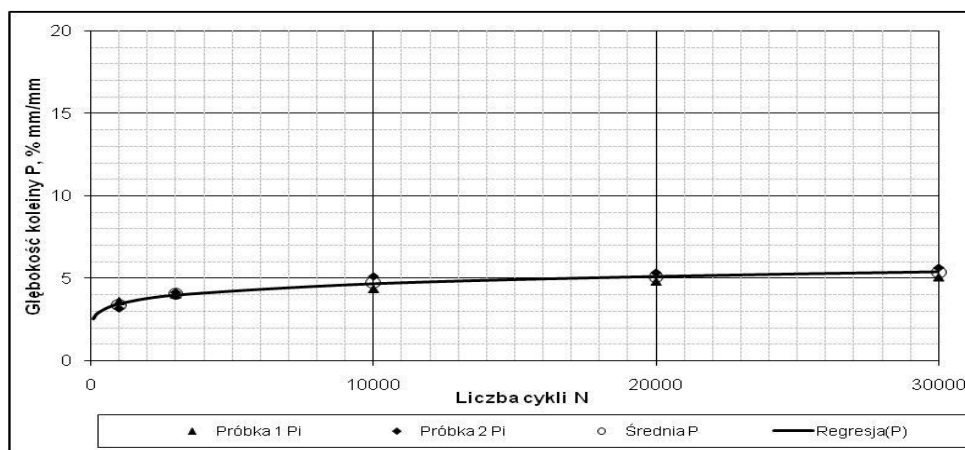


Rys.3.3.3. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (50/70)

Tab.3.3.3. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (50/70) w dużym aparacie

Liczba cykli N	Wyniki koleinowania w 60°C w aparacie LCPC, % (mm/mm)				
	Mieszanka SMA11 (50/70), gr. warstwy 5,0 cm				
	1000	3000	10000	20000	30000
Próbka 1, Pi	5,3 %	5,8 %	6,9 %	7,5 %	8,0 %
Próbka 2, Pi	6,2 %	6,6 %	8,4 %	8,5 %	8,7 %
Średnia, P	5,7 %	6,2 %	7,7 %	8,0 %	8,4 %

• Mieszanka SMA11 (30B)

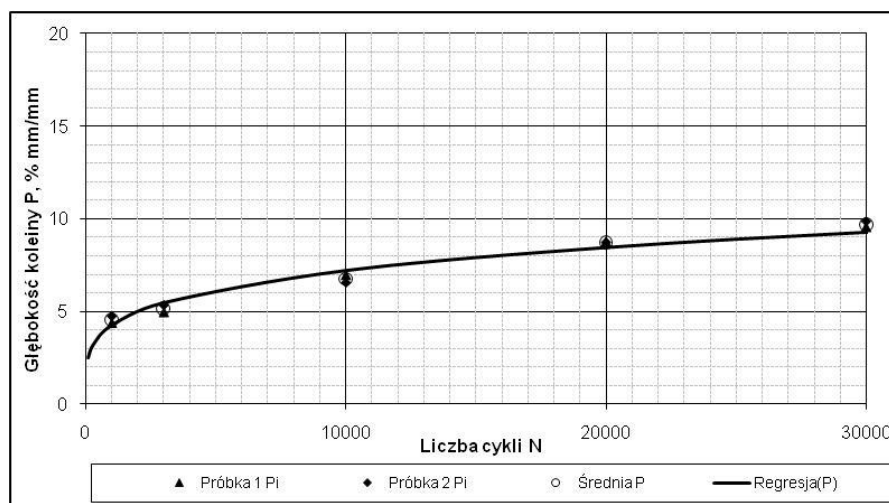


Rys.3.3.4. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (30B)

Tab.3.3.4. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (30B) w dużym aparacie

Liczba cykli N	Wyniki koleinowania w 60°C w aparacie LCPC, % (mm/mm)				
	Mieszanka SMA11 (30B), gr. warstwy 5,0 cm				
	1000	3000	10000	20000	30000
Próbka 1, Pi	3,6 %	4,0 %	4,4 %	4,8 %	5,1 %
Próbka 2, Pi	3,2 %	4,1 %	5,1 %	5,3 %	5,6 %
Średnia, P	3,4 %	4,1 %	4,7 %	5,1 %	5,4 %

• Mieszanka SMA11 (80B)



Rys.3.3.5. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (80B)

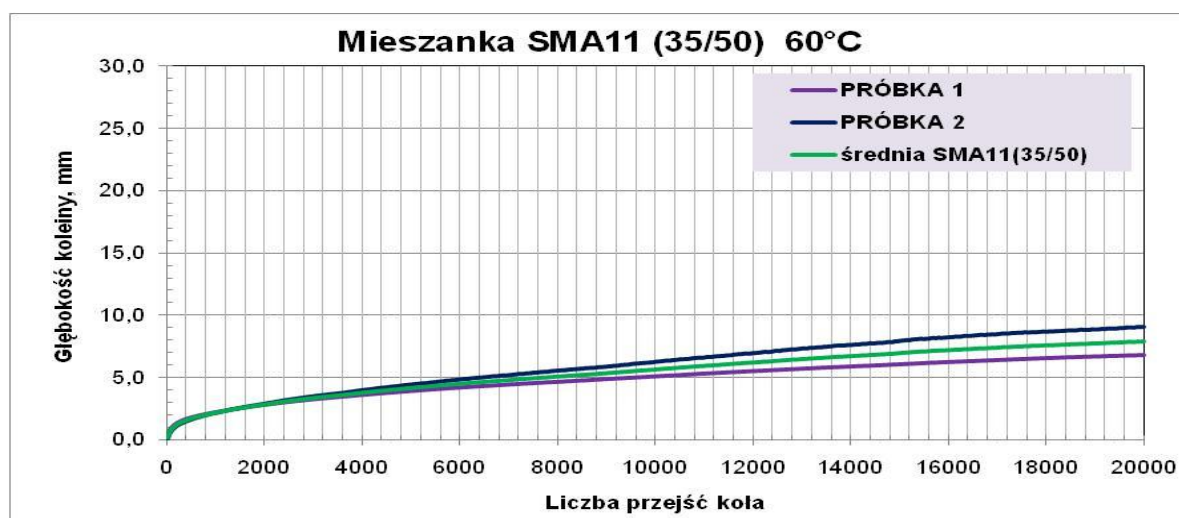
Tab.3.3.5. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (80B) w dużym aparacie

Liczba cykli N	Wyniki koleinowania w 60°C w aparacie LCPC, % (mm/mm)				
	Mieszanka SMA11 (80B), gr. warstwy 5,0 cm				
	1000	3000	10000	20000	30000
Próbka 1, Pi	4,4 %	5,0 %	7,0 %	8,7 %	9,5 %
Próbka 2, Pi	4,7 %	5,3 %	6,5 %	8,7 %	9,9 %
Średnia, P	4,6 %	5,1 %	6,8 %	8,7 %	9,7 %

3.3.3. Badanie koleinowania w temperaturze 60°C (mały koleinomierz - MK)

W przypadku MMA zaprojektowanej w pkt.3.3.1 przeprowadzono badania koleinowania w małym aparacie, por. rys.3.1.3. Na rys.3.3.6÷3.3.9 przedstawiono wyniki badań i wykres z przebiegu badania koleinowania płyt wykonanych z MMA odpowiednio z lepiszczem 35/50, 50/70, 30B i 80B.

• Mieszanka SMA11 (35/50)

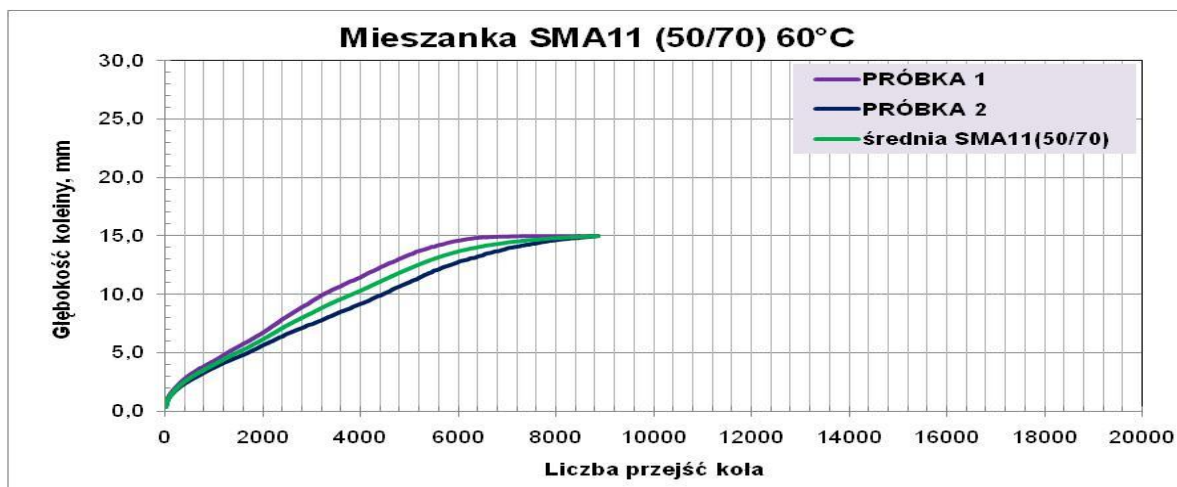


Rys.3.3.6. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (35/50)

Tab.3.3.6. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (35/50) w małym aparacie

Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) SMA 11 (35/50) (wys. próbek 52 mm)			
Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Właściwości			
Głębokość koleiny, mm	4,2	5,67	7,92
PRD, %	8,0	10,9	15,2
WTS _(d10000-d5000) , [mm/1000 cykli]			0,45

• Mieszanka SMA11 (50/70)

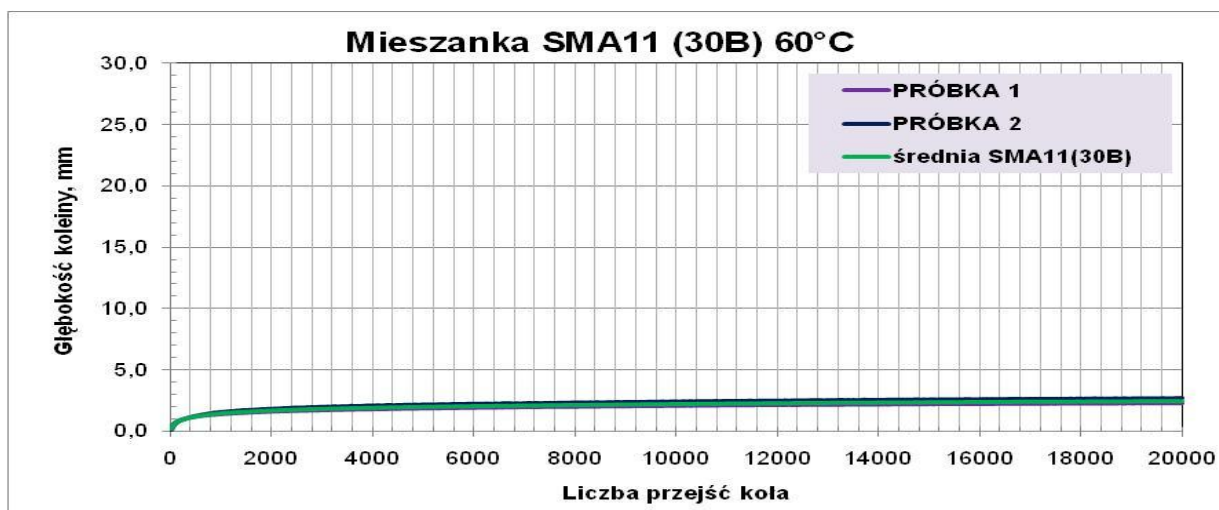


Rys.3.3.7. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (50/70)

Tab.3.3.7. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (50/70) w małym aparacie

Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) SMA11 (50/70) (wys. próbek 52 mm)		
Cykle (przejścia)	2500 (5000)	8850 (4425)
Właściwości		
Głębokość koleiny, mm	12,2	15,0
PRD, %	23,5	28,8
WTS _(d10000-d5000) , [mm/1000 cykli]		0,56

• Mieszanka SMA11 (30B)

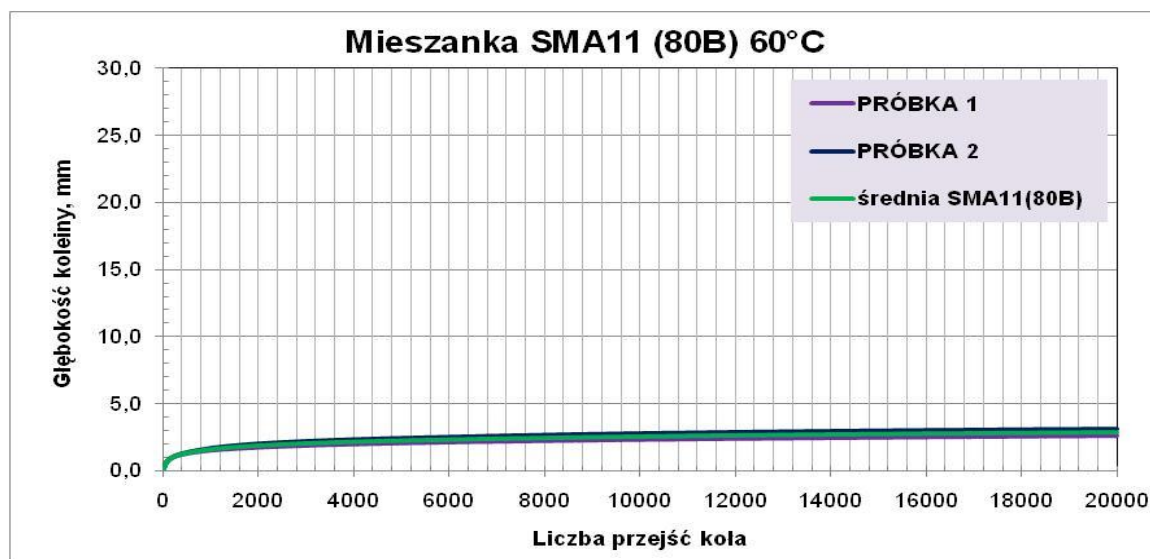


Rys.3.3.8. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (30B)

Tab.3.3.8. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (30B) w małym aparacie

Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) SMA11 (30B) (wys. próbek 52 mm)			
Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Właściwości			
Głębokość koleiny, mm	2,0	2,24	2,48
PRD, %	3,9	4,3	4,8
WTS _(d10000-d5000) , [mm/1000 cykli]			0,05

• Mieszanka SMA11 (80B)



Rys.3.3.9. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (80B)

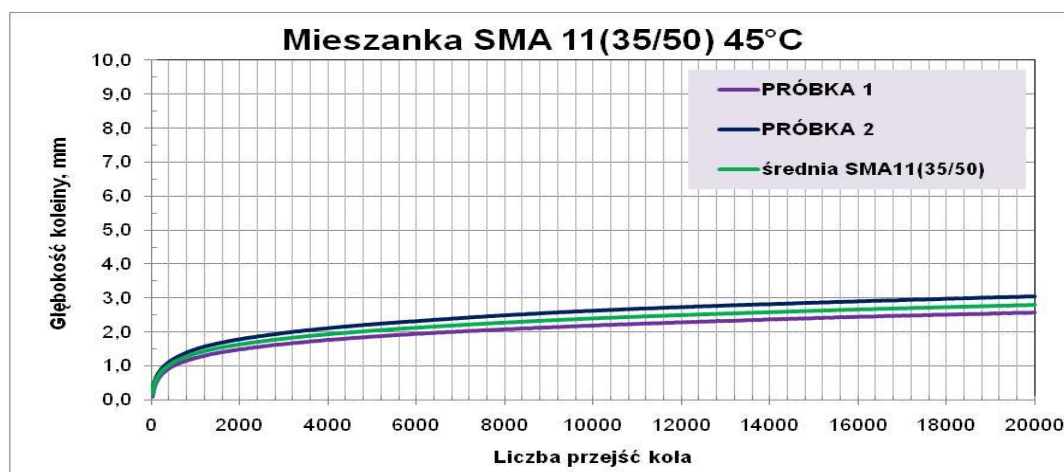
Tab.3.3.9. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (80B) w małym aparacie

Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) SMA11 (80B) (wys. próbek 51 mm)			
Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Właściwości			
Głębokość koleiny, mm	2,3	2,59	2,91
PRD, %	4,4	5,0	5,6
WTS _(d10000-d5000) , [mm/1000 cykli]			0,06

3.3.4. Badanie koleinowania w temperaturze 45°C (mały koleinomierz - MK)

W przypadku MMA zaprojektowanej w pkt.3.3.1 przeprowadzono badania koleinowania w małym aparacie, por. rys.3.1.3. Na rys.3.3.10÷3.3.13 przedstawiono wyniki badań i wykres z przebiegu badania koleinowania płyt wykonanych z MMA odpowiednio z lepiszczem 35/50, 50/70, 30B i 80B.

• Mieszanka SMA11 (35/50)

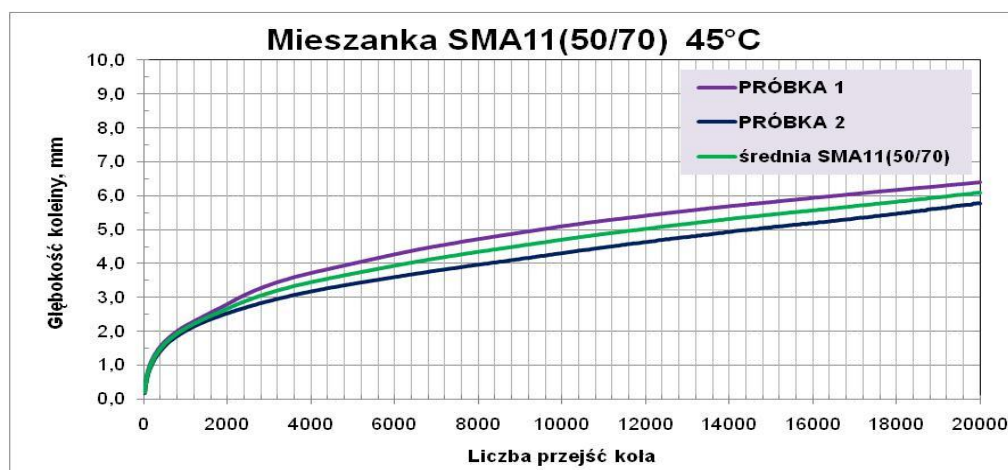


Rys.3.3.10. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (35/50)

Tab.3.3.10. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (35/50) w małym aparacie

Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) SMA11 (35/50) (wys. próbek 51 mm)			
Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Właściwości			
Głębokość koleiny, mm	2,05	2,41	2,81
PRD, %	4,0	4,7	5,5
WTS _(d10000-d5000) , [mm/1000 cykli]			0,08

• Mieszanka SMA11 (50/70)

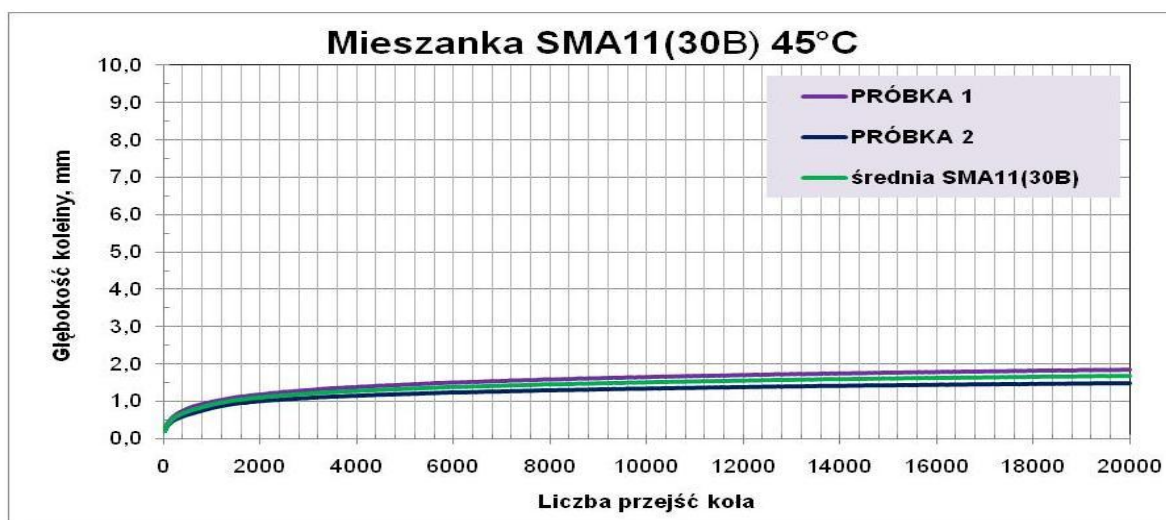


Rys.3.3.11. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (50/70)

Tab.3.3.11. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (50/70) w małym aparacie

Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) SMA 11(50/70) (wys. próbek 51 mm)			
Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Właściwości			
Głębokość koleiny, mm	3,70	4,70	6,08
PRD, %	7,3	9,2	11,9
WTS_(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]			0,28

• Mieszanka SMA11 (30B)

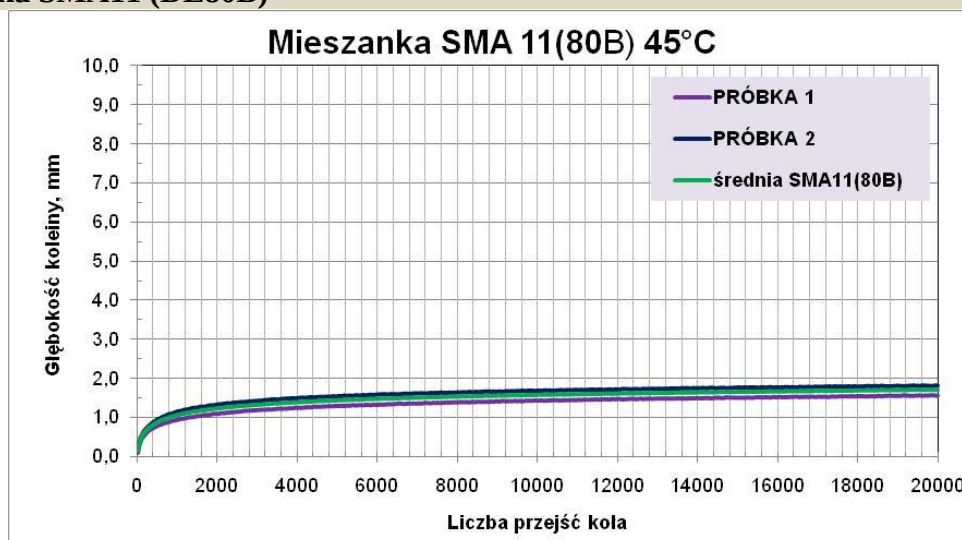


Rys.3.3.12. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (30B)

Tab.3.3.12. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (30B) w małym aparacie

Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) SMA11 (30B) (wys. próbek 52 mm)			
Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Właściwości			
Głębokość koleiny, mm	1,3	1,50	1,67
PRD, %	2,6	2,9	3,2
WTS_(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]			0,03

• Mieszanka SMA11 (DE80B)



Rys.3.3.13. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 (80B)

Tab.3.3.13. Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki SMA11 (80B) w małym aparacie

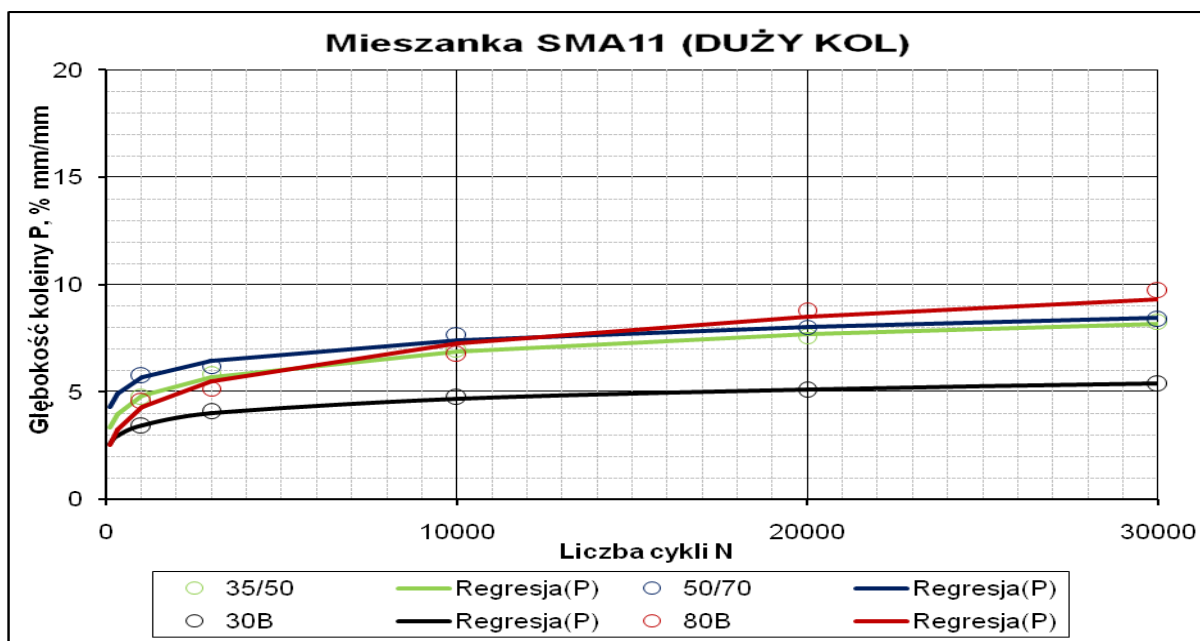
Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm) SMA11 (80B) (wys. próbek 51 mm)			
Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Właściwości			
Głębokość koleiny, mm	1,43	1,57	1,70
PRD, %	1,6	1,7	1,9
WTS _(d10000-d5000) , [mm/1000 cykli]			0,03

3.3.5. Zestawienie zbiorcze z badań koleinowania w temperaturze 60°C – koleinomierz duży

Tab.3.3.14. Zbiorcze zestawienie wyników badania koleinowania w aparacie LCPC

60°C

Liczba cykli N	Wyniki koleinowania w 60°C w aparacie LCPC, % (mm/mm) Mieszanka SMA11			
	35/50	50/70*	Modbit 30B	Modbit 80B
10000	6,9	7,7	4,7	6,8
30000	8,2	8,4	5,4	9,7



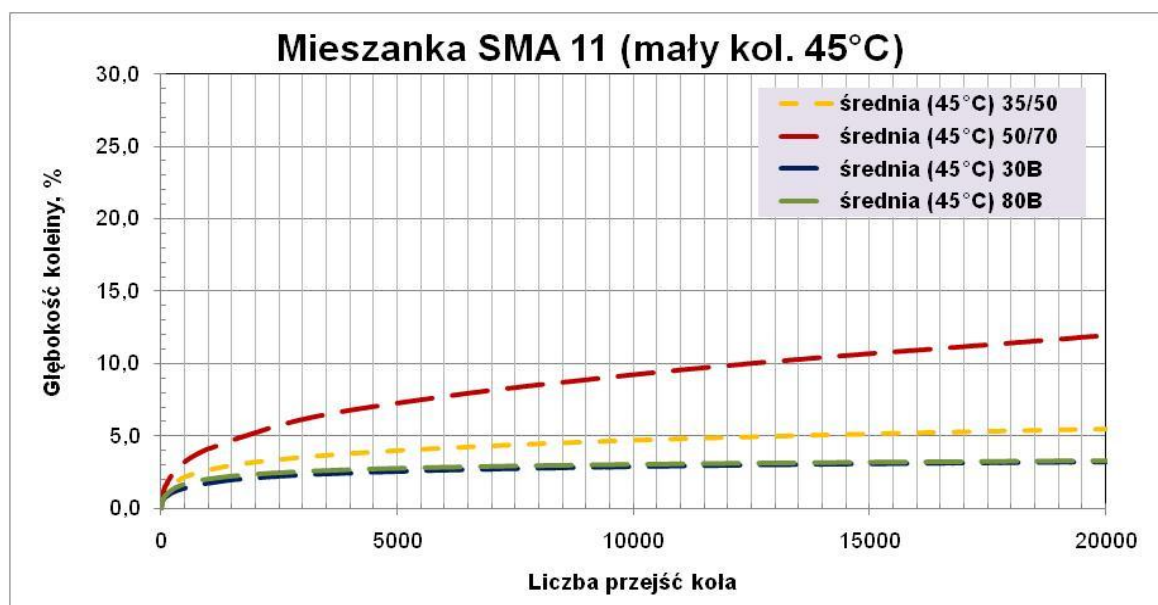
Rys.3.3.14. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 60°C w dużym koleinomierzu

Na podstawie wykresów zamieszczonych na rys.3.3.14 bez wątpienia można uszeregować mieszanki z lepiszczem 30B, 35/50 i 50/70 (od najlepszej do najgorszej) pod względem ich odporności na koleinowanie w aparacie LCPC w całym zakresie liczby cykli. W przypadku mieszanki z lepiszczem 80B jej położenie w rankingu zmienia się w funkcji liczby cykli. Po przekroczeniu 20000 cykli koleina w płycie wykonanej z mieszanki z lepiszczem 80B jest największa. Wynik tego badania jest dość zaskakujący, zwłaszcza gdy go porównamy z wynikami koleinowania w małym aparacie, gdzie ranking mieszanek z badanymi lepiszczami nie zmienia się w funkcji liczby cykli. Zagadnienie to jest ciekawe samo w sobie i powinno być przebadane w kontekście stosowania w laboratoriach drogowych tzw. małych albo dużych aparatów do koleinowania.

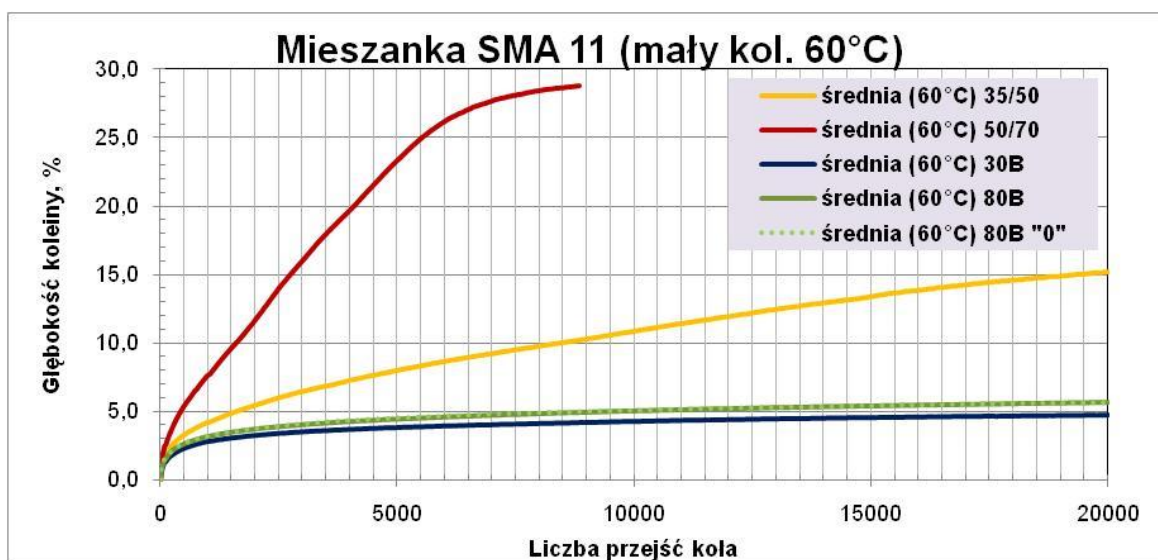
3.3.6. Zestawienie zbiorcze z badań koleinowania w temperaturze 45°C i 60°C – koleinomierz mały

Tab.3.3.15. Zbiorcze zestawienie wyników badania koleinowania w małym aparacie

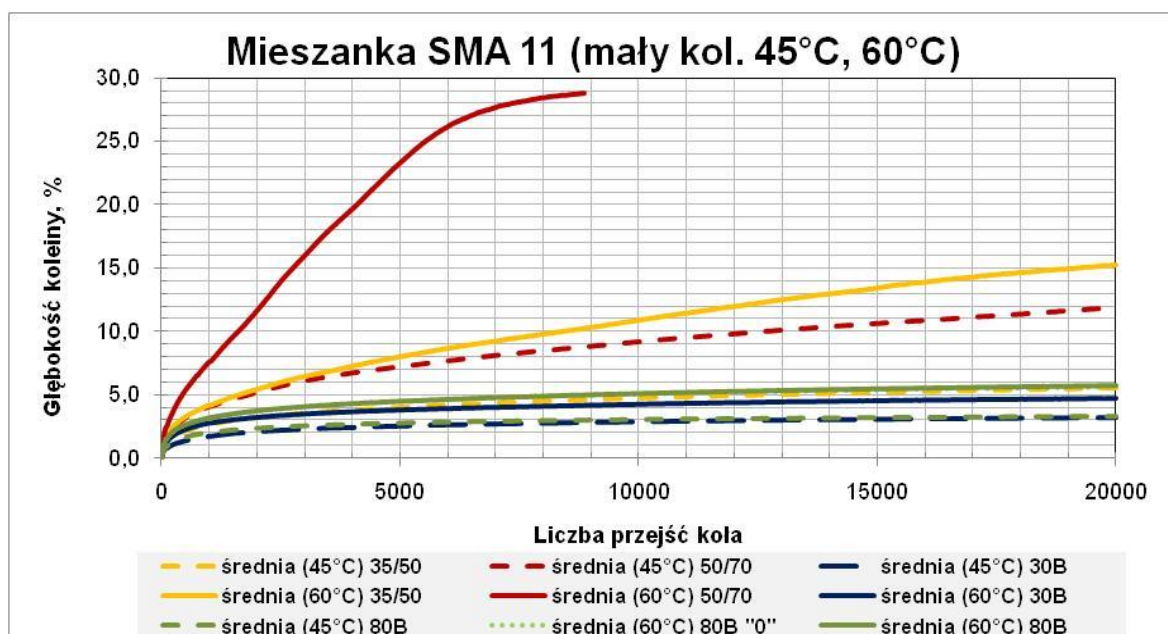
45°C					
Cykle N 10000 (20000)	35/50	50/70	Modbit 30B	Modbit 80B	
Głębokość koleiny, mm	2,81	6,08	1,67	1,70	
PRD, %	5,5	11,8	3,2	3,3	
WTS(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]	0,08	0,28	0,03	0,03	
60°C					
Cykle N 10000 (20000)	35/50	50/70*	Modbit 30B	Modbit 80B (52mm)	Modbit 80B (40mm)
Głębokość koleiny, mm	7,92	15	2,49	2,91	2,27
PRD, %	15,2	28,8	4,8	5,6	5,7
WTS(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]	0,45	0,55	0,05	0,06	0,05



Rys.3.3.15. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 45°C w małym koleinomierzu



Rys.3.3.16. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 60°C w małym koleinomierzu



Rys.3.3.17. Głębokość koleiny w funkcji liczby cykli w przypadku mieszanki SMA11 z lepiszczami 35/50, 50/70, 30B i 80B – badanie w temperaturze 45°C i 60°C w małym koleinomierzu

Analiza wykresów głębokości koleiny w funkcji liczby cykli zamieszczonych na rys.3.15-3.17 uzyskanych w tzw. małym koleinomierzu, pozwala uszeregować mieszanki z badanymi lepiszczami w następującym rankingu: 30B, 80B, 35/50, 50/70 niezależnie od liczby cykli i temperatury badania. W stosunku do badań przeprowadzonych w dużym koleinomierzu widoczne są cztery zasadnicze różnice:

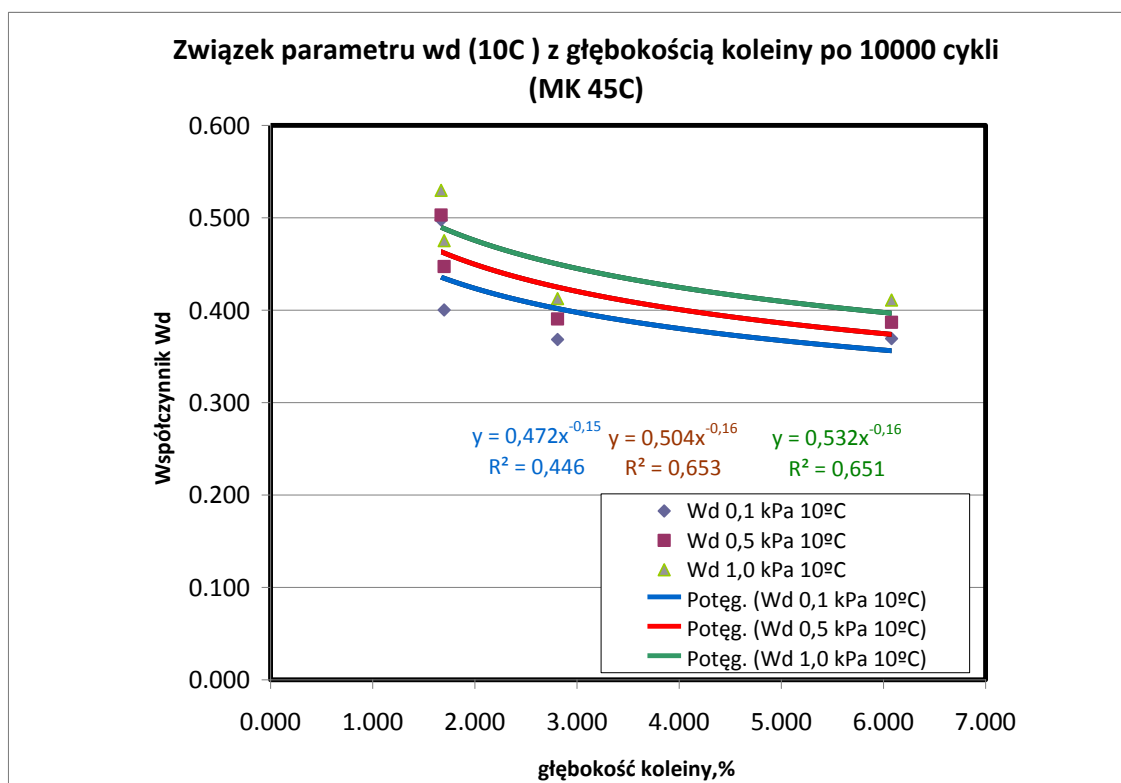
- mieszanka z lepiszczem 80B jest mniej podatna na koleinowanie niż mieszanka z lepiszczem 35/50 zarówno w temperaturze 45°C jak i 60°C,
- w przypadku badań prowadzonych w małym koleinomierzu mamy stały ranking mieszanek niezależnie od liczby cykli,
- mamy bardzo małą różnicę między mieszanką z lepiszczem 80B i 30B w temperaturze 45°C,
- bardzo mała odporność na koleinowanie mieszanki z lepiszczem 50/70 w temperaturze 60°C, w przypadku której nie udało się osiągnąć nawet 10000 cykli.

4. Analiza uzyskanych wyników pod kątem określenia powiązań między badaniem POP a badaniem koleinowania

Podstawowym celem tej pracy jest wskazanie parametru charakteryzującego lepizscze na podstawie którego możliwe byłoby przewidywanie rankingu mieszanek MMA wykonanych przy zastosowaniu danych lepizsczy pod względem ich odporności na deformacje trwałe. Cel ten został osiągnięty, jednak w trakcie realizacji badań pojawił się dodatkowy cel, którego realizacja wydaje się o wiele trudniejsza.

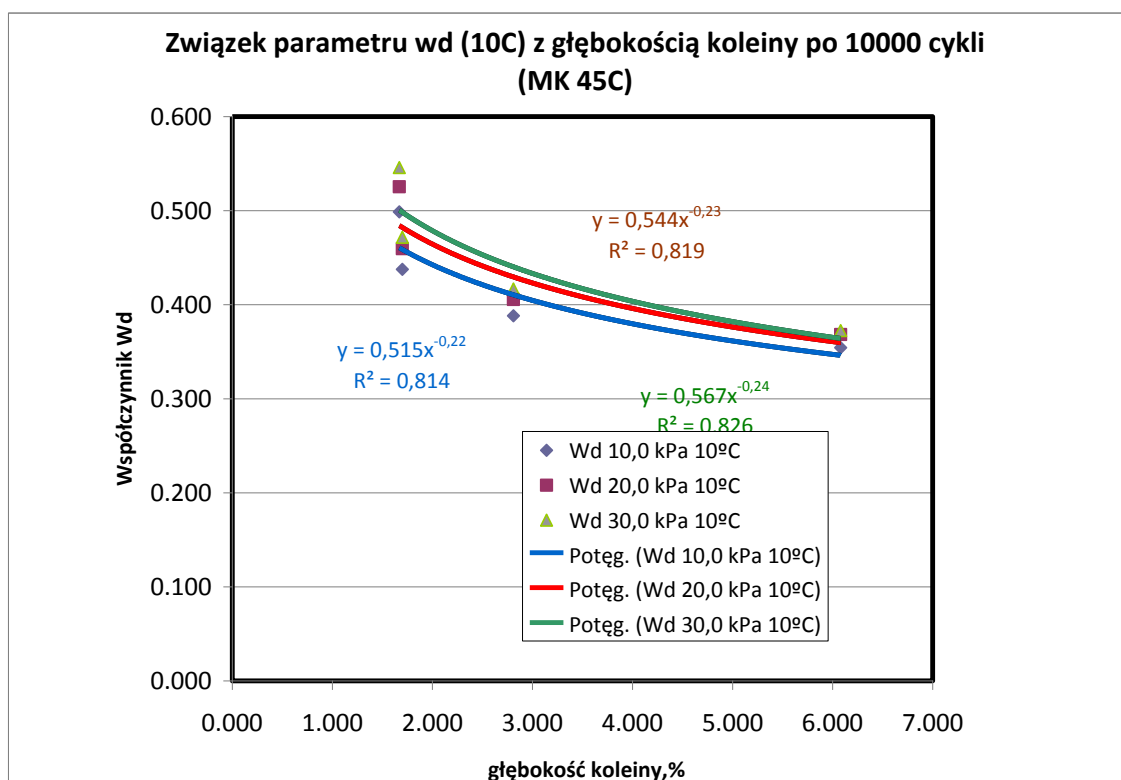
Tym dodatkowym celem jest znalezienie zależności pomiędzy wynikiem proponowanego testu pękania pod obciążeniem powtarzalnym (POP) przeprowadzanego na samym lepizsczu asfaltowym, a badaniem koleinowania przeprowadzanym na płytach wykonanych z mieszanek mineralno asfaltowych z badanymi lepizsczami. Na tym etapie pracy wykonane zostały badania koleinowania w dużym (LCPC) i małym aparacie odpowiednio w temperaturze 60°C w dużym oraz 45°C i 60°C w małym aparacie. Przygotowano receptę na mieszankę SMA11 do warstwy ścieralnej dróg kategorii KR5 i KR6, w której jedyną zmienną był rodzaj użytego lepizscza.

Na rys.4.1 zamieszczono próbę znalezienia korelacji w postaci funkcji potęgowej między parametrem w_d ($\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0$ kPa, $T=10^\circ\text{C}$) a głębokością koleiny po 10000 cykli obciążenia w małym koleinomierzu w temperaturze 45°C. Widać, że kwadrat współczynnika korelacji wynosi najwyżej 0.653 co oznacza, że założona funkcja korelacji nie jest najlepsza (mimo, że ze wszystkich standardowo dostępnych w programie Excel daje najwyższą wartość współczynnika R^2).

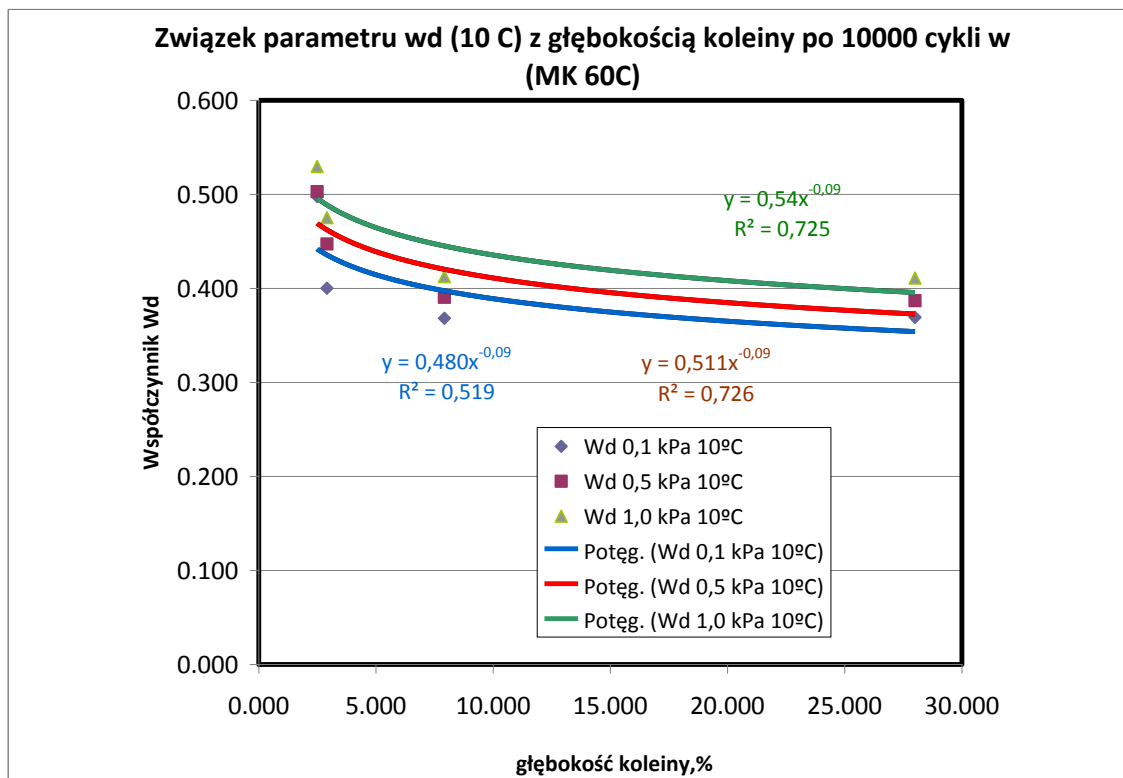


Rys.4.1. Związek parametru w_d ($\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0$ kPa, $T=10^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cyklach obciążenia w małym koleinomierzu w temperaturze 45°C

Należy zauważyć, że przy tym samym modelu funkcji korelacji i tych samych założeniach odnośnie do warunków badania POP i koleinowania w przypadku wyższych poziomów naprężenia w teście POP współczynnik R^2 przyjmuje wyższe wartości (nawet 0.829), por. rys.4.2.



Rys.4.2. Związek parametru w_d ($\tau_o = 10, 20, 30$ kPa , $T=10^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cyklich obciążenia w małym koleinomierzu w temperaturze 45°C

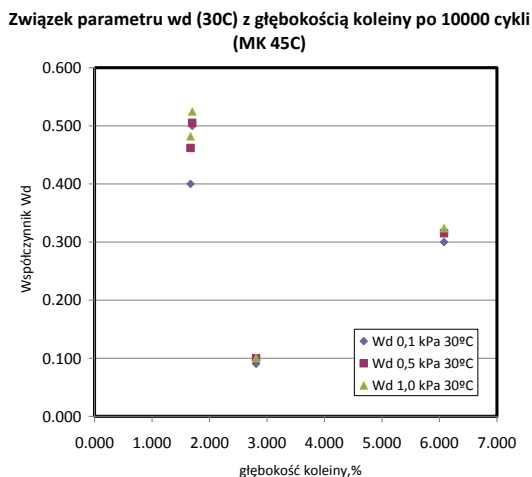


Rys.4.3. Związek parametru w_d ($\tau_o = 0,1, 0,5, 1,0$ kPa , $T=10^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cyklich obciążenia w małym koleinomierzu w temperaturze 60°C

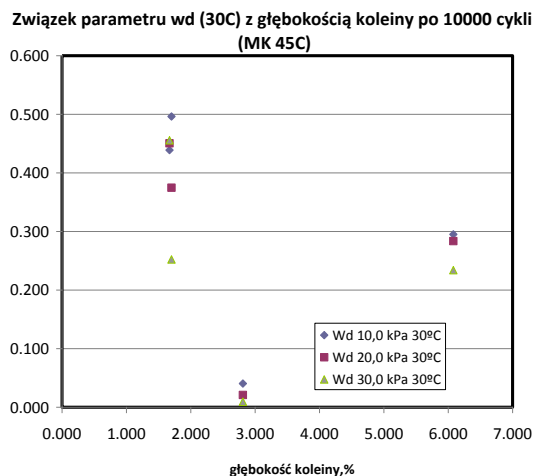
Jeżeli jednak dla tego samego podejścia zmienimy wartość temperatury w teście koleinowania na 60°C to wartości kwadratów współczynnika korelacji nieznacznie spadają dla wszystkich poziomów naprężenia w teście POP, por. rys. 4.3.

Kolejnym parametrem, który może mieć wpływ na poszukiwaną korelację jest temperatura badania POP. Wszystkie powyższe wykresy (rys.4.1-4.3) zostały sporządzone dla temperatury w teście POP równej 10°C. Należy podkreślić, że w wyższych temperaturach, por. rys.4.4 znalezienie żadnej korelacji między danymi nie jest możliwe.

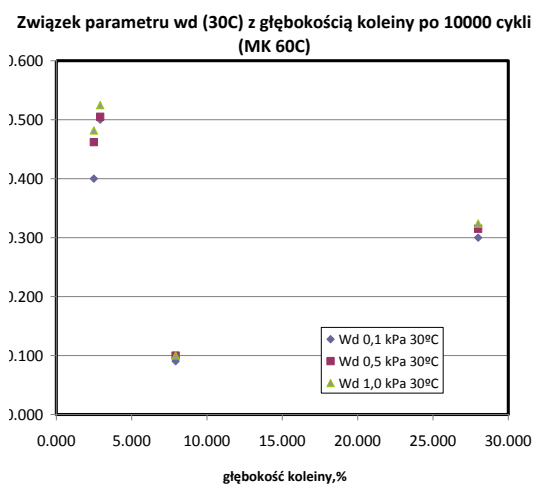
a)



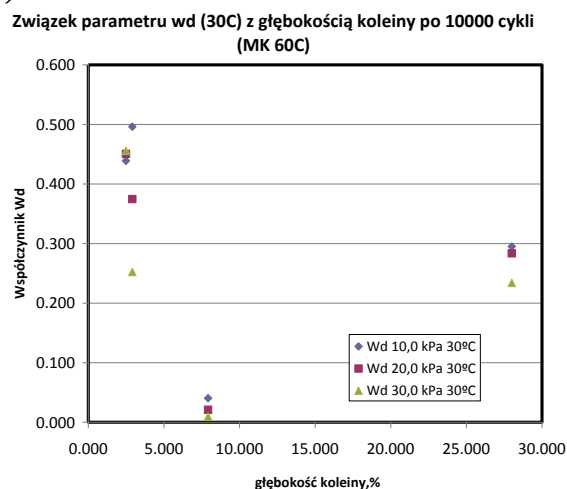
b)



c)

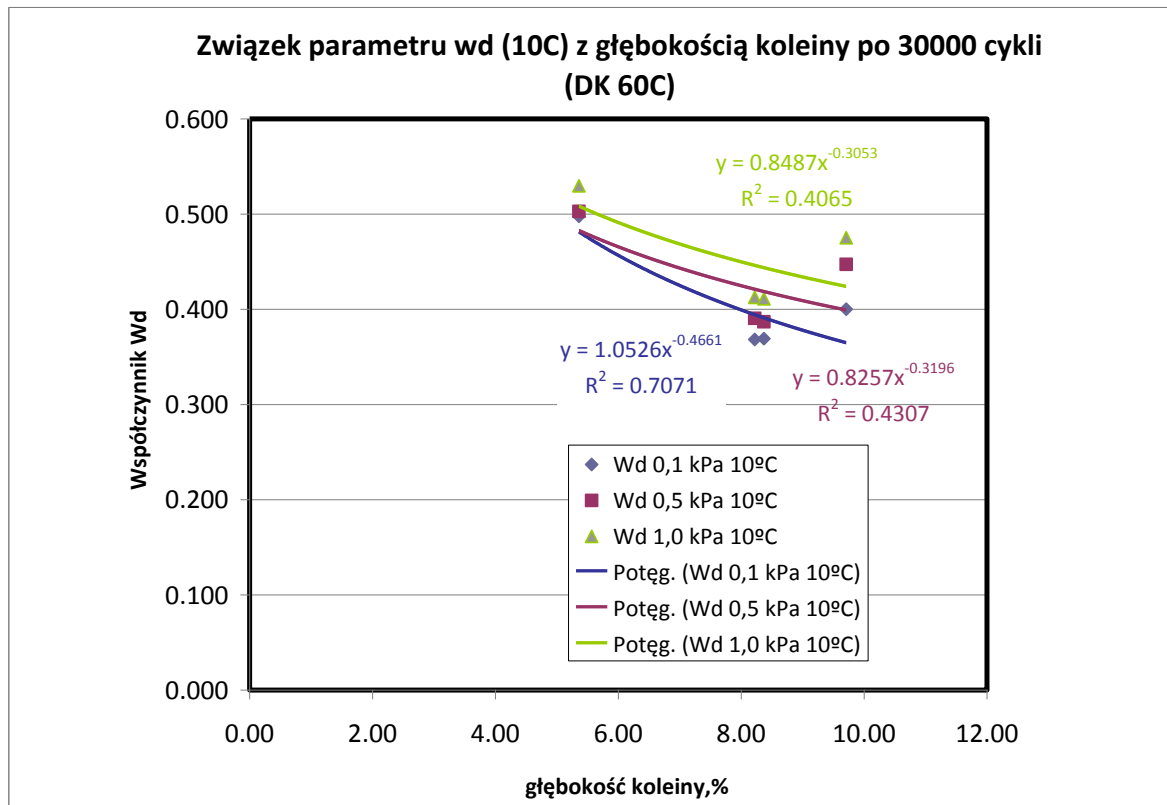


d)

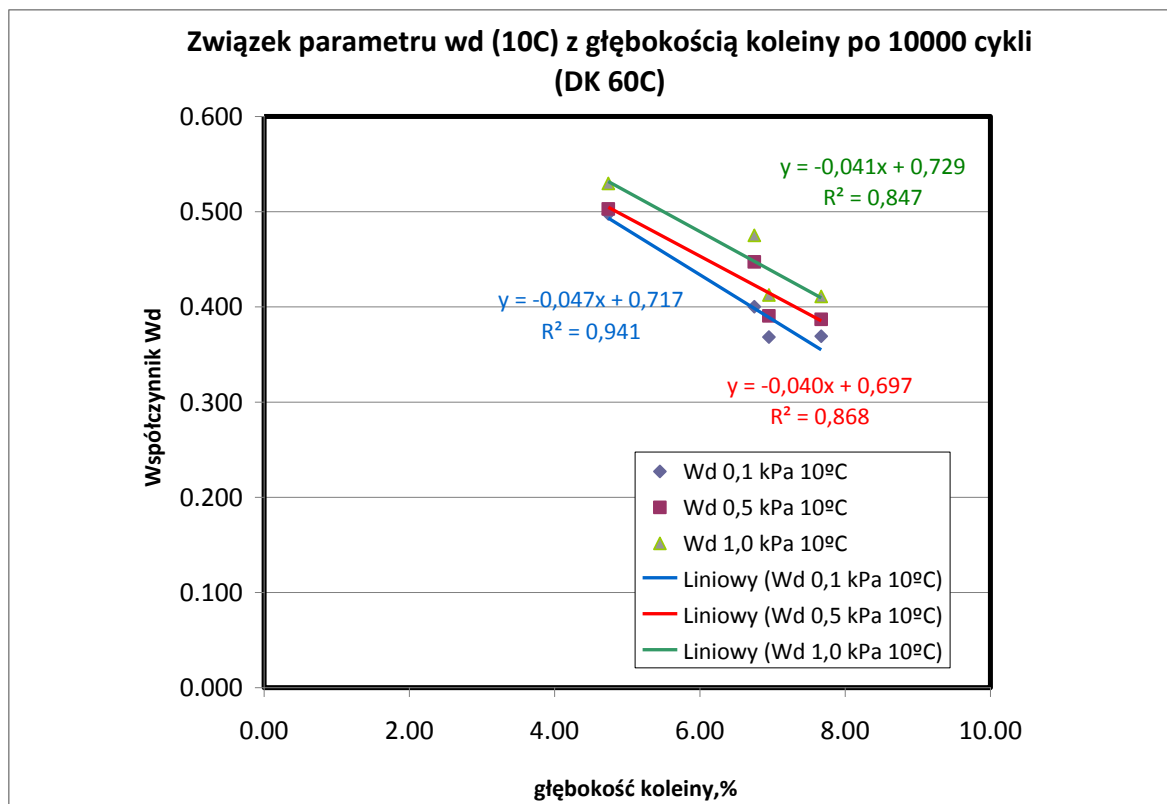


Rys.4.4. Związek parametru w_d dla różnych poziomów naprężenia i $T=30^\circ\text{C}$ z głębokością koleiny po 10000 cyklach obciążenia w małym koleinomierzu w temperaturze 45°C i 60°C

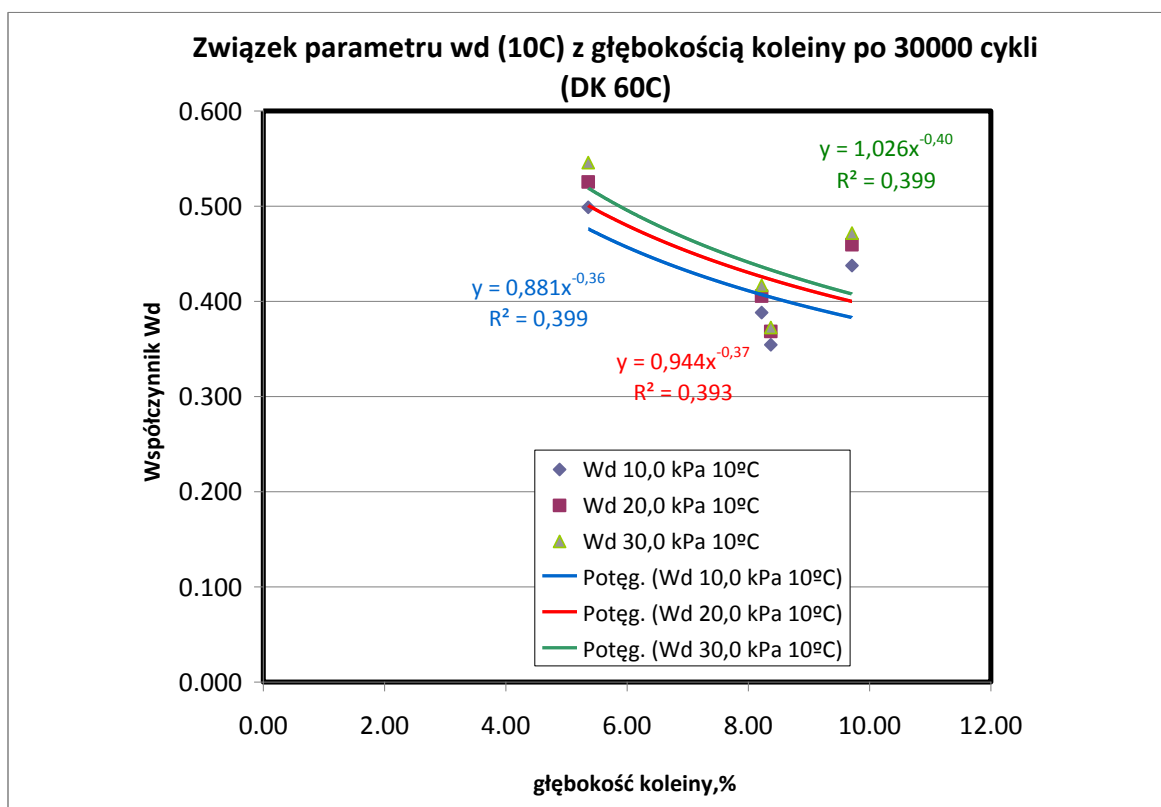
Analiza związku między wynikami testu POP a wynikami testu koleinowania w dużym koleinomierzu pozwala zauważyć, że możliwe jest znalezienie liniowego związku między parametrem w_d ($\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0$ kPa, $T=10^\circ\text{C}$) a głębokością koleiny po 10000 cyklach obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60°. Współczynniki korelacji wynoszą wtedy nawet w najlepszym przypadku 0.941, por. rys.4.6. Podobnie jest dla wyższych poziomów naprężenia w teście POP por. rys.4.8. Niemniej jednak, kiedy współczynnik w_d wyznaczymy w wyższych temperaturach to znalezienie jakiegokolwiek korelacji z wynikami koleinowania nie jest możliwe, por. rys.4.9.



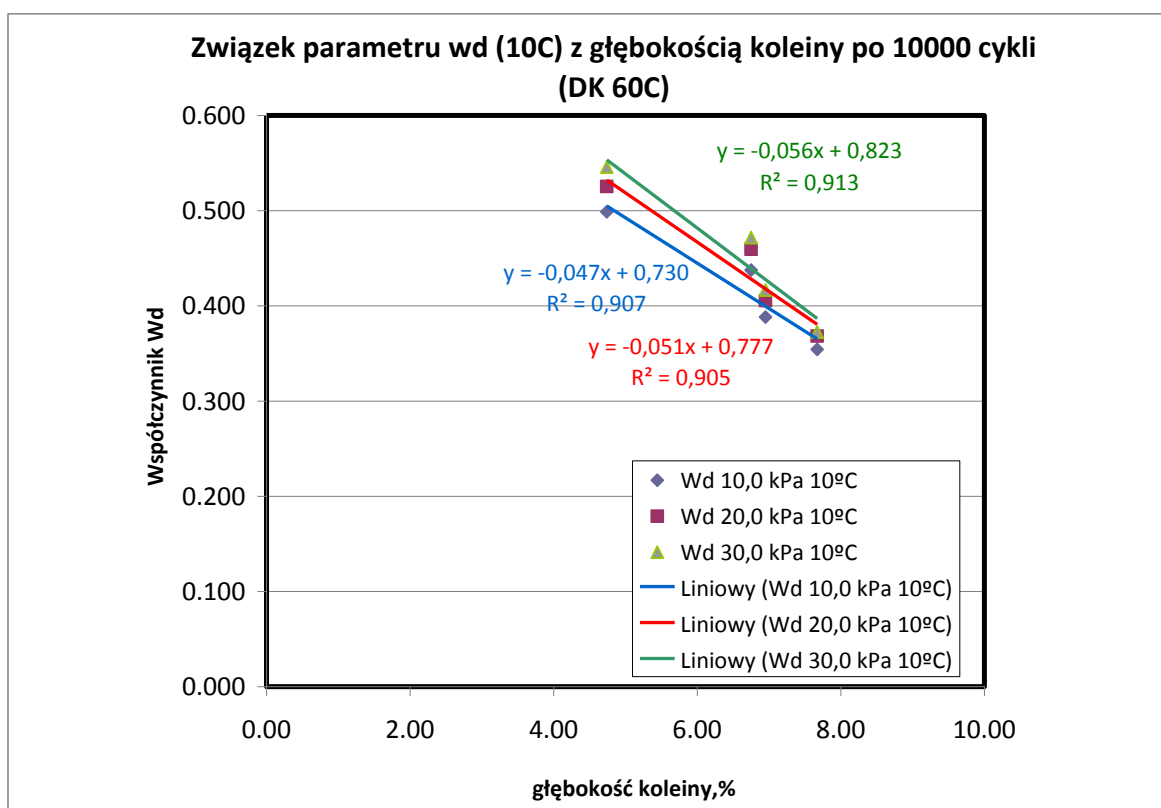
Rys.4.5. Związek parametru w_d ($\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0$ kPa , $T=10^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 30000 cyklach obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60°C



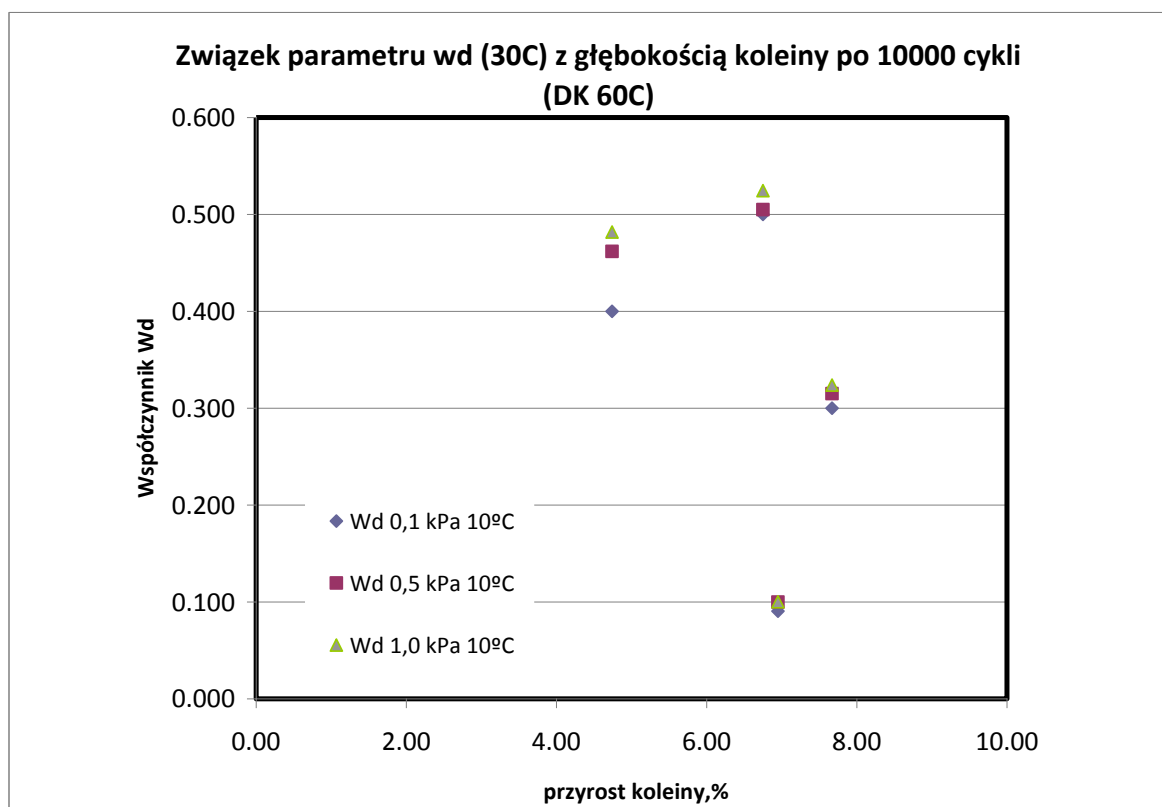
Rys.4.6. Związek parametru w_d ($\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0$ kPa , $T=10^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cyklach obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60°C



Rys.4.7. Związek parametru w_d ($\tau_o = 10, 20, 30$ kPa , $T=10^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 30000 cyklach obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60°C



Rys.4.8. Związek parametru w_d ($\tau_o = 10, 20, 30$ kPa , $T=10^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cyklach obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60°C



Rys.4.9. Związek parametru w_d ($\tau_o = 0.1, 0.5, 1.0$ kPa , $T=30^\circ\text{C}$) z głębokością koleiny po 10000 cykli obciążenia w dużym koleinomierzu w temperaturze 60°C

Warto podkreślić, że wnioski sformułowane na podstawie powyższych wykresów w odniesieniu do istnienia korelacji między współczynnikami w_d , T , τ_o w danej temperaturze i przy określonym poziomie naprężenia a wynikami testów koleinowania w dwu różnych aparatach i przy dwóch różnych temperaturach sformułowane dla mieszanek SMA11 nie można uogólniać na tym etapie dla innych typów i rodzajów MMA. Należy przypuszczać, że wspomniane wnioski mogą być słuszne, ale przy zachowaniu pewnych wymagań odnośnie innych istotnych ze względu na koleinowanie parametrów mieszanki (takich jak: objętość wolnych przestrzeni, udział objętościowy lepiszcza itp.). Prawdopodobnie dla pewnych przedziałów istotnych parametrów mieszanki można będzie wskazać krzywe (proste) korelacyjne, gdyż wskazanie jednej, która mogłaby obowiązywać dla wszystkich mieszanek mineralno-asfaltowych wydaje się niemożliwe.

Należy jednak podkreślić, że uzyskanie rankingu mieszanek ze względu na ich odporność na koleinowanie na podstawie badania POP, co było pierwotnym celem tej pracy, jak najbardziej jest możliwe oczywiście pod warunkiem, że projekt mieszanki mineralno-asfaltowej jest wykonany zgodnie ze wszystkimi zasadami i wymaganiami technicznymi.

5. Literatura

AASHTO Designation: T 315-06, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 North Capitol Street N.W., Suite 249, Washington, D.C 2001.

Barnes H.A., Hutton J.F., Walters K.: An Introduction to Rheology, Rheology Series, 3, Elsevier, 1989.

- Chen J.-S., Tsai C.-J.: Relating Tensile, Bending, and Shear Test Data of Asphalt Binders to Pavement Performance, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 7(6), pp. 805-811, 1998.
- Chen J.-S., Tsai C.-J.: How Good Are Linear Viscoelastic Properties of Asphalt Binder to Predict Rutting and Fatigue Cracking?, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 8(4), pp. 443-449, 1999.
- D'Angelo J., Kluttz R., Dongré R., Stephens K., Zanzotto L.: Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test, *Journal of the Association Of Asphalt Paving Technologists*, Vol.76, pp.123-157, 2007.
- Dreessen S., Planche J.-P.: Seeking for a relevant binder test method for rutting prediction, *ENVIROAD 2009*.
- Gagliano B., Blab R., Kappl K.: Models for permanent deformation for bituminous bound materials in flexible pavements, *SAMARIS –Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure*, SAM-05-DE11, 2004.
- Jemioło S., Gajewski M.: Modele konstytutywne do opisu zachowania się asfaltów i mas mineralno-asfaltowych w drogowo-lotniskowych nawierzchniach komunikacyjnych. *Theoretical Foundations of Civil Engineering, Polish-Ukrainian Transactions*, W. Szczesniak (ed.), Warszawa, Oficyna Wydawnicza PW 2002 (a).
- Kettl P., Lenhof B., Runwsson K., Wiberg N.-E.: Simulation of inelastic deformation in road structures due to cyclic mechanical and thermal loads, *Computers and Structures*, 85, pp. 59-70, 2007.
- Mezger T.G.: *The Rheology – Handbook*, For users of rotational and oscillatory rheometers, Vincentz Verlag, Hannover, 2002.
- Muraya P.M.: Permanent deformation of asphalt mixtures, A PhD dissertation, Road and Railway Engineering section of the Faculty of Civil Engineering and Geo-Sciences, Delft University of Technology, 2007.
- Nicholls C. (ed): *BitVal - Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests*, Report on Phase 1 of the BiTVaL Project, FEHRL, 2006.
- Polacco G., Stastna J., Zanzotto L.: Accumulated strain in polymer-modified asphalts, *Rheol Acta*, 47, pp.491-498, 2008.
- Schramm G.: *Reologia, Podstawy i zastosowania*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań, 1998.
- Sybilski D.: *Polimeroasfalty drogowe, Jakość funkcjonalna, metodyka i kryteria oceny*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, seria: *Studia i materiały*, zeszyt 45, Warszawa, 1996.
- Ward J.M.: *Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1975.

¹ PN-EN 12697-5 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 5: Oznaczanie gęstości

² PN-EN 12697-6 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanek mineralno-asfaltowej

³ PN-EN 12697-22 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 22: Koleinowanie

⁴ WT-2 Nawierzchnie asfaltowe „Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych”, IBDiM, 2008