

**Instytut Badawczy Dróg i Mostów**  
**Zakład Technologii Nawierzchni**

**Temat WS-07**

**Opracowanie i weryfikacja badania  
zmęczenia lepiszczy asfaltowych**

**Sprawozdanie końcowe**

**Zadanie 1: Przegląd metod badania zmęczenia lepiszczy  
asfaltowych i wybór metody badawczej**

**Zadanie 2. Badania wybranych lepiszczy asfaltowych i  
polimeroasfaltowych**

**Zadanie 3. Badania zmęczenia mieszanek mineralno-  
asfaltowych z wybranymi lepiszczami asfaltowymi i  
polimeroasfaltowymi**

**Zadanie 4. Przygotowanie i wykonanie badań  
międzylaboratoryjnych lepiszczy**

**Zadanie 5. Weryfikacja i opracowanie opisu metody  
badawczej**

Opracowali:

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski  
mgr inż. Andrzej Wróbel  
dr inż. Wojciech Bańkowski

Kierownik Zakładu TN:

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski

Warszawa, maj 2007



## **Spis treści:**

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Podstawa opracowania. Program                                                                               | 5  |
| 2. Zmęczenie asfaltowych nawierzchni drogowych                                                                 | 6  |
| 3. Przegląd metod badania zmęczenia lepiszczy asfaltowych                                                      | 16 |
| 4. Wybór metody badawczej                                                                                      | 24 |
| 5. Badania wybranych lepiszczy asfaltowych i polimeroasfaltowych                                               | 36 |
| 6. Badania zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych z wybranymi lepiszczami asfaltowymi i polimeroasfaltowymi | 43 |
| 7. Przygotowanie i wykonanie badań międzylaboratoryjnych lepiszczy                                             | 48 |
| 8. Wyniki badań i analiza                                                                                      | 49 |
| 9. Weryfikacja i opracowanie opisu metody badawczej                                                            | 60 |
| 10. Podsumowanie                                                                                               | 60 |
| 11. Literatura                                                                                                 | 61 |

## **Załączniki:**

1. Procedura badawcza – Badanie zmęczenia lepiszcza asfaltowego w reometrze DSR
2. Spis laboratoriów uczestniczących w badaniach RILEM RRBFT
3. Zaawansowanie badań RILEM RRBFT według stanu w maju 2007
4. Wyniki badań zmęczenia lepiszczy – Wykresy
5. Wyniki analizy trwałości zmęczeniowej lepiszczy - Tablice



## **1. Podstawa opracowania. Program**

Projekt badawczy prowadzony jest na zlecenie GDDKiA na podstawie umowy nr 1110/2005 z dnia 07.06.2005 z aneksem nr 1 z 21.03.07.

Niniejsze sprawozdanie jest sprawozdaniem końcowym, które zawiera całość pracy wraz z rozdziałami z wcześniejszych sprawozdań z 2005 i 2006 r.

Program pracy obejmował zadania:

Zadanie 1 Przegląd metod badania zmęczenia lepiszczy asfaltowych i wybór metody badawczej

Zadanie 2 Badania wybranych lepiszczy asfaltowych i polimeroasfaltowych

Zadanie 3 Badania zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych z wybranymi lepiszczami asfaltowymi i polimeroasfaltowymi

Zadanie 4 Przygotowanie i wykonanie badań międzylaboratoryjnych lepiszczy

Zadanie 5 Weryfikacja i opracowanie opisu metody badawczej

## **2. Zmęczenie asfaltowych nawierzchni asfaltowych**

### **Przyczyny i rodzaje spękań nawierzchni**

Podstawowe uszkodzenia asfaltowych nawierzchni drogowych to deformacje trwałe i spękania. W takiej też kolejności układa się poziom oceny ważności (czy też dokuczliwości) tych uszkodzeń w większości regionów świata, z wyłączeniem regionów klimatu zimnego.

W ostatnich latach w Polsce dokonano radykalnych zmian w projektowaniu konstrukcji nawierzchni, doborze materiałów, projektowaniu mieszanek mineralno-asfaltowych. Dzięki temu nawierzchnie asfaltowe stały się bardziej odporne na odkształcenia trwałe. Ponieważ jednak poprawa odporności na deformacje trwałe jest w opozycji do odporności na pękanie, zauważalnym skutkiem stało się zaobserwowanie na naszych nawierzchniach zwiększenie udziału ich spękań. Powodem tego był także brak przygotowania zaplecza badawczego i technologicznego administracji drogowej i przemysłu do uwzględnienia zjawiska pękania nawierzchni asfaltowej w projektowaniu nawierzchni i mieszanek mineralno-asfaltowych. Dopiero w końcu lat dziewięćdziesiątych stał się dostępny w sprzęt badawczy służący ocenie odporności lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych na pękanie. Wówczas też podjęto w IBDiM obszerne i kompleksowe prace obejmujące pękanie zmęczeniowe, niskotemperaturowe, połączenie międzywarstwowe.

### **Rodzaje spękań nawierzchni asfaltowych**

Spękania klasyfikuje się [1] ze względu na:

- kierunek (w stosunku do kierunku jazdy pojazdów, osi drogi)
  - o podłużne
  - o poprzeczne
- przebieg
  - o prostoliniowe
  - o kręte
  - o meandrujące
- wygląd
  - o liniowe
  - o rozgałęzione
  - o przeplatane
- rozwartość
  - o włoskowate (poniżej 1 mm)
  - o wąskie (od 1 do 2 mm)
  - o szerokie (powyżej 2 mm)
- układ
  - o pojedyncze

- o blokowe
- o siatkowe (zwane w j. angielskim aligatorowymi).



**Fot. 1. Pęknięcie pojedyncze**



**Fot. 2. Spękania blokowe**



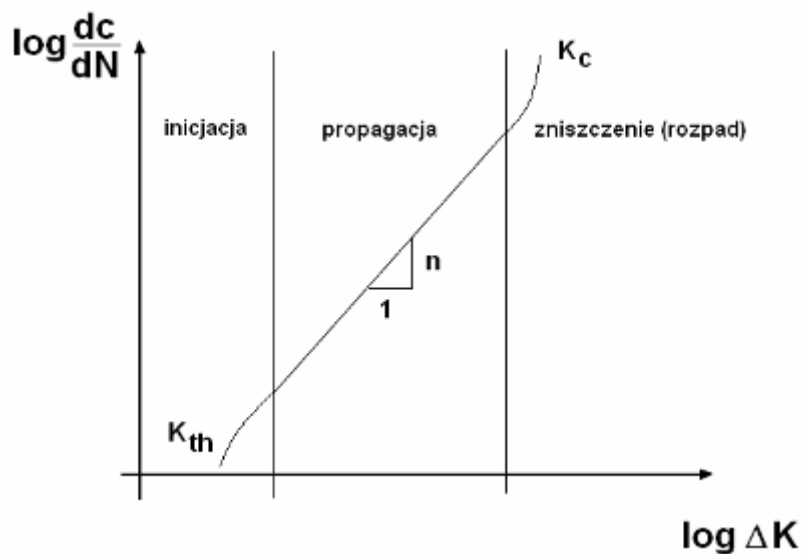
**Fot. 3. Spękania siatkowe**

Spękania nawierzchni asfaltowych są bardzo zróżnicowane pod względem genezy powstawania. Z tego względu wyróżnia się spękania:

- o zmęczeniowe
- o zmęczeniowe termiczne
- o termiczne
- o odbite.

## Podstawy teoretyczne

W mechanice pęknięć, która znajduje zastosowanie w analizie pęknięć nawierzchni drogowych, wyróżniane są trzy podstawowe fazy spękań: inicjacji, propagacji oraz zniszczenia (rozpadu), rysunek 1. Wartość  $K_{th}$  odpowiada granicznemu współczynnikowi intensywności naprężeń, poniżej którego nie nastąpi inicjacja pęknięcia. Wartość  $K_c$  odpowiada wytrzymałości materiału na pękanie.



**Rysunek 1. Teoretyczny wykres przyrostu pęknięcia zmęczeniowego w funkcji współczynnika intensywności naprężeń [2]**

Po inicjacji pęknięcia następuje jego propagacja przebiegająca liniowo, która opisywana jest prawem Parisa-Erdogana [3]:

$$\frac{dc}{dN} = A \cdot K^n \quad \text{Równanie 1}$$

w którym:

$\Delta K$  różnica pomiędzy maksymalnym a minimalnym współczynnikiem intensywności naprężeń,

$N$  liczba obciążeń,

$c$  długość pęknięcia, mm,

$A, n$  parametry uzyskane na podstawie badań.

Liczba obciążeń  $N_f$  potrzebnych do propagacji pęknięcia przez warstwę o grubości  $h$  jest opisana wzorem:

$$N_f = \int_0^h \frac{dc}{A \cdot (\Delta K(c))^n} \quad \text{Równanie 2}$$

Ważną rolę odgrywa współczynnik intensywności naprężeń  $K$ , który opisuje wielkość naprężenia w bezpośrednim otoczeniu pęknięcia. Zależy on od długości pęknięcia,

geometrii próbki (nawierzchni), warunków obciążenia przy założeniu, że materiał jest izotropowy i homogeniczny.

### Zjawisko zmęczenia i samonaprawy

Zmęczenie materiału jest jednym z powszechnie występujących zjawisk w warunkach, w których materiał poddawany jest wielokrotnemu, cyklicznemu obciążeniu. Dotyczy to także nawierzchni drogowych, asfaltowych lub betonowanych, poddawanych cyklicznemu obciążeniu pojazdami.

Obok odkształceń trwałych pękanie zmęczeniowe jest jednym z głównych rodzajów uszkodzenia nawierzchni asfaltowych. Są to dwa uszkodzenia lokujące się na przeciwległych biegunach, tzn. zwiększenie odporności na koleinowanie nawierzchni asfaltowej może prowadzić do zmniejszenia jej trwałości zmęczeniowej i odwrotnie.

W projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowej jako jedno z podstawowych kryteriów przyjmuje się kryterium zmęczenia warstw związanych (asfaltowych, betonowych, stabilizowanych spoiwem hydraulicznym). Zmęczenie materiału, polegające na inicjacji i propagacji spękań (mikro- i makro-), objawia się zmniejszeniem jego modułu sztywności (sprężystości). W klasycznym ujęciu analizy zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych jako moment zniszczenia uznaje się chwilę, gdy moduł wynosi 50% wartości początkowej.

Pojedyncze obciążenie materiału wywołuje w nim jednostkową szkodę zmęczeniową  $d_i$ , których suma jest całkowitą szkodą zmęczeniową  $D$  zgodnie z prawem Minera-Palmera:

$$D = \sum_i^k \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Równanie 3}$$

- $n_i$       liczba obciążeń jednostkowych o wartości  $i$   
 $N_i$       niszcząca liczba obciążeń o wartości  $i$   
 $k$       liczba obciążeń  
 $D$       szkoda zmęczeniowa:  $D \leq 1$  ( $D = 1$  oznacza zniszczenie).

### Trwałość zmęczeniowa

Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni drogowej definiowana jest jako liczba przejść osi standardowych do zniszczenia konstrukcji, czyli wystąpienia spękań zmęczeniowych na powierzchni nawierzchni. W badaniach laboratoryjnych trwałość zmęczeniowa próbki określana jest jako liczba cykli obciążenia do spełnienia kryterium zmęczeniowego wyznaczającego moment zniszczenia próbki.

Prawo zmęczeniowe mieszanki mineralno-asfaltowej wyrażone jest ogólnymi wzorami:

$$N_f = K_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \quad \text{Równanie 4}$$

lub

$$N_f = K_1 (\varepsilon_t)^{-k_2} \quad \text{Równanie 5}$$

w których:

- $N_f$       liczba obciążeń do zniszczenia zmęczeniowego  
 $\varepsilon_t$       odkształcenie rozciągające w miejscu krytycznym

$K_1, k_2$  współczynniki kalibracyjne ustalane laboratoryjnie.  
W niektórych metodach projektowania konstrukcji to ogólne równanie przekształcane jest do postaci, w której trwałość zmęczeniowa wyrażona jest w bezpośredniej zależności od modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej:

$$N_f = k_1 \left( \frac{1}{E^*} \right)^{k_3} \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \quad \text{Równanie 6}$$

$$N_f = k_1 (E^*)^{-k_3} (\varepsilon_t)^{-k_2} \quad \text{Równanie 7}$$

$$K_1 = k_1 (E^*)^{-k_3} \quad \text{Równanie 8}$$

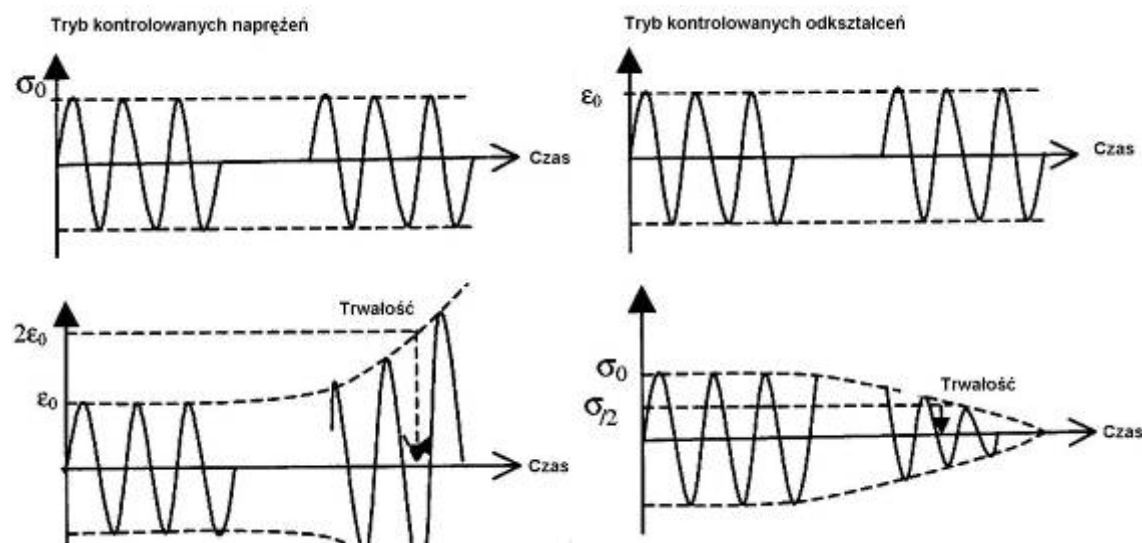
$E^*$  moduł sztywności materiału.

$k_1, k_3$  współczynniki kalibracyjne ustalane laboratoryjnie.

W badaniach zjawiska zmęczenia materiałów asfaltowych ujawniło się również zjawisko samonaprawy materiału (ang. healing).

Samonaprawa materiału polega na częściowym przywróceniu pierwotnych, utraconych właściwości materiału podczas spoczynku, w okresie odciążenia przed kolejnym obciążeniem. Zdolność do samonaprawy wykazują materiały asfaltowe zapewne dzięki tiksotropii asfaltu czyli zdolności odtworzenia pierwotnej lepkości po usunięciu obciążenia.

## Konwencjonalne kryterium zmęczeniowe



**Rysunek 2. Porównanie trybu kontrolowanych odkształceń i naprężeń [4]**

Konwencjonalne kryterium zmęczenia mieszanki mineralno-asfaltowej, powszechnie do niedawna uznawane i stosowane, definiuje zniszczenie materiału, kiedy jego moduł sztywności mniejszy się do 50% wartości początkowej.

Stosując tak zdefiniowane zmęczenie, podaje się wymaganie trwałości zmęczeniowej w postaci minimalnej amplitudy odkształcenia oznaczanego  $\varepsilon_0$ , przy którym trwałość zmęczeniowa mieszanki wynosi 1 mln cykli obciążenia.

Konwencjonalne kryterium zmęczeniowe definiujące trwałość zmęczeniową jest kryterium arbitralnym uwzględniającym jedynie moduł sztywności próbki, a nie rzeczywiste właściwości materiałowe. Należy również dodać, że w wyższej

temperaturze i przy dużych obciążeniach, spadek modułu na początku badania jest bardzo znaczny i nie zawsze związany wyłącznie ze zjawiskiem zmęczenia. W tej fazie dominuje zjawisko wewnętrznego ogrzania próbki [5].

## **Energetyczne kryterium zmęczeniowe**

Hopman i in. [6] zaproponowali nową definicję trwałości zmęczeniowej (oznaczanej jako N1), wykorzystując koncepcję energii rozproszonej opracowaną przez van Dijka [7]. Większa część energii rozproszonej podczas badania zmęczenia jest zamieniana na energię cieplną. Jednak wzrost temperatury jest niewielki i nie może odpowiadać za całkowity spadek modułu [8, 9]. Pozostała część energii odpowiedzialna jest za mechaniczne zmęczenie próbki. Podczas badania zmęczenia można zaobserwować nagłą zmianę wykresu energii rozproszonej, co według Pronka [10] wskazuje na rozpoczęcie końcowej fazy badania, czyli gwałtownej degradacji próbki.

W procesie zmęczenia wyróżniono dwa podstawowe etapy: inicjację mikrospękań (etap 1) oraz propagację mikro- i makrospękań prowadzącą do zniszczenia próbki – rozpadu materiału (etap 2). W każdym z tych etapów w jednostkowym cyklu obciążenia powstaje pewna energia rozproszona opisana poniższym równaniem:

$$W_n = \pi \cdot \sigma_n \cdot \varepsilon_n \cdot \sin \theta_n \quad \textbf{Równanie 9}$$

w którym:

$w_n$  - energia rozproszona, J/m<sup>3</sup>,

$\sigma_n$  - amplituda naprężenia, MPa

$\varepsilon_n$  - amplituda odkształcenia, μmm/mm

$\theta_n$  - kąt przesunięcia fazowego, °.

Graficznym przedstawieniem tego zjawiska jest wykres zależności wskaźnika energii rozproszonej od liczby cykli obciążenia opisany następującym równaniem:

$$W_n = \frac{n \cdot w_0}{w_n} \quad \textbf{Równanie 10}$$

w którym:

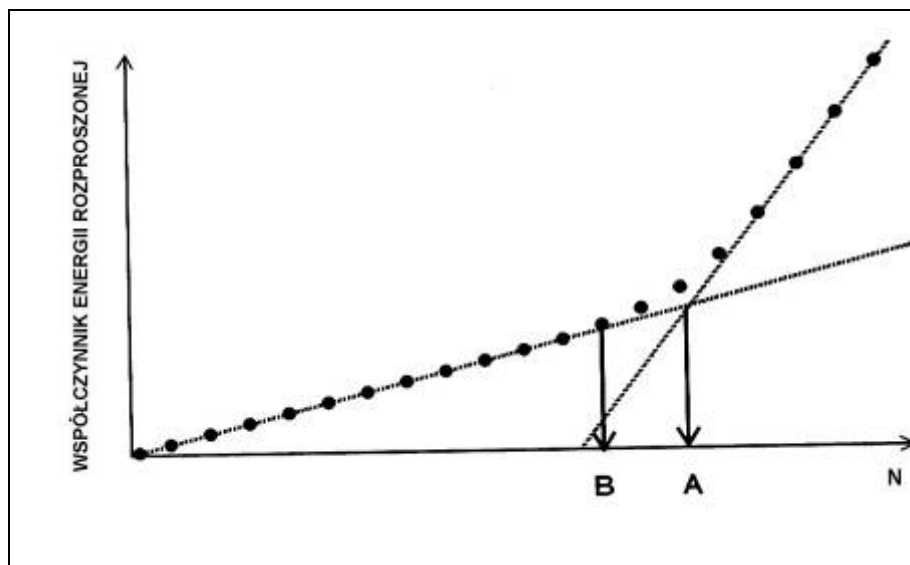
$n$  – numer cyklu obciążenia,

$w_0$  – energia rozproszona w pierwszym cyklu,

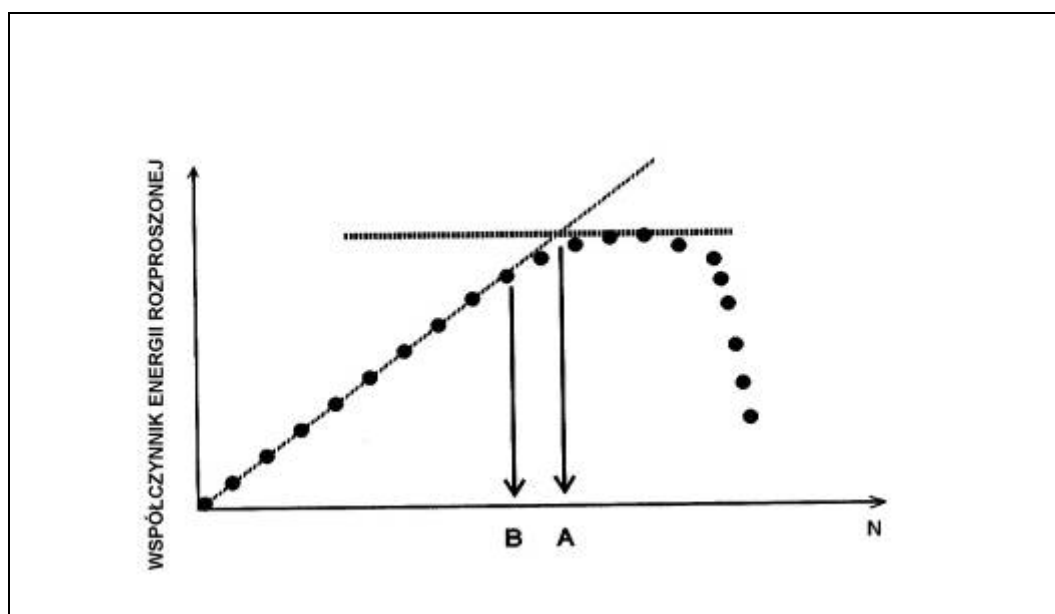
$w_n$  – energia rozproszona w n-tym cyklu.

Stosując energetyczne kryterium zmęczeniowe, wprowadzono nową definicję trwałości zmęczeniowej oznaczanej jako N1, określaną jako liczba cykli, po której następuje odchylenie wykresu wskaźnika energii rozproszonej od linii prostej [11]. Wykres taki ma różny charakter w trybie kontrolowanego odkształcenia lub naprężenia (rysunki 3, 4).

Stosowanie tego kryterium okazało się jednak trudne, z uwagi na niejednoznaczne (matematycznie) wskazanie momentu zmiany wskaźnika energii rozproszonej. Zaproponowano dwie metody graficzne. Metoda przecięcia stycznych (punkt A) prowadzi jednak do zawyżania trwałości zmęczeniowej. Druga metoda polega na znalezieniu punktu odchylenia od prostej (punkt B). Wynik może być jednak subiektywny, zależny od osoby dokonującej obliczeń, gęstości punktów pomiarowych, skali wykresu itp. [12]. Konieczne więc było poszukiwanie metody, która obiektywnie i dokładnie pozwalałaby wyznaczyć trwałość zmęczeniową N1.



**Rysunek 3. Wskaźnik energii rozproszonej w trybie kontrolowanych odkształceń**



**Rysunek 4. Wskaźnik energii rozproszonej w trybie kontrolowanych naprężeń [13]**

Tak przyjęte kryterium opiera się na obserwacji samego procesu zmęczenia, w odróżnieniu od konwencjonalnego kryterium, według którego trwałość zmęczeniowa określana jest arbitralnie jako liczba cykli potrzebna do obniżenia się sztywności badanej próbki o 50 % w stosunku do wartości początkowej. Przeprowadzone przez Pronka wstępne badania metodą belki czteropunktowo zginanej wykazały, że możliwe jest porównywanie wyników uzyskanych w trybie kontrolowanych naprężeń i trybie kontrolowanych odkształceń nawet przy różnych częstotliwościach [14]. Wysłunięto również hipotezę, że nowa definicja trwałości zmęczeniowej opiera się na właściwościach materiału, a nie próbki i powinna być niezależna od metody. Późniejsze badania nie potwierdziły jednak do końca tej ostatniej tezy [15].

W praktyce okazało się, że stosowanie metody graficznej jest bardzo subiektywne. Dopiero metoda Rowe'a [16] pozwoliła na matematyczne, precyzyjne zdefiniowanie momentu odchylenia wykresu wskaźnika energii rozproszonej w funkcji

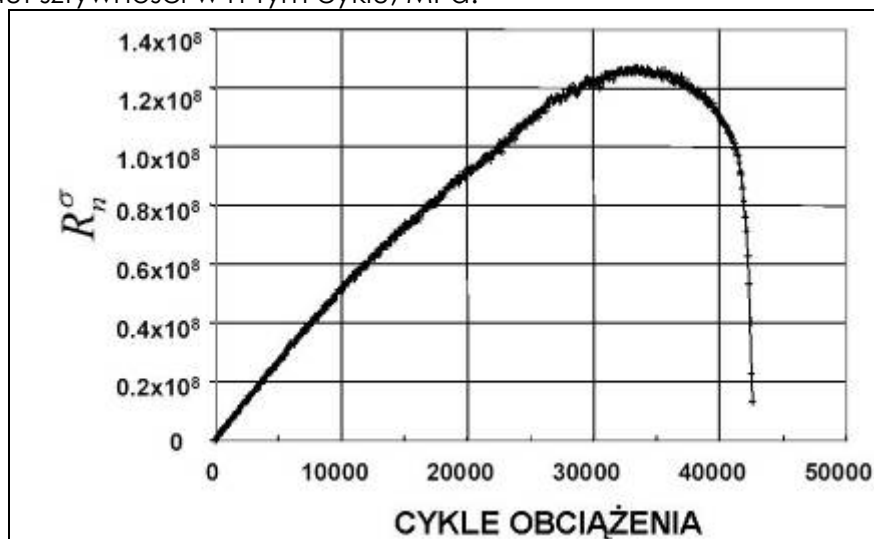
liczby cykli od linii prostej. W trybie kontrolowanego naprężenia wprowadzono zredukowany wskaźnik energii rozproszonej opisany równaniem:

$$R_n^\sigma = n \cdot E_n \quad \text{Równanie 11}$$

w którym:

$n$  – numer cyklu obciążenia,

$E_n$  – moduł sztywności w  $n$ -tym cyklu, MPa.



**Rysunek 5 Zredukowany wskaźnik energii rozproszonej  $R_n^\sigma$**

Graficzną ilustrację przedstawiono na rysunku 5. Wykazano, że maksimum wykresu odpowiada właśnie nowemu kryterium zmęczeniowemu N1. W trybie kontrolowanego odkształcenia zredukowany wskaźnik energii rozproszonej opisuje równanie:

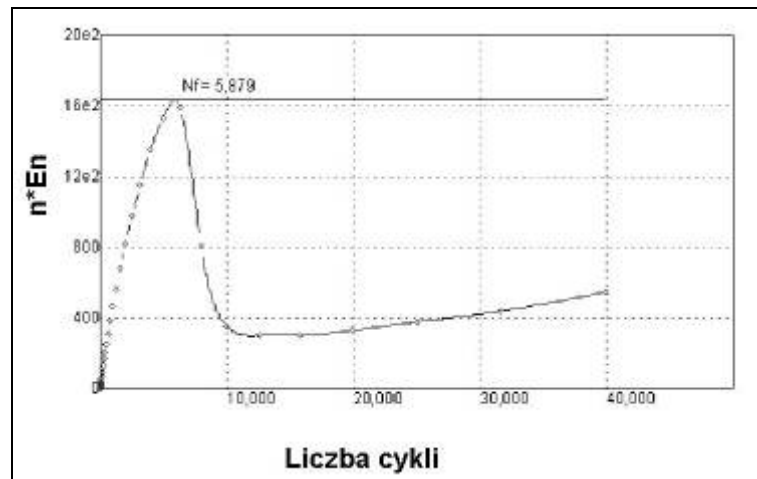
$$R_n^\epsilon = n / E_n \quad \text{Równanie 12}$$

w którym:

$n$  – numer cyklu obciążenia,

$E_n$  – moduł sztywności w  $n$ -tym cyklu, [MPa]

Na podstawie tego równania nie można jednak, w podobnie łatwy sposób jak w trybie kontrolowanych naprężeń, określić trwałości zmęczeniowej N1. Wykazano natomiast, że w tym trybie można również skorzystać z równania 13 i uzyskuje się wykres podobny jak dla trybu kontrolowanych naprężeń (rysunek 6). Metoda wyznaczania trwałości zmęczeniowej N1 jest również taka sama.



Rysunek 6 Zredukowany wskaźnik energii rozproszonej  $R_n^e$

### 3. Przegląd metod badania zmęczenia lepiszczy asfaltowych

#### Przegląd historii badań zmęczenia lepiszczy asfaltowych

Zagadnieniem zmęczenia nawierzchni drogowych i mieszanek mineralno-asfaltowych jest przedmiotem zainteresowania i badań od kilkudziesięciu lat. Pierwsze, pionierskie badania prowadził Pell [17] na Uniwersytecie Nottingham w latach 1950-tych. Badania te były zainicjowane i finansowane przez Shella. Pell objął swoimi badaniami mieszanki mineralno-asfaltowe, mastyksy i asfalty. Badania mieszanek wykonywane były metodą zginania w specjalnie skonstruowanej maszynie wytrzymałościowej. Schemat badania przedstawia rys. 7.

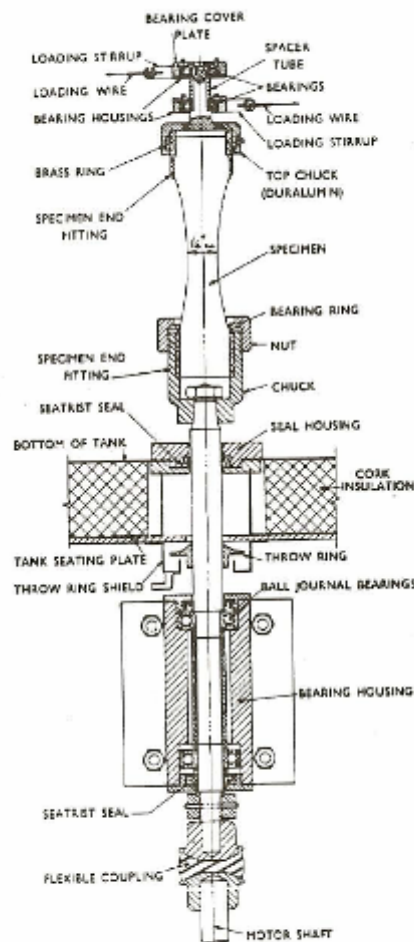
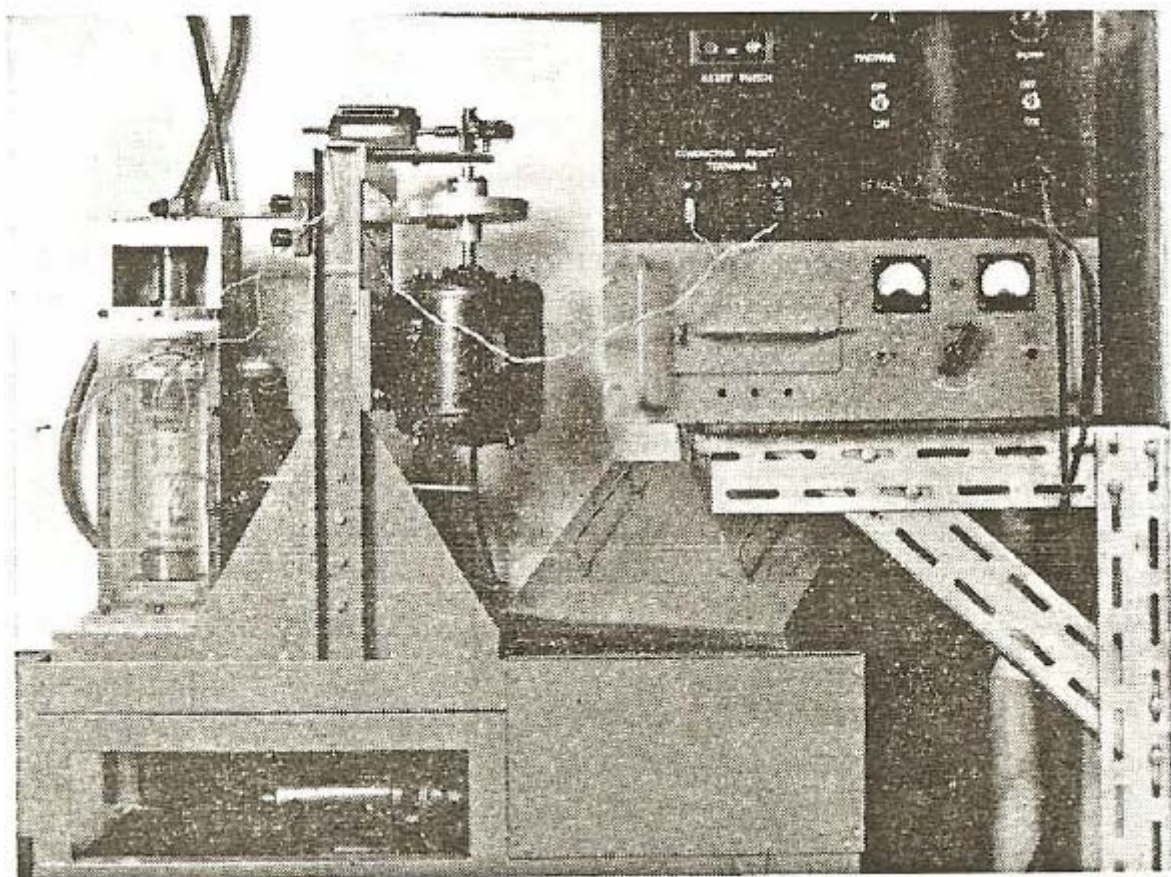


FIG. 1  
*Constant bending stress fatigue machine*

#### Rysunek 7. Schemat badania zmęczenia metodą zginania w badaniach Pella

Badania zmęczenia mastyksów i asfaltów wykonano metodą skracania próbek z zastosowaniem specjalnie do tego celu skonstruowanej, unikalnej aparatury laboratoryjnej. (rys. 8).

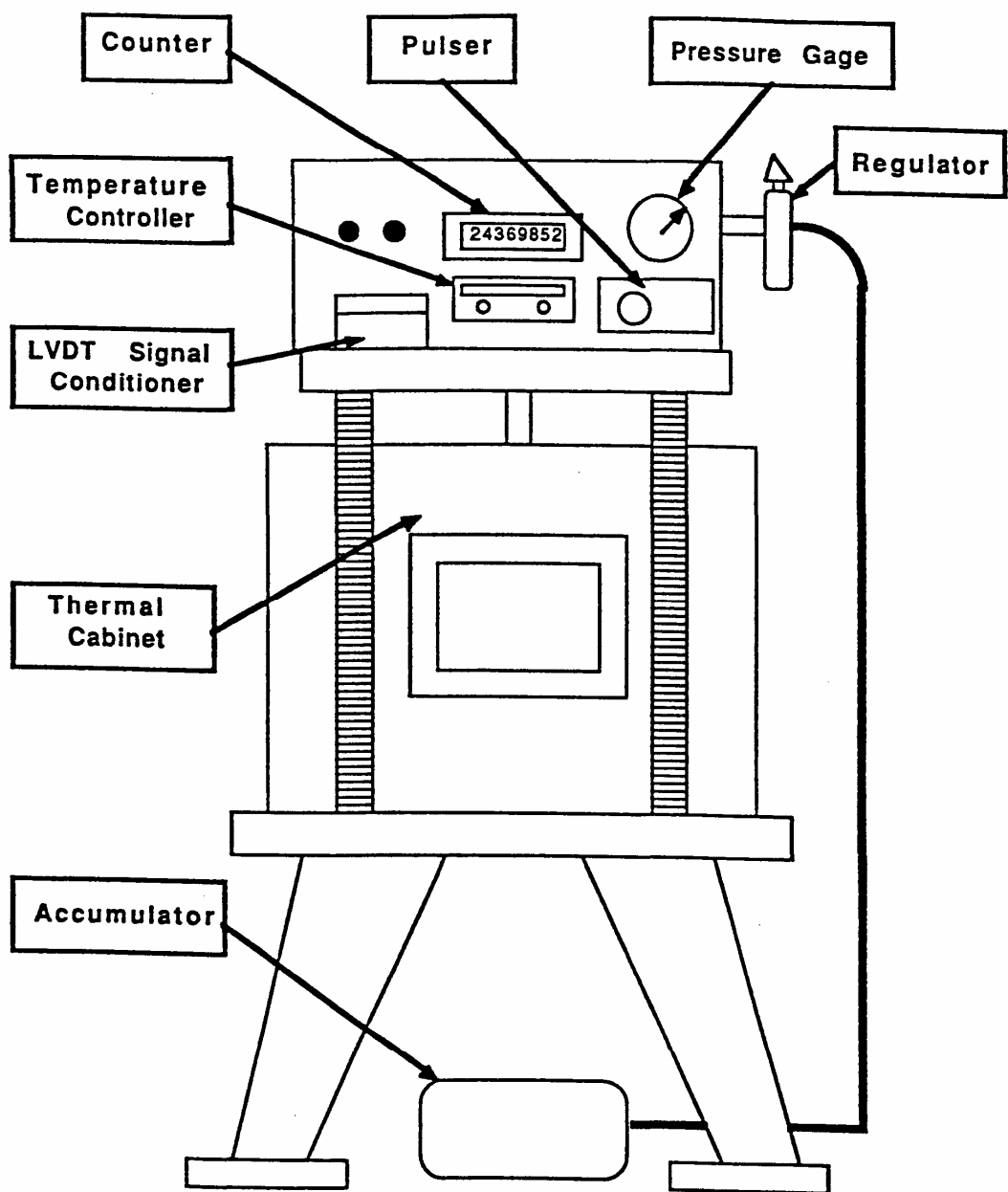


**Rysunek 8. Aparat do badania zmęczenia metodą skręcania w badaniach Pella**

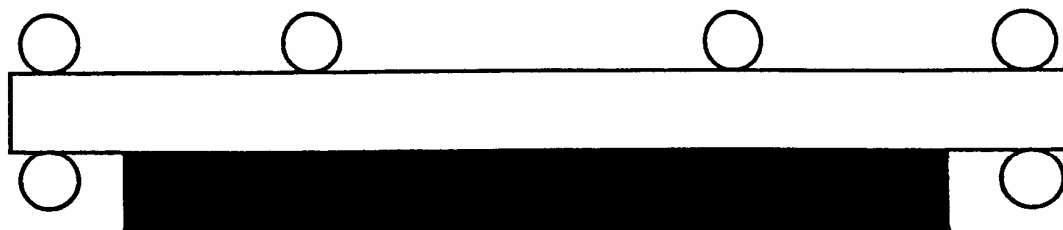
W późniejszych latach skoncentrowano się na badaniach zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych. Badania zmęczenia lepiszczy przez wiele lat nie były prowadzone. Powodem był znacznie większy stopień komplikacji badania zmęczenia lepiszczy.

W początku lat 1990-tych Potschka [18] prowadził badania zmęczenia lepiszczy z wykorzystaniem aparatu Fraassa. Zastosował zatem badanie metodą zginania.

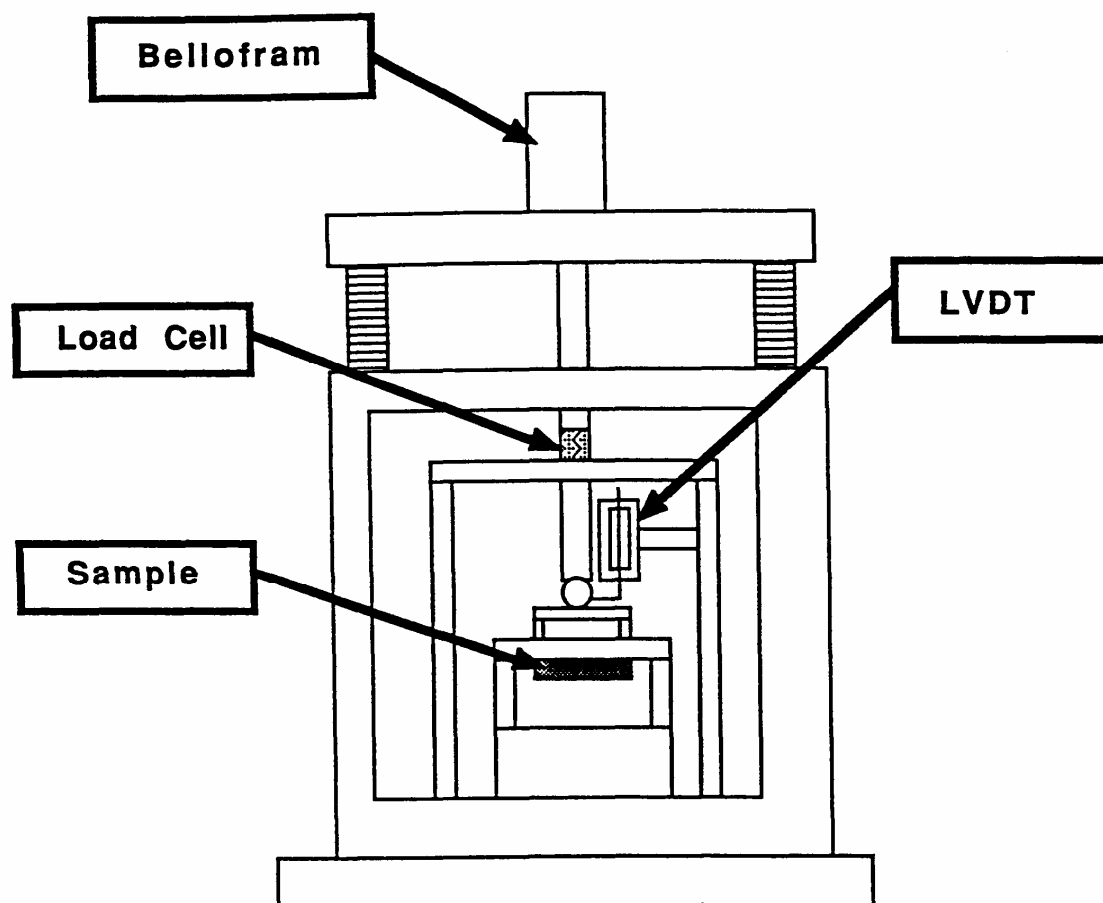
W ramach programu badawczego SHRP w latach 1994-1998 opracowano specjalny aparat do badania zmęczenia lepiszcza metodą belki 4-punktowo zginanej (rys. 9-11) [19]. Próbkę lepiszcza nakładano na aluminiowy płaskownik. Tak przygotowana kompozytowa próbka poddawana była zginaniu cyklicznemu z kontrolowanym odkształceniem (przemieszczeniem) w cyklu obciążenie 0,1 s, odciążenie 0,9 s. Badanie przerywano, gdy na powierzchni próbki lepiszcza pojawiały się mikropęknięcia. Badano wówczas wyłącznie asfalty zwykłe, niemodyfikowane (w początkowym etapie SHRP w USA prawie nie stosowano asfaltów modyfikowanych polimerami).



Rysunek 9. Aparat do badania zmęczenia lepiszcza asfaltowego metodą belki 4-punktowo zginanej opracowany w ramach SHRP



**Rysunek 10. Próbką kompozytowa lepiszcza asfaltowego na płaskowniku aluminiowym do badania zmęczenia**



**Rysunek 11. Schemat warunków obciążenia próbki w badaniu zmęczenia wg SHRP**

W drugiej połowie lat 1990-tych zwrócono większą uwagę na badania zmęczenia lepiszczy w Europie. Przykładem mogą być zainicjowane w BP [20]. Celem tych

badania było uzyskanie korelacji między zachowaniem mieszanki mineralno-asfaltowej i jej trwałością a właściwościami reologicznymi lepiszczy asfaltowych. We wnioskach z tych badań stwierdzono, że można uzyskać wiarygodne zależności między odpornością na koleinowanie i pękanie niskotemperaturowe a właściwościami reologicznymi lepiszcza, lecz brak takich zależności w wypadku zmęczenia.

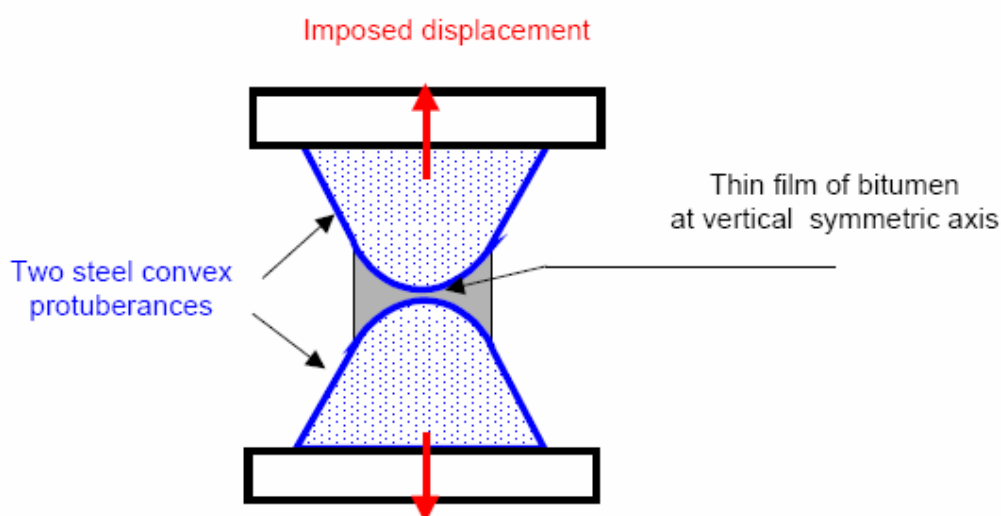
Bahia [21, 22] w końcu lat 1990-tych, po zakończeniu programu SHRP, podjął badania nad zmęczeniem lepiszczy, przyjmując założenie, że lepiszcze w nawierzchni poddawane jest znacznym odkształceniom i naprężeniom, które sprawiają, że pracuje ono w strefie nieliniowej lepkośćsprężystości, a nie w strefie liniowej lepkośćsprężystości, jak się powszechnie uważa. W badaniach zastosował metodę ścinania w reometrze DSR. Według opracowanej metodyki badanie prowadzone jest w strefie nieliniowej lepkośćsprężystości z ustaloną liczbą cykli obciążenia (5000 lub 11000 z odkształceniem 1, 10, 20, 50%). Zniszczenie materiału jest określone jako stopień redukcji modułu zespolonego ścinania  $G^*$ . W badaniach tych podjęto również pomiary i ocenę zjawiska samonaprawy (*healing*) asfaltu. Wnioski z badań wskazują, że odporność na zmęczenie lepiszcza znacznie zależy od jego kompozycji. Modyfikacja polimerami przynosi w tym względzie znaczną poprawę.

Badania te w ramach programu NCRHP zakończone zostały nową propozycją wymagań wobec lepiszczy asfaltowych modyfikowanych polimerami, alternatywną wobec systemu Superpave [23].

W Europie badania zmęczenia lepiszczy asfaltowych na nowo podjęte zostały w kilku laboratoriach koncernów petrochemicznych BP (Claxton [4]), Shell (Phillips [24]), Nynas (Soenen i Eckmann [25]). W badaniach tych również wykorzystany był reometr DSR.

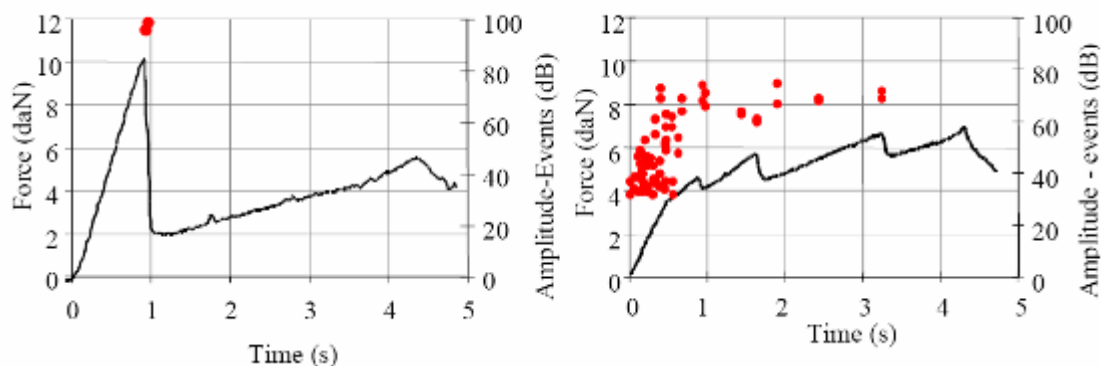
Soenen i Eckmann przyjęli za kryterium zniszczenia klasyczną graniczną wartość modułu  $G^*$  wynoszącą 50% wartości początkowej.

W LCPC [26] opracowano nową metodę badania zmęczenia lepiszcza: *Powtarzalny Test Lokalnego Pęknięcia Asfaltu*. W badaniu cienka warstwa asfaltu sklejająca dwie stalowe półkulowe czasze (symulujące ziarna kruszywa) poddana jest cyklicznym stałym, kontrolowanym odkształceniom rozciągającym (rys. 6).



**Rysunek 12. Schemat Powtarzalnego Testu Lokalnego Pęknięcia Asfaltu (LCPC)**

Badanie to wykazało również zgodność z badaniem lokalnych pęknięć metodą emisji akustycznej (rys. 13). Rys. 13 ilustruje dwa możliwe obrazy przebiegu pęknięcia: jednorazowe lub wielokrotne.



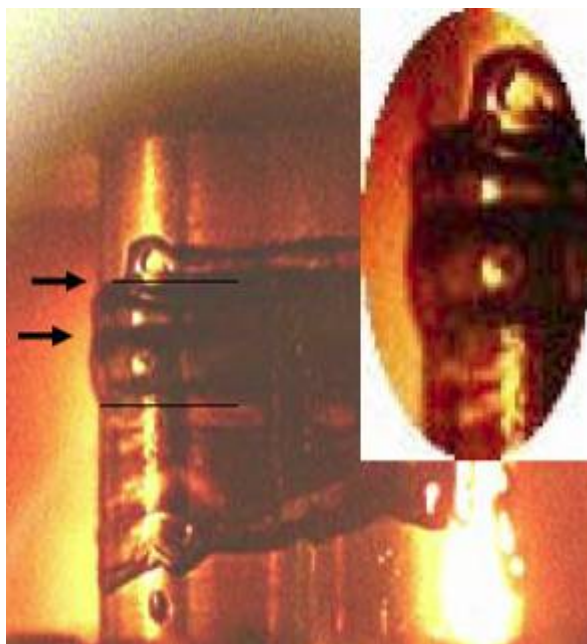
**Rysunek 13. Porównanie wyników badań pęknięcia asfaltu PTLPA i zdarzeń akustycznych metodą emisji akustycznej**

Badania wykazały różnorodność zachowania lepiszczy (kruche, ciągliwe) zależnie od temperatury i wielkości odkształcenia. Zastosowanie przerw pomiędzy kolejnymi obciążeniami pozwala na rejestrację zjawiska samonaprawy lepiszcza.

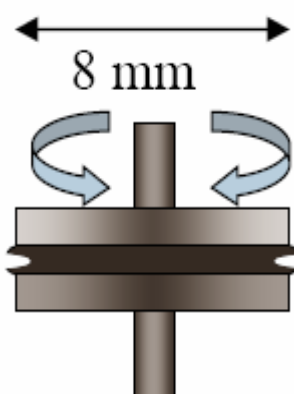
W ramach warsztatu Eurobitume [27] stwierdzono, że wpływ właściwości lepiszcza asfaltowego na zmęczenie nawierzchni jest wyraźny, lecz trudny do oszacowania ze względu na różnorodność czynników warunkujących tę zależność: położenie warstwy w nawierzchni, różne wymagania w zależności od konstrukcji nawierzchni uzależnionej od przewidywanego obciążenia. Szczególne trudności pojawiają się w badaniach laboratoryjnych, takie jak: symulacja warunków obciążenia lub symulacja zjawiska samonaprawy.

W ostatnich latach w wielu ośrodkach badawczych podjęto prace nad zmęczeniem lepiszczy asfaltowych [28, 29, 30, 31, 32]. Celem jest opracowanie wiarygodnej metody badania lepiszcza asfaltowego, która mogłaby stanowić element nowej normy. Znalezienie wiarygodnej korelacji między wynikami badań lepiszcza i mieszanki mineralno-asfaltowej pozwoliłoby na znaczne uproszczenie zakresu prac na etapie doboru materiałów i projektowania składu mieszanki – badanie lepiszcza jest znacznie tańsze i mniej czasochłonne niż badanie mieszanki. Dotychczasowe próby wskazują, że jest to jednak bardzo skomplikowane.

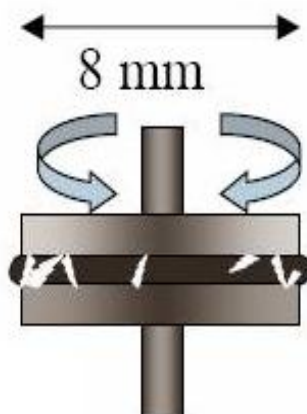
W ostatnim okresie wraz ze zwiększeniem liczby ośrodków badawczych zajmujących się zmęczeniem lepiszczy, wyników badań i dostępnej informacji, poszerza się dyskusja na ten temat i ujawniają się różnice poglądów. Łącznie ze skrajnościami w postaci podziału na „wierzących” i „niewierzących”. Ci ostatni kwestionują poprawność interpretacji wyników badań i samo zjawisko zmęczenia w badaniu reometrem DSR. Twierdzą, że zjawisko utożsamiane ze zmęczeniem jest tzw., efektem krawędziowym, polegającym na rozdzieleniu warstwy lepiszcza inicjowanym na jej krawędzi wskutek osłabienia kohezji, którego następstwem jest rejestrowane zmniejszenie wartości modułu zespolonego  $G^*$ . Ilustrują to rys. 14 i 15.



**Rysunek 14. Fotografia efektu krawędziowego w badaniu zmęczenia w DSR (wg Andersona)**



**Rysunek 15. Ilustracja efektu krawędziowego w DSR**



**Rysunek 16. Ilustracja zmęczenia w badaniu DSR**

Jednak inne prace wyraźnie wskazują, że te efekty mogą zachodzić, ale poprawnie wykonane badanie w niekwestionowany sposób rejestruje zjawisko zmęczenia [33, 34] (rys. 16). Konieczne jest tu spełnienie pewnych wymagań, które zostały określone w wyniku licznych prac badawczych.

Warsztat Eurobitume stał się w Europie impulsem do intensyfikacji badań nad właściwościami funkcjonalnymi lepiszczy asfaltowych i ich powiązania z właściwościami mieszanek mineralno-asfaltowych i nawierzchni. Wnioski z Warsztatu stanowią podstawę do kolejnych prac studialnych i badawczych, zmierzających do opracowania nowych metod badawczych i norm europejskich. Jedną z ważniejszych europejskich inicjatyw jest projekt BitVal podjęty przez stowarzyszenie laboratoriów FEHRL. Efektem tego projektu jest przegląd metod badań lepiszczy i korelacja ich wyników z badaniami mieszanek mineralno-asfaltowych i nawierzchni [35].

#### 4. Wybór metody badawczej

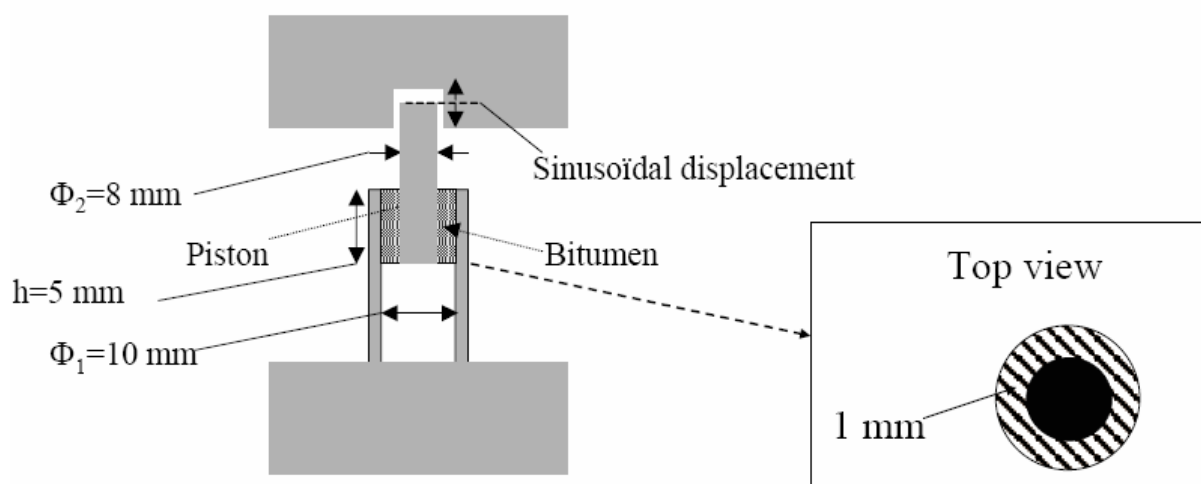
Badania zmęczenia lepiszcza asfaltowego wykonywane są różnymi metodami. W pierwszych badaniach Pell stosował metodę skręcania. Następnie Potschka zastosował aparat Fraassa i metodę zginania próbki kompozytowej złożonej z blaszki stalowej i warstwy asfaltu. Podobną metodę opracowano w programie SHRP.

W LCPC stosowany jest aparat Metravib (rys. 17) pozwalająca na badania metodą ścinania pierścieniowego lub ściskania-rozciągania.

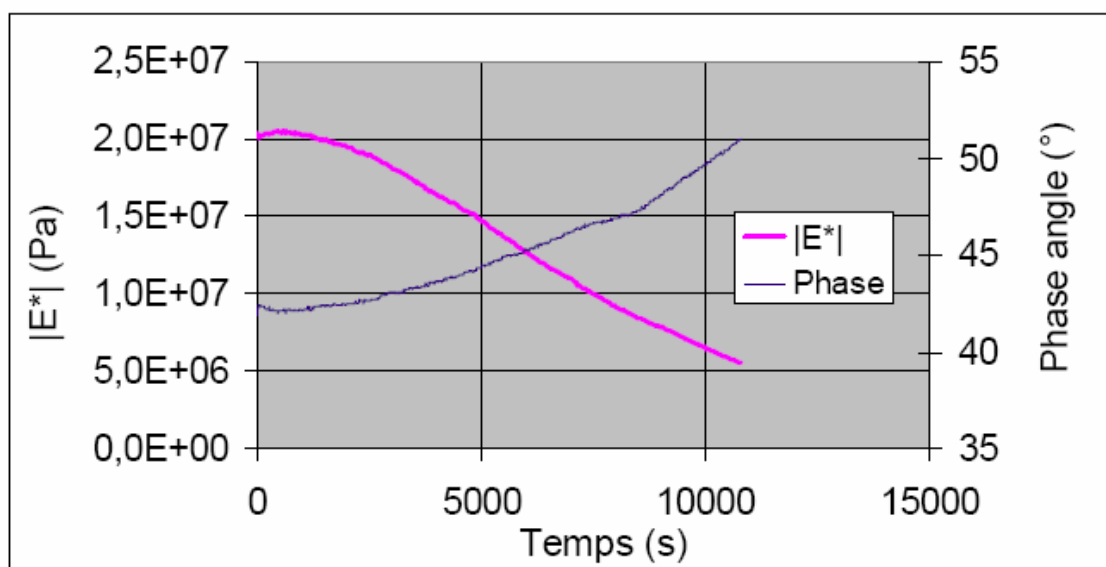
Metodę ścinania pierścieniowego ilustruje rys. 18, a wyniki badań rys. 19.



Rysunek 17. Aparat Metravib do badań reologicznych lepiszczy asfaltowych w LCPC

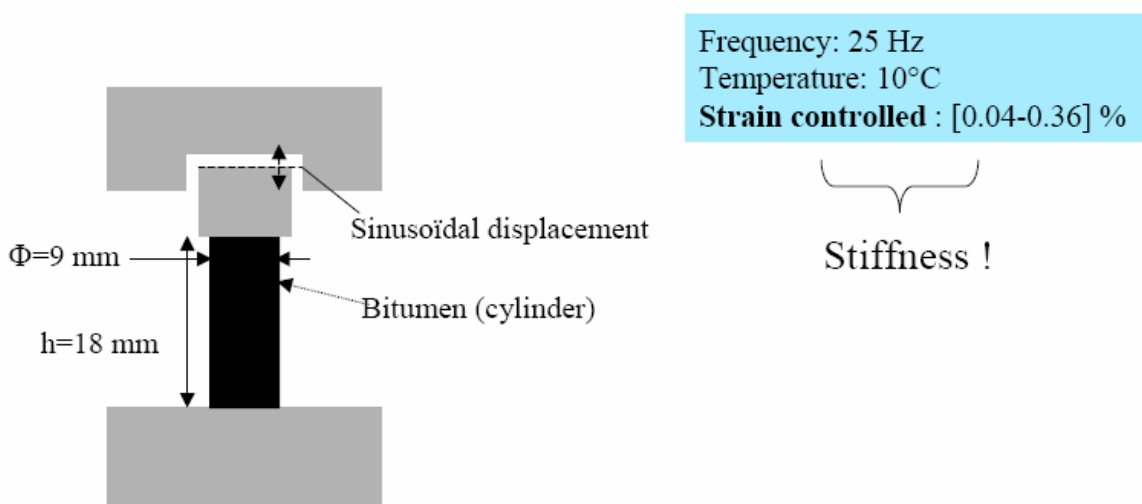


Rysunek 18. Schemat badania zmęczenia lepiszcza metodą ścinania pierścieniowego

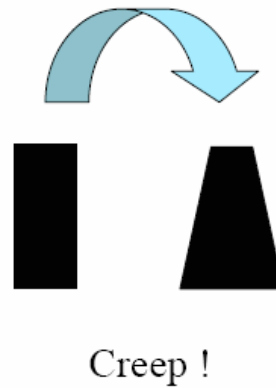
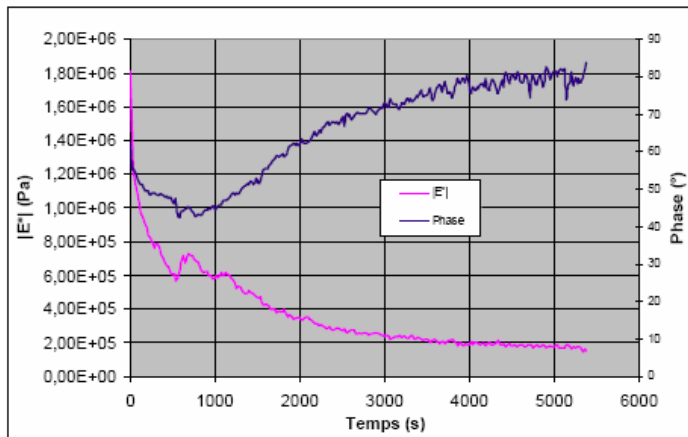


**Rysunek 19. Wyniki badania zmęczenia lepiszcza metodą ścinania pierścieniowego**

Metodę ściskania – rozciągania ilustruje rys. 20. Podstawowym problemem w tym badaniu jest możliwość płynięcia materiału trwałej deformacji kształtu i zakłócenia poprawności przebiegu badania, a tym samym uzyskania niepoprawnych wyników. Przedstawia to rys. 21.



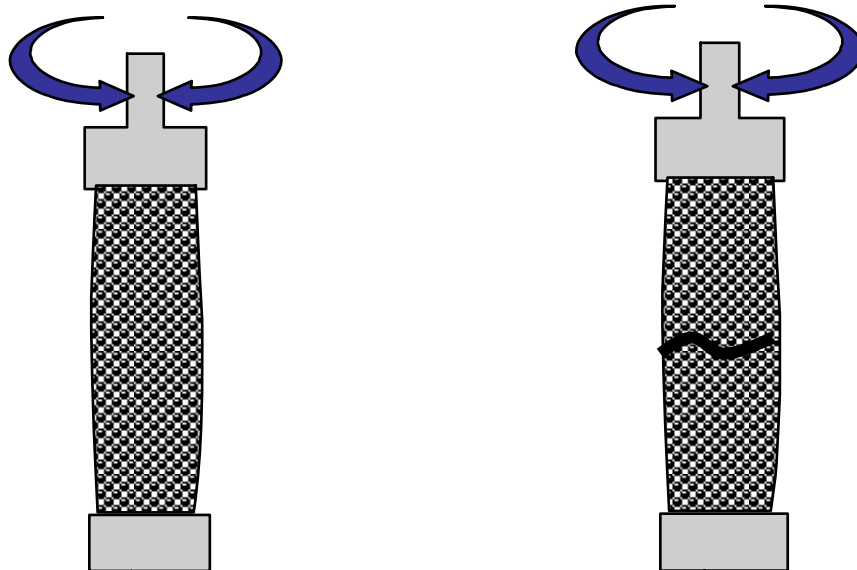
**Rysunek 20. Schemat badania zmęczenia lepiszcza metodą ściskania-rozciągania**



**Rysunek 21. Wyniki badania zmęczenia lepiszcza metodą ściskania – rozciągania zakłócone pełzaniem próbki i jej deformacją trwałą**

Zauważony efekt krawędziowy w badaniu ścinania w DSR przyczynił się do poszukiwania innych metod badania zmęczenia lepiszcza w USA. Jedną z propozycji jest badanie skręcania mieszanki piaskowo-asfaltowej. Badania te prowadzone są obecnie w zespole H. Bahii, Uniwersytet Wisconsin, USA.

Schemat badania i zniszczenia pokazuje rys. 22. Należy zauważyć, że badanie to nawiązuje do pionierskich prac Pella.



**Rysunek 22. Badanie zmęczenia próbki mieszanki piaskowo-asfaltowej metodą skręcania**

W badaniu tym wykorzystywana jest mieszanka asfaltu i piasku pochodzącego z jednego ściśle określonego źródła z okolic Ottawy, Kanada. Rys. 23 pokazuje formę i przygotowanie próbki.



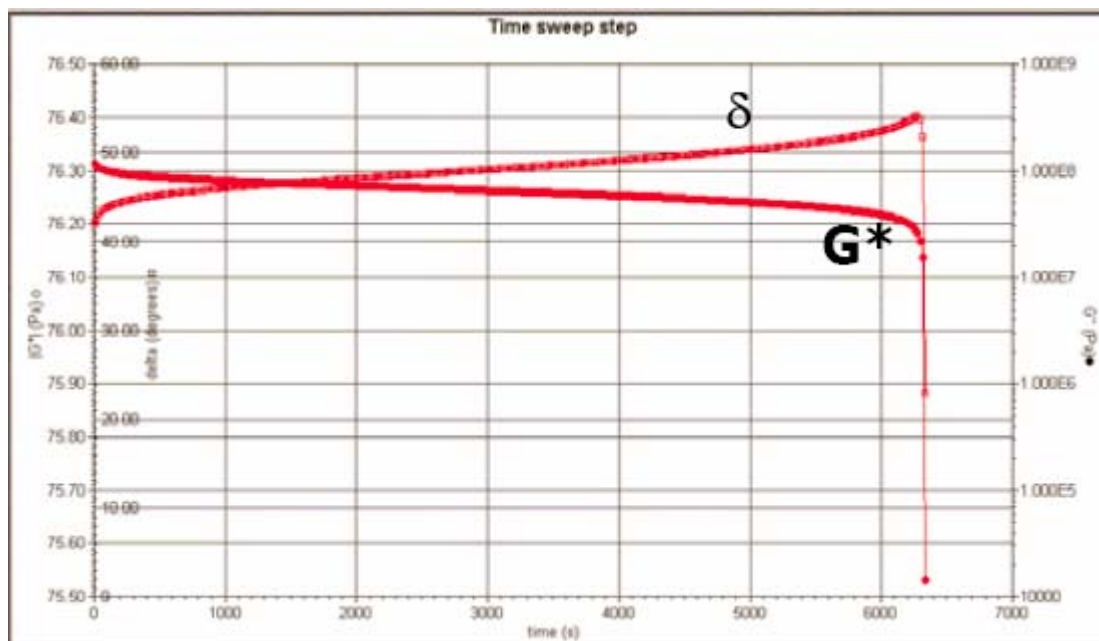
**Rysunek 23. Przygotowanie próbek mieszanki piaskowo-asfaltowej do badania zmęczenia metodą skręcania**



**Rysunek 24. Badanie zmęczenia metodą skręcania**



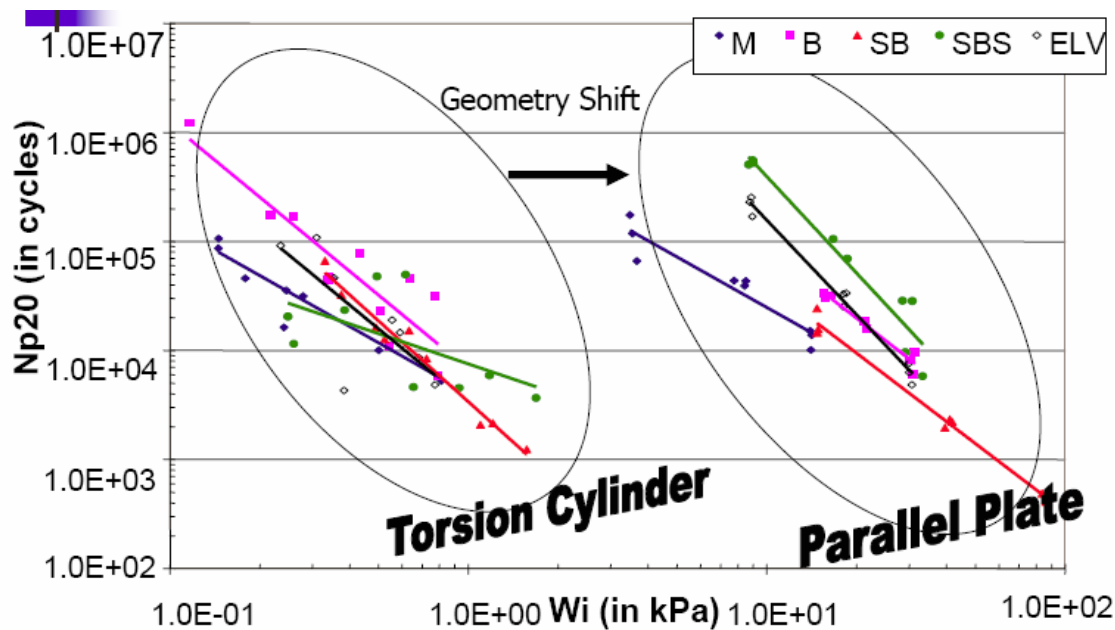
**Rysunek 25. Zniszczona próbka po badaniu zmęczenia metodą skręcania**



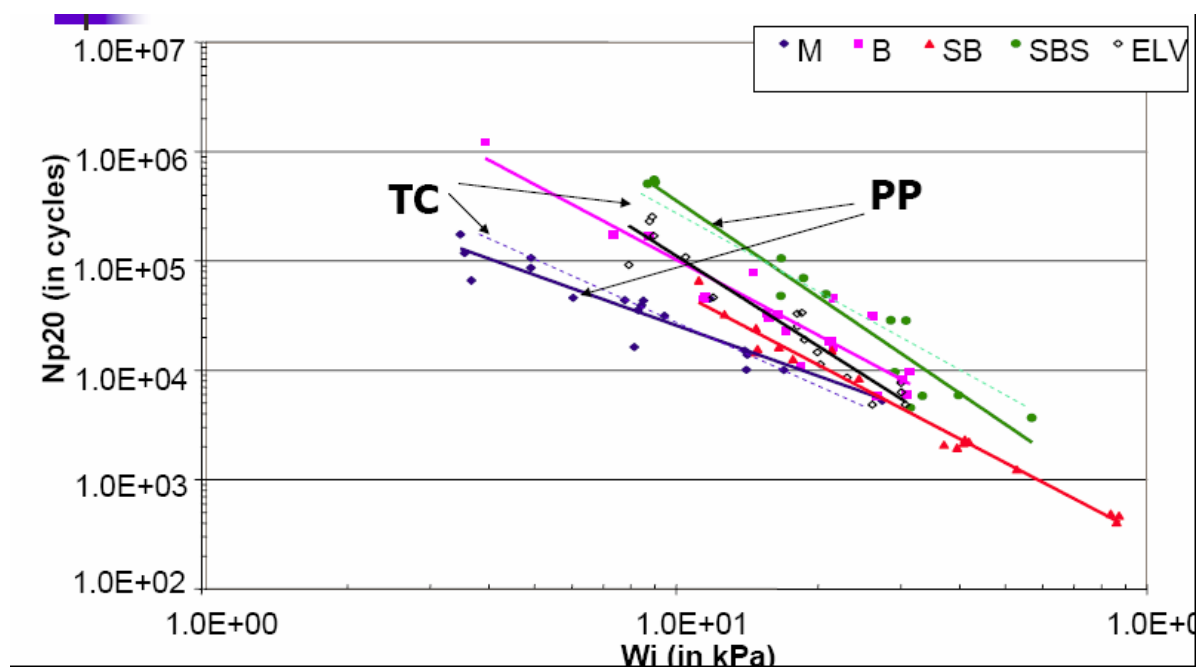
**Rysunek 26. Wyniki badania zmęczenia metodą skręcania (zmniejszenie modułu sztywności i zwiększenie kąta przesunięcia fazowego)**

Na rys. 24 i 25 przedstawiono badanie skręcania i zniszczoną próbkę. Ważne jest, aby pęknięcie nastąpiło w pobliżu środka próbki, a nie końca, gdzie może występować koncentracja naprężenia. Rys. 26 przedstawia przykład wyników badania, ilustrując zmianę (spadek) wartości modułu sztywności materiału i kąta przesunięcia fazowego.

W ramach projektu badawczego Bahii prowadzone są równocześnie badania ścinania lepiszczy w DSR. Poszukuje się korelacji wyników badania zmęczenia lepiszczy w DSR i zmęczenia mieszanek piaskowo-asfaltowych metodą skręcania. Rys. 27 i 28 pokazują przykład takiej zależności. Wykres na rys. 27 przedstawia wyniki przed przesunięciem, a na rys. 28 po przesunięciu z wykorzystaniem współczynnika wyznaczonego uzyskanych wyników. Wykresy te wskazują, że pomiędzy obiema metodami istnieje wyraźna korelacja, a zatem wyniki obu metod mogą być wiarygodnie porównywane.



**Rysunek 27. Wyniki badania zmęczenia lepiszcza w DSR i zmęczenia mieszanki piaskowo-asfaltowej w skręcaniu przed przesunięciem**



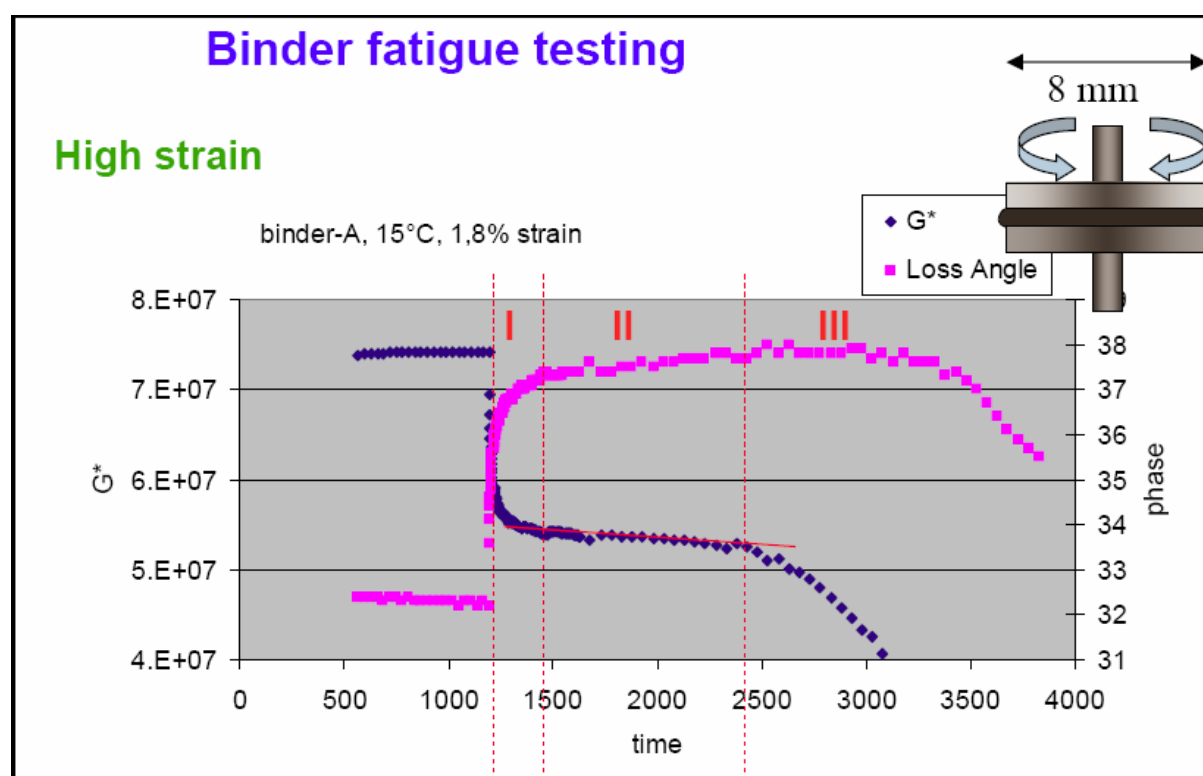
**Rysunek 28. Wyniki badania zmęczenia lepiszcza w DSR i zmęczenia mieszanki piaskowo-asfaltowej w skręcaniu po przesunięciu**

Z dokonanego przeglądu metod badawczych zmęczenia lepiszcza asfaltowego wynika, że najpowszechniej stosowaną metodą jest ścinanie w reometrze DSR. Badanie to ma największe szanse upowszechnienia ze względu na powszechną obecnie dostępność reometrów DSR w laboratoriach ośrodków badawczych, a należy się spodziewać, że w najbliższych latach także w laboratoriach kontrolnych. Przyczyną tego jest rozwój badań właściwości reologicznych lepiszczy (modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego) i wdrożeniu nowych norm lepiszczy drogowych po zakończeniu programu SHRP w USA. Stanowiło to impuls do

poszerzenia stosowania tych metod w Europie, gdzie przygotowywane są nowe normy lepiszczy drogowych, czego elementem jest wspomniany projekt BitVal.

Z dotychczasowych doświadczeń płynących z badań zmęczenia lepiszcza metodą ścinania w DSR wynikają ważne spostrzeżenia, które są brane pod uwagę w przygotowywaniu kolejnych projektów badawczych [36]. Należą do nich:

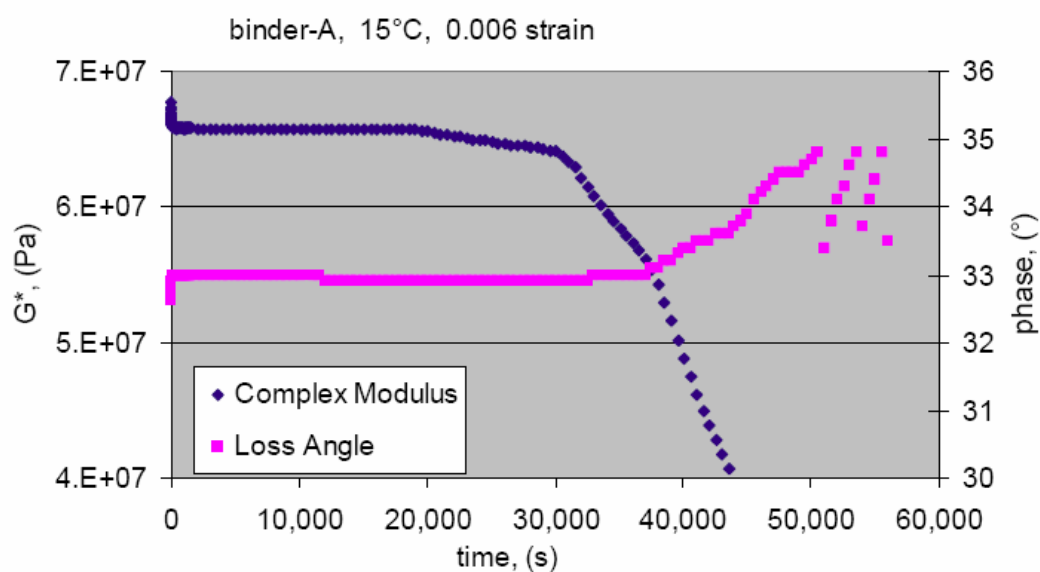
- w przebiegu badania zmęczenia lepiszcza wyróżnia się trzy fazy (rys. 29, 30):
  - o pierwsza, podczas której następuje gwałtowny spadek modułu sztywności lepiszcza  $G^*$  wskutek podwyższenia temperatury
  - o druga, faza powolnego spadku modułu  $G^*$  wskutek osłabienia materiału
  - o trzecia faza końcowa szybszego spadku modułu  $G^*$  wskutek narastających mikrospekkań
- badanie można wykonać w trybie kontrolowanego odkształcenia lub naprężenia (rys. 31, 32)
- analizę wyników można przeprowadzić metodą konwencjonalną (uznając za moment zniszczenia próbki punkt, w którym moduł  $G^*$  uzyskuje wartość 50% wartości początkowej) lub metodą energetyczną (wyznaczając przebieg zmian energii rozproszonej w każdym cyklu obciążenia) (rys. 33, 34)
- wpływ historii termicznej i starzenia lepiszcza
- należy brać pod uwagę temperaturę badania i sztywność (podatność) aparatu (rys. 35).



**Rysunek 29. Przebieg zmęczenia lepiszcza w ścinaniu w DSR z dużym odkształceniem**

## Binder fatigue testing

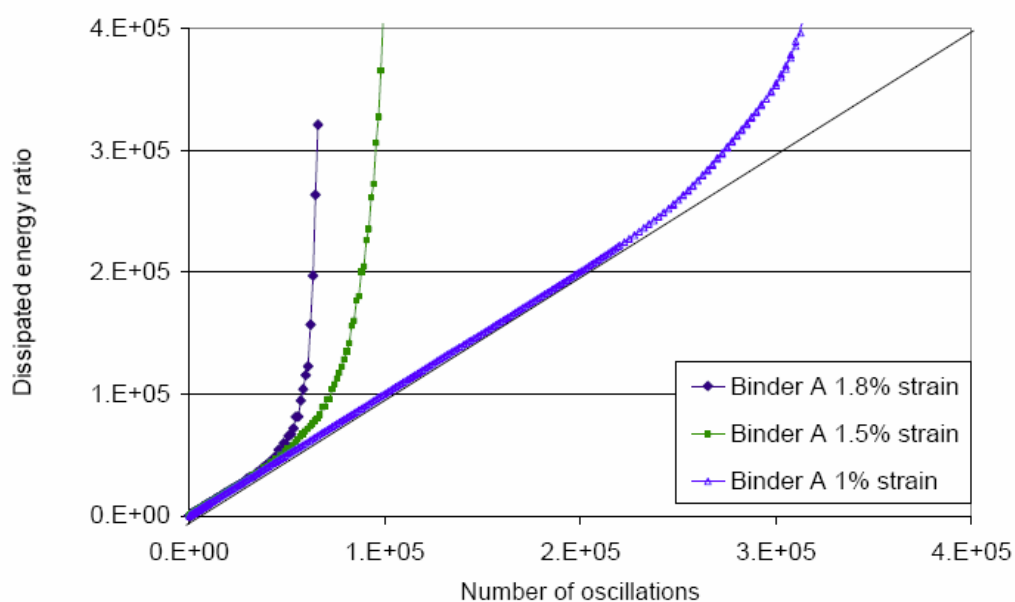
### Low strain



Rysunek 30. Przebieg zmęczenia lepiszcza w ścinaniu w DSR z małym odkształceniem

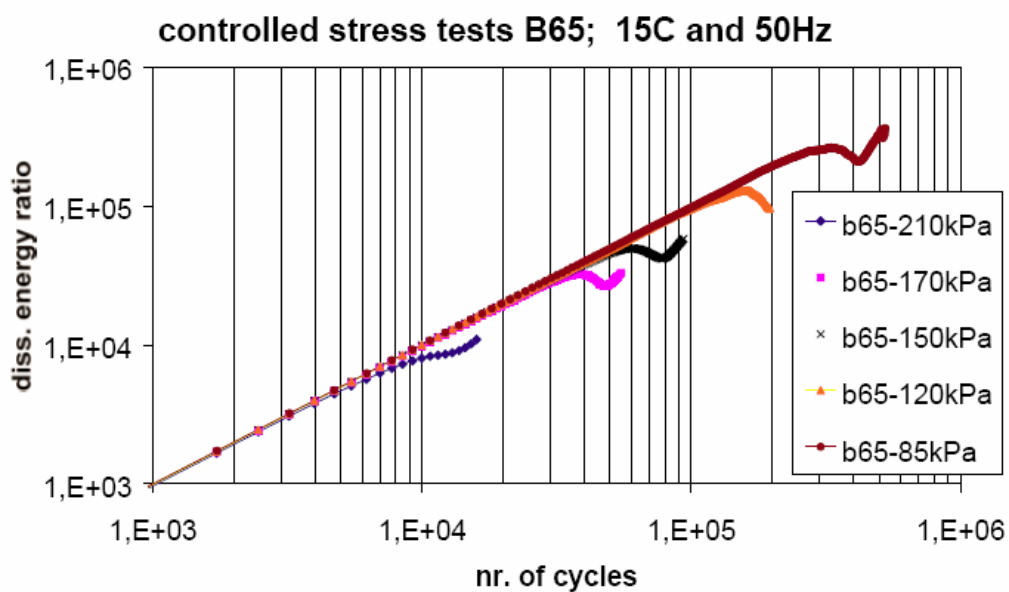
## Binder fatigue testing

### Controlled strain tests



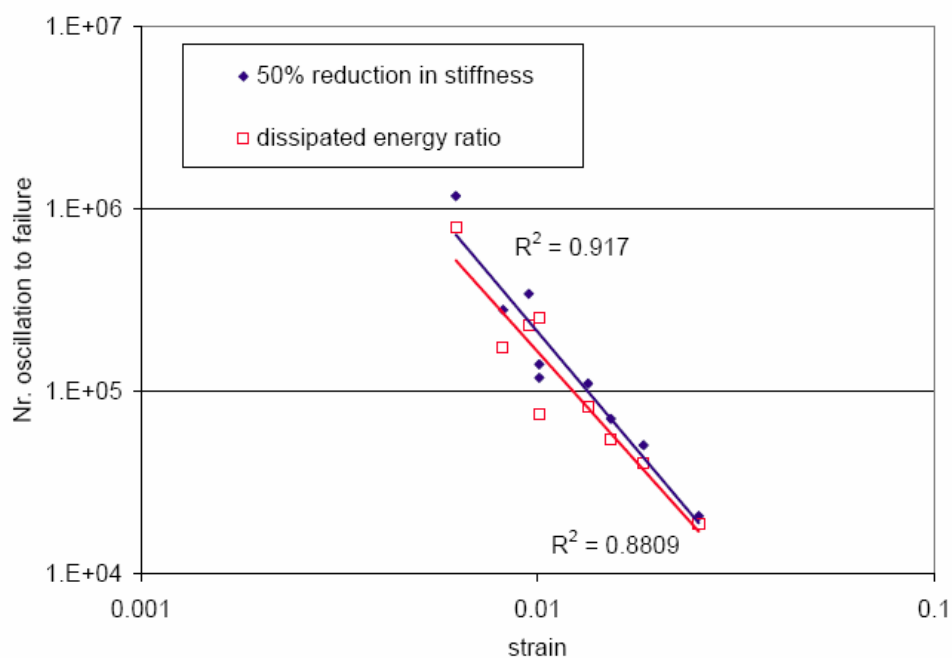
Rysunek 31. Badanie zmęczenia lepiszcza w DSR w trybie kontrolowanego odkształcenia

## Binder fatigue testing



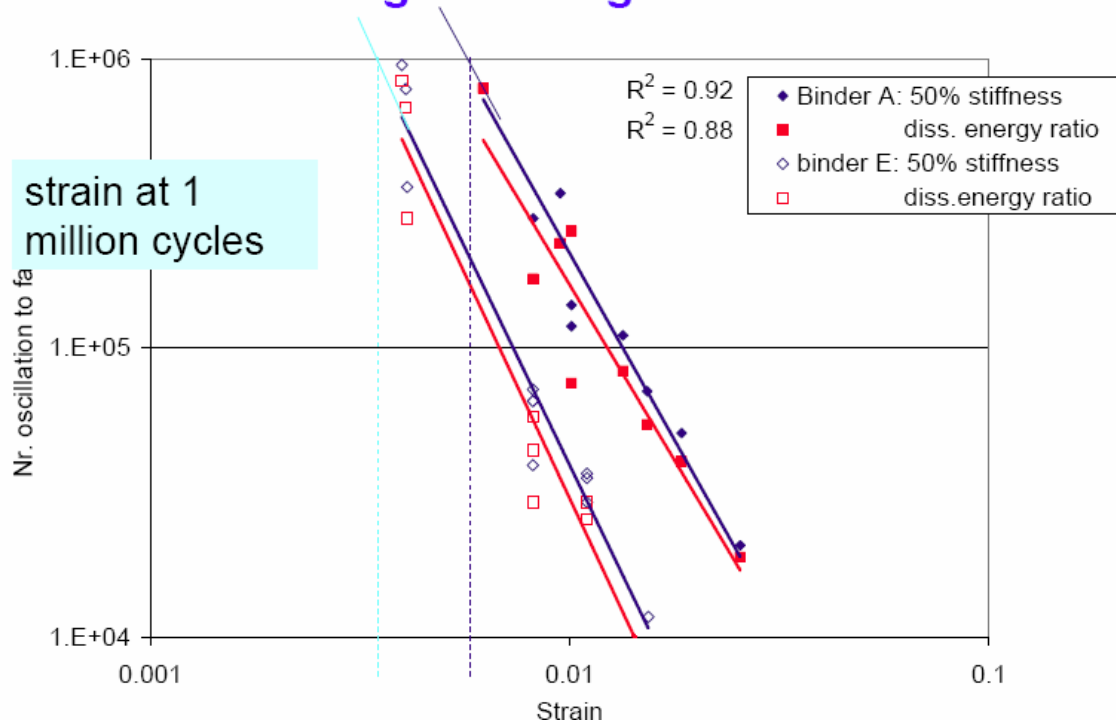
Rysunek 32. Badanie zmęczenia lepiszcza w DSR w trybie kontrolowanego naprężenia

## Binder fatigue testing



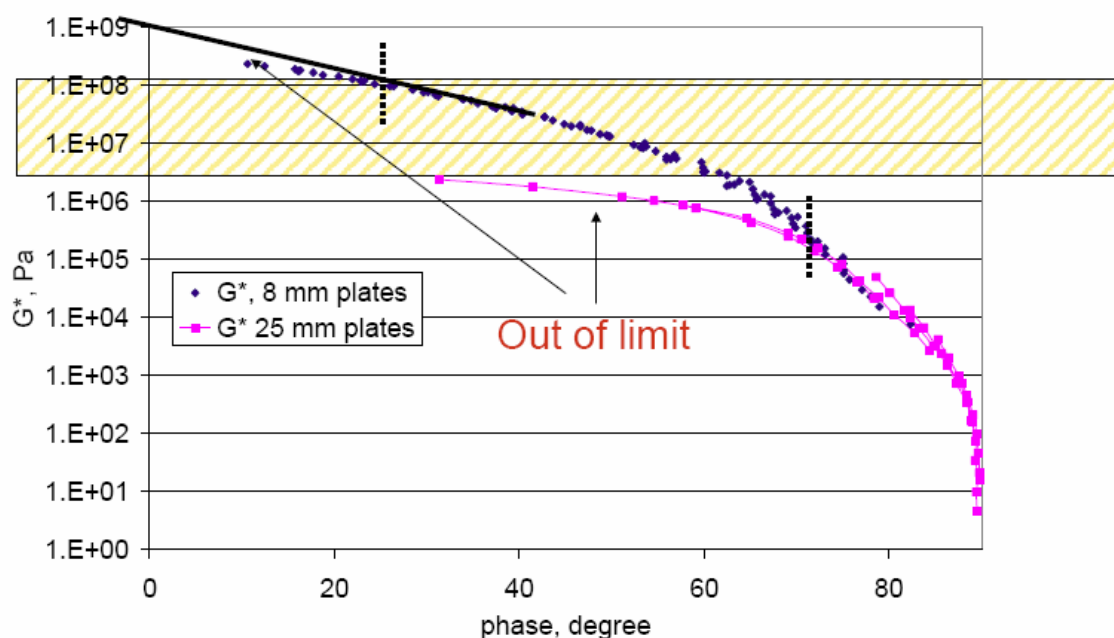
Rysunek 33. Porównanie charakterystyki zmęczeniowej lepiszcza według analizy metodą konwencjonalną lub metodą energetyczną

## Binder fatigue testing



Rysunek 34. Porównanie charakterystyki zmęczeniowej dwóch różnych lepiszczy według analizy metodą konwencjonalną lub metodą energetyczną

## Binder fatigue testing



Rysunek 35. Efekt wpływu podatności aparatu w niskiej temperaturze w badaniu lepiszcza w DSR (różowa linia)

Wśród ważnych nowych projektów badawczych dotyczących badania zmęczenia lepiszcza asfaltowego jest rozpoczęty projekt Komitetu Technicznego TC 206 ATB RILEM (Międzynarodowego Stowarzyszenia Laboratoriów Badawczych)

Materiałowych). Projekt oznaczony jako RRBFT został przygotowany przez Grupę Celową TG1 Lepszcza, pod kierunkiem przez D. Sybilskiego i obejmuje międzylaboratoryjne badania zmęczenia lepiszczy asfaltowych oraz badania porównawcze lepiszczy innymi metodami badawczymi, jak również badania zmęczenia mastyksów asfaltowych, mieszanek piaskowo-asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych. W załączeniu przedstawiono procedurę badawczą zmęczenia lepiszcza metodą ścinania w DSR opracowaną w ramach tego projektu.

## **5. Badania wybranych lepiszczy asfaltowych i polimeroasfaltowych**

### **Badania wstępne w laboratorium IBDiM**

Pierwsze próby wykonania badań zmęczenia lepiszczy asfaltowych przeprowadzono w IBDiM w reometrze Carri-Med (fot. 4) używanym w laboratorium IBDiM od połowy lat 1990-tych. Reometr ten spełniał wymagania stosunkowo prostych warunków badania po obciążeniu cyklicznym sinusoidalnym lepiszczy asfaltowych do oznaczenia modułu zespolonego i kąta przesunięcia fazowego. Aczkolwiek uzyskiwane wyniki wykazywały znaczny rozrzut, a generowane krzywe wiodące wykazywały znaczne rozproszenie punktów.



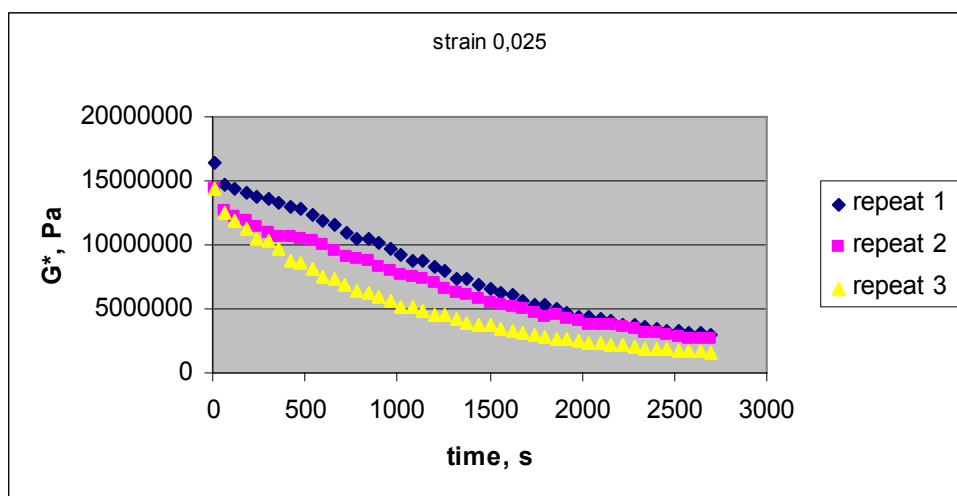
**Fot. 4 Reometr dynamicznego ścinania DSR CarriMed TA Instruments w laboratorium IBDiM**



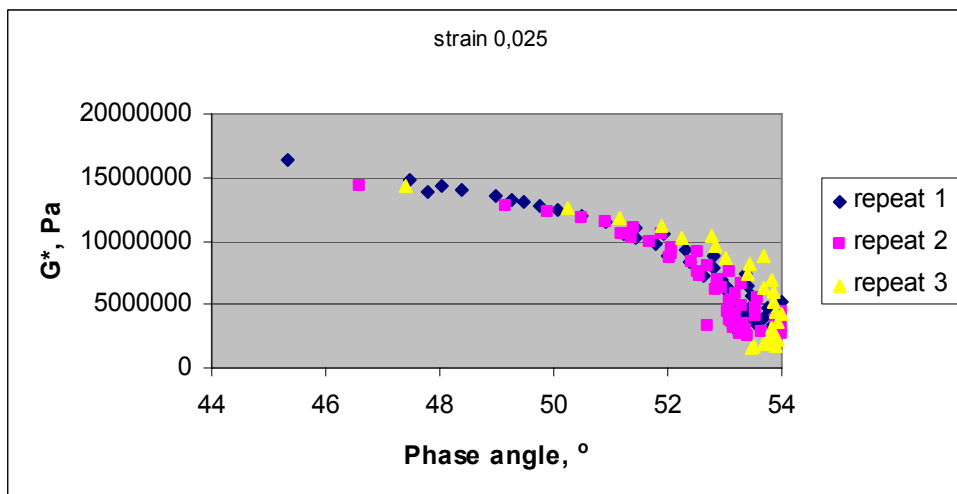
**Fot. 5 Reometr dynamicznego ścinania DSR MARS Haake w laboratorium IBDiM**

Wykonanie bardziej zaawansowanych badań, np. zmęczenia lepszycy, wymagało nowocześniejszego sprzętu badawczego – nowego DSR.

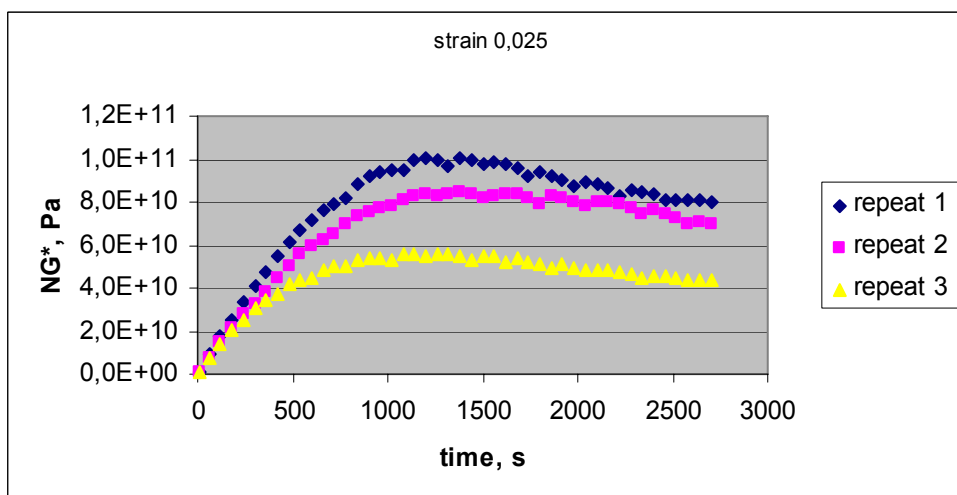
Badania wstępne w IBDiM wykonano w nowym reometrze Haake MARS (fot. 5). Do badań wstępnych użyto asfaltu zwykłego 50/70 PKN Orlen. Ilustrację tych wyników badań stanowią wykresy zależności modułu zespolonego  $G^*$  i kąta przesunięcia fazowego od czasu przy założonym odkształceniu 0,025, 0,018, 0,008. Odrębne wykresy ilustrują zmianę odkształcenia i naprężenia w czasie badania.



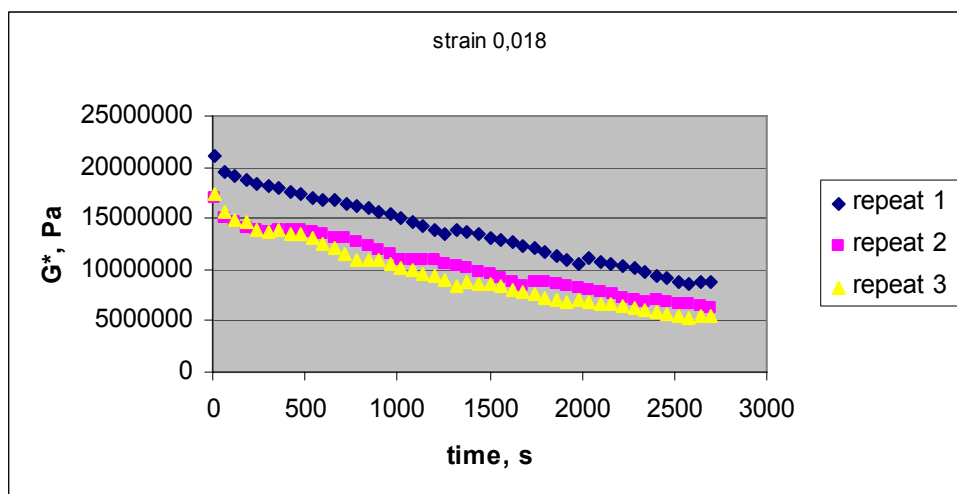
**Rysunek 36. Zależność modułu zespolonego  $G^*$  od czasu w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,025 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



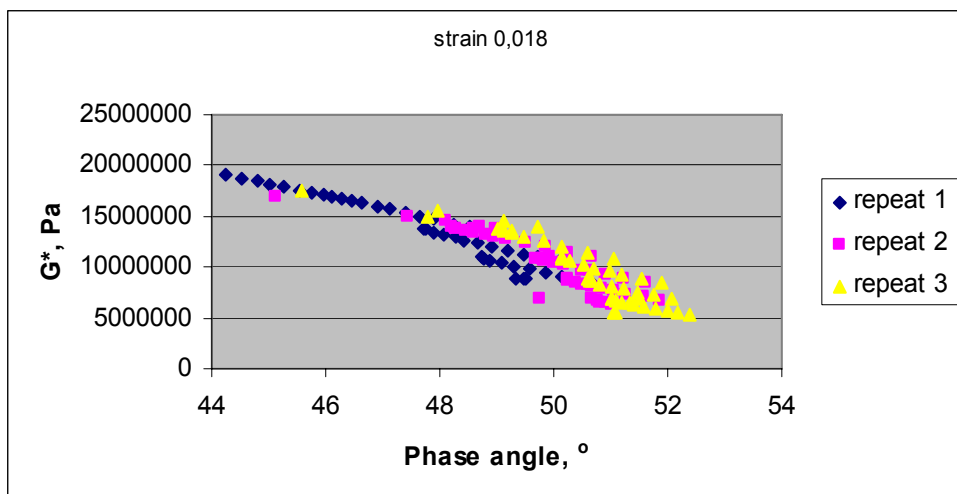
**Rysunek 37. Zależność modułu zespolonego  $G^*$  od kąta przesunięcia fazowego w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,025 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



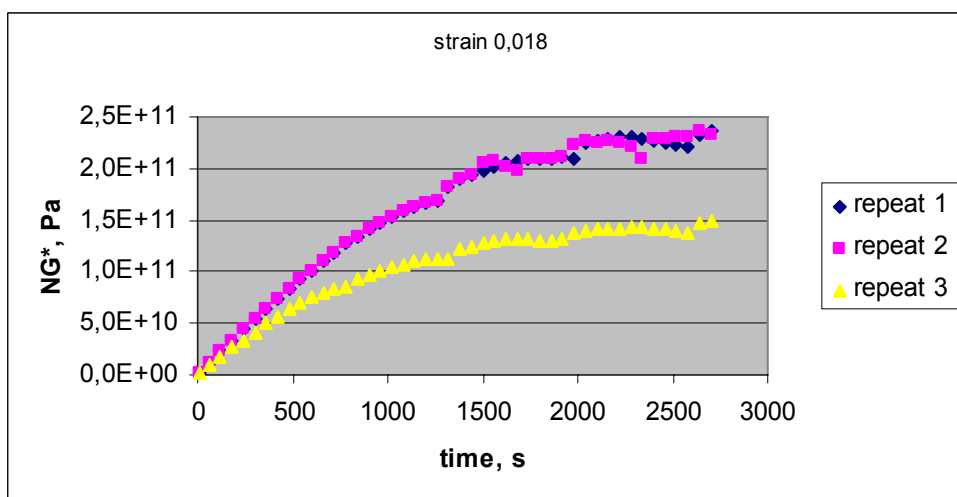
**Rysunek 38. Zależność wskaźnika energii rozproszonej od czasu w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,025 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



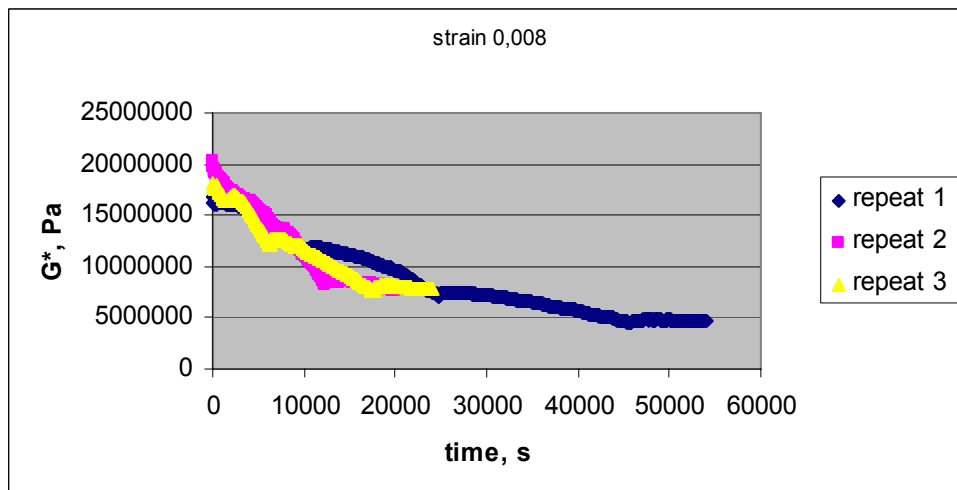
**Rysunek 39. Zależność modułu zespolonego  $G^*$  od czasu w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,018 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



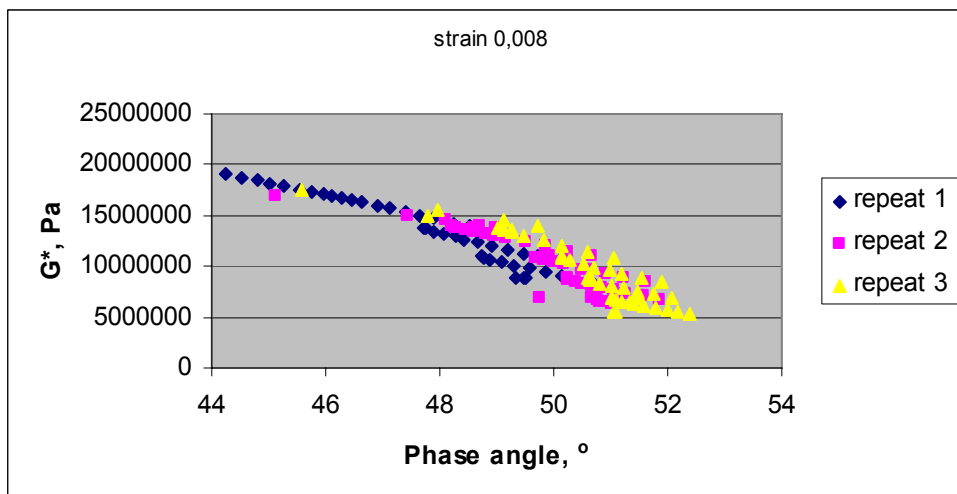
**Rysunek 40. Zależność modułu zespolonego  $G^*$  od kąta przesunięcia fazowego w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,018 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



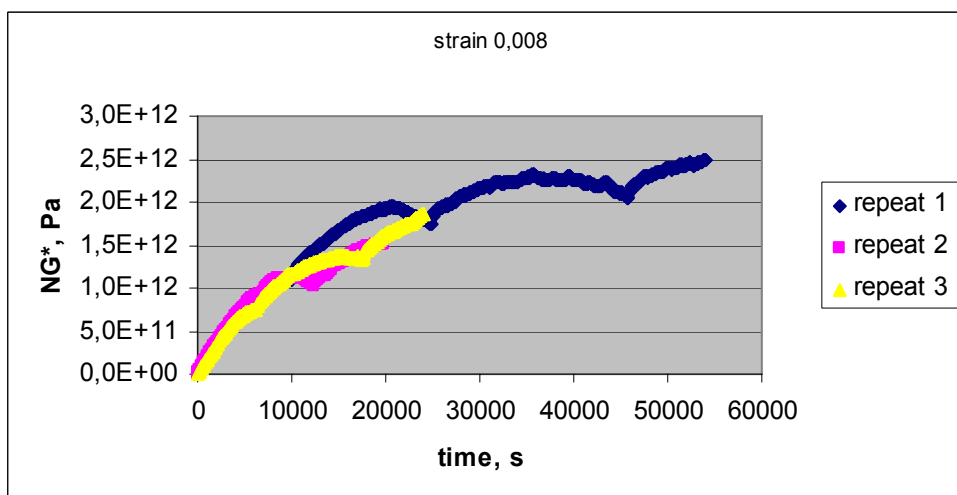
**Rysunek 41. Zależność wskaźnika energii rozproszonej od czasu w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,018 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



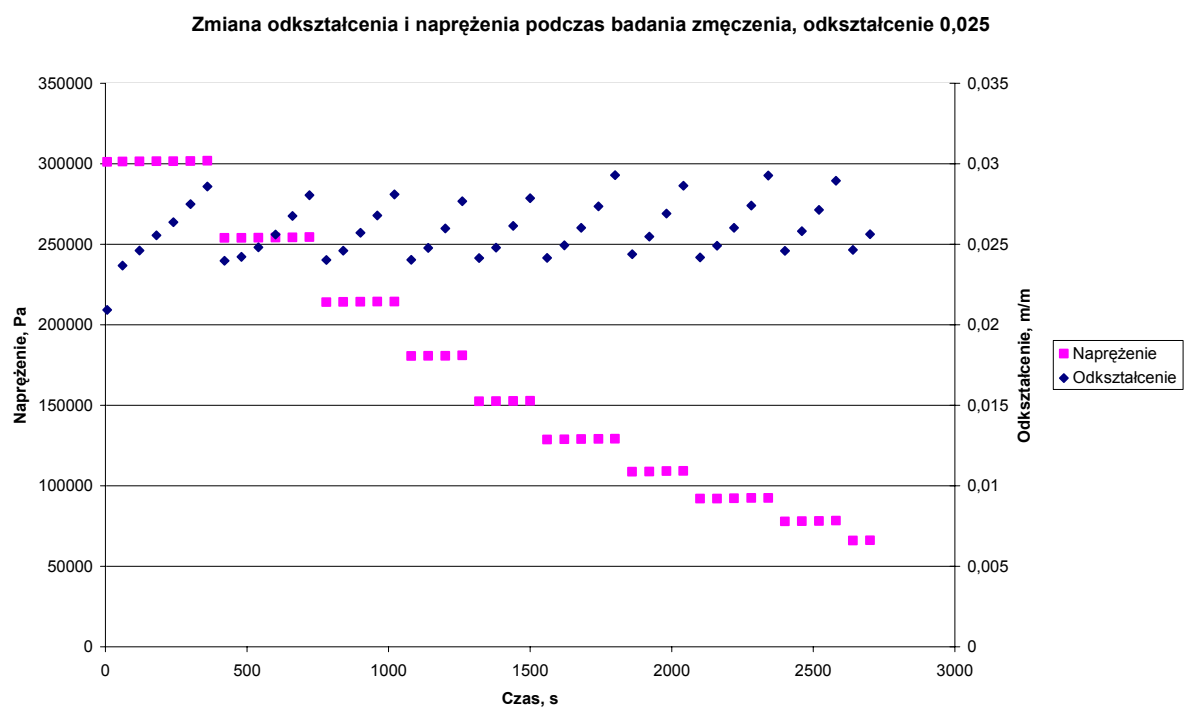
**Rysunek 42. Zależność modułu zespolonego  $G^*$  od czasu w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,008 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



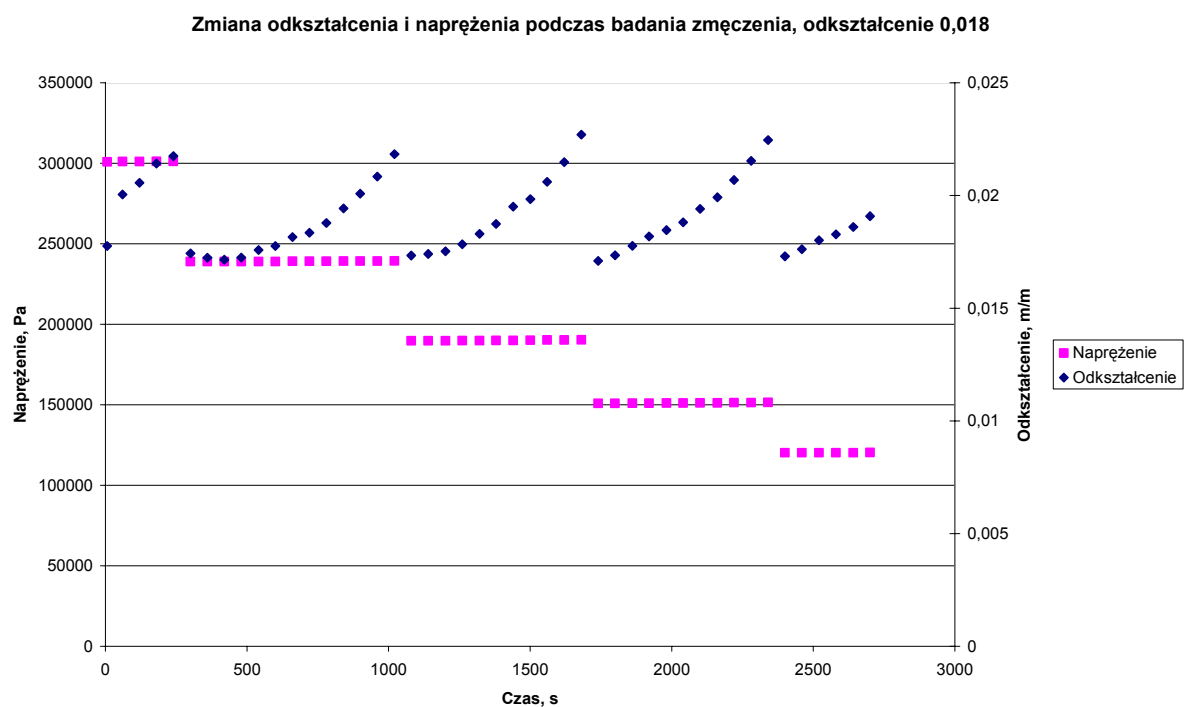
**Rysunek 43. Zależność modułu zespolonego  $G^*$  od kąta przesunięcia fazowego w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,008 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



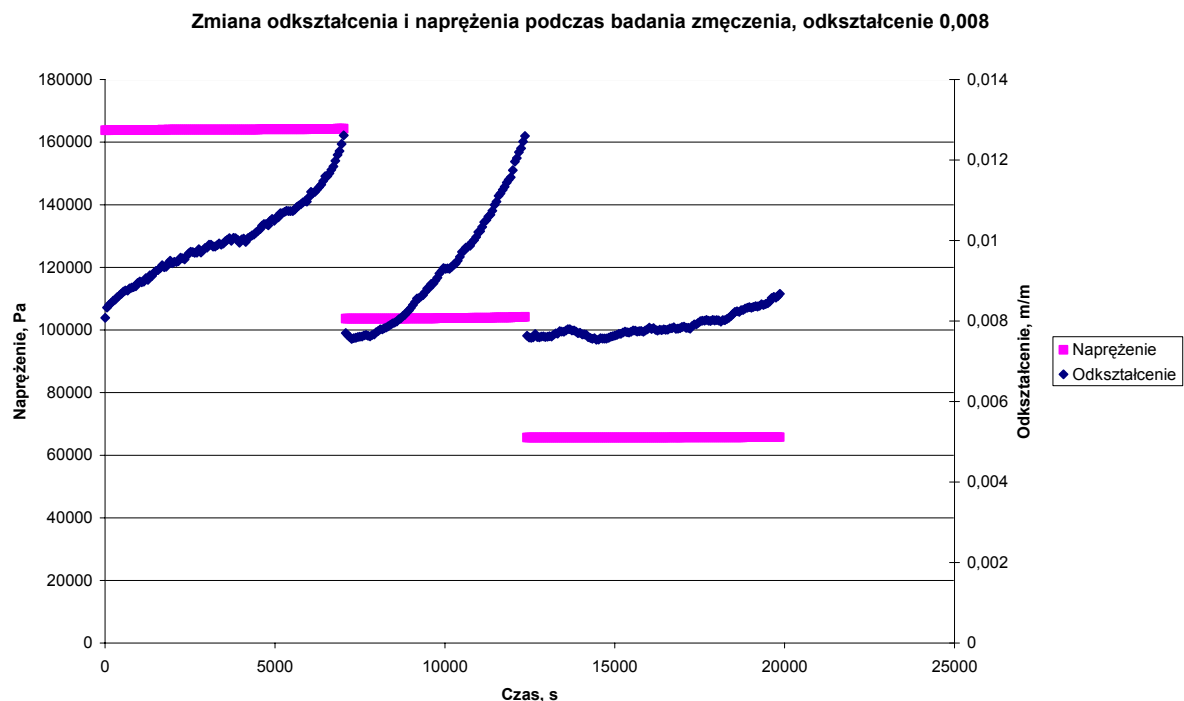
**Rysunek 44. Zależność wskaźnika energii rozproszonej od czasu w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,008 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



**Rysunek 45. Zmiana naprężenia i odkształcenia w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,025 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



**Rysunek 46. Zmiana naprężenia i odkształcenia w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,025 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**



**Rysunek 47. Zmiana naprężenia i odkształcenia w badaniu zmęczenia w DSR przy odkształceniu 0,025 m/m, asfalt 50/70 PKN Orlen**

Wykresy zmiany odkształcenia w czasie badania zmęczenia (rys. 45-47) wskazują na nieprawidłowość zadanych warunków badania – odkształcenie powinno być stałe w przyjętym trybie kontrolowanego odkształcenia.

Uzyskane w badaniach wstępnych w laboratorium IBDiM wyniki nie pozwalały na kontynuowanie prac. Okazało się, że przyczyną tych nieprawidłowości były wady programu sterującego reometrem. Dalsze badania wstępne były wykonane po poprawkach wniesionych do programu sterującego. Ocena tych wyników była pozytywna.

Przystąpienie do właściwych badań próbek lepiszczy w ramach badań międzylaboratoryjnych RILEM nastąpiło po uzyskaniu pewności poprawności wykonywanych badań i uzyskiwanych wyników. Nieduża wielkość próbek lepiszczy nakazywała ostrożność w ich użyciu.

## 6. Badania zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych z wybranymi lepiszczami asfaltowymi i polimeroasfaltowymi

Do badań przygotowano jedną mieszankę mineralno-asfaltową beton asfaltowy drobnoziarnisty z trzema lepiszczami wybranymi do badań zmęczenia. Mieszanki były zaprojektowane i sporządzone w laboratorium LCPC Nantes, Francja. Mieszanki oznaczono F10, F20, F30. Nie ujawniono lepiszcza zawartego w poszczególnych mieszankach.

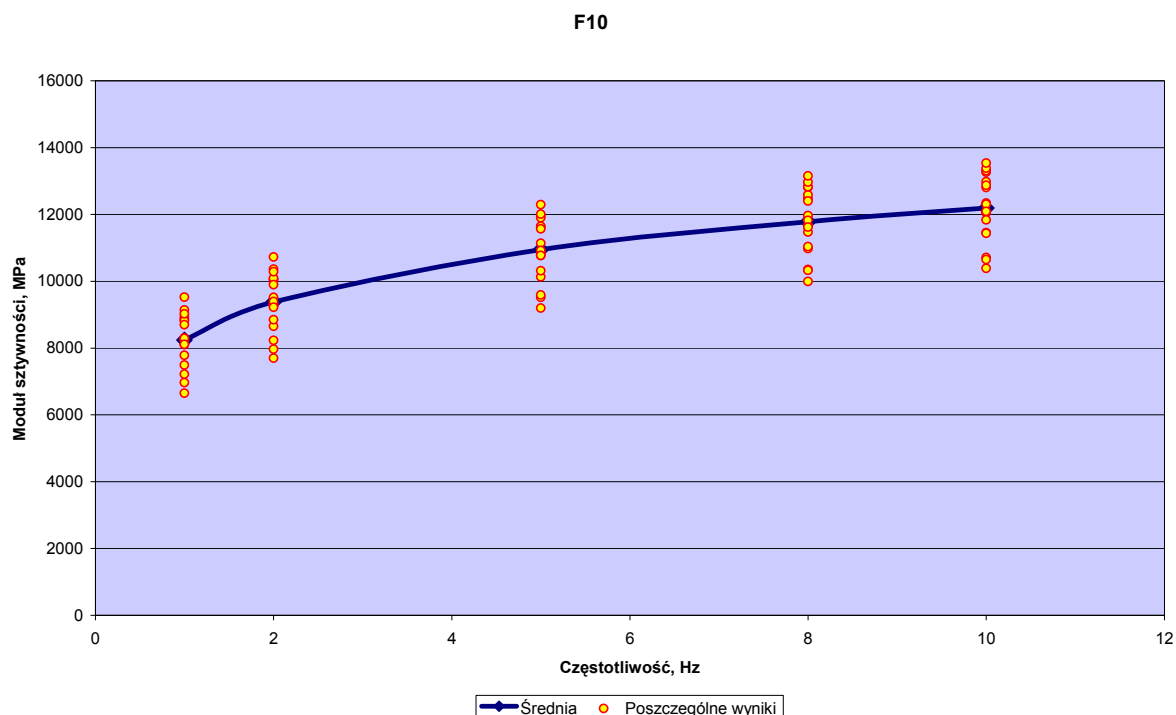
Z mieszanek wykonano w LCPC Nantes płyty, które przestano do laboratorium IBDiM. Tu z płyt wycięto próbki prostopadłościennne do badań zmęczenia.

Warunki badania zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych przyjęto następujące:

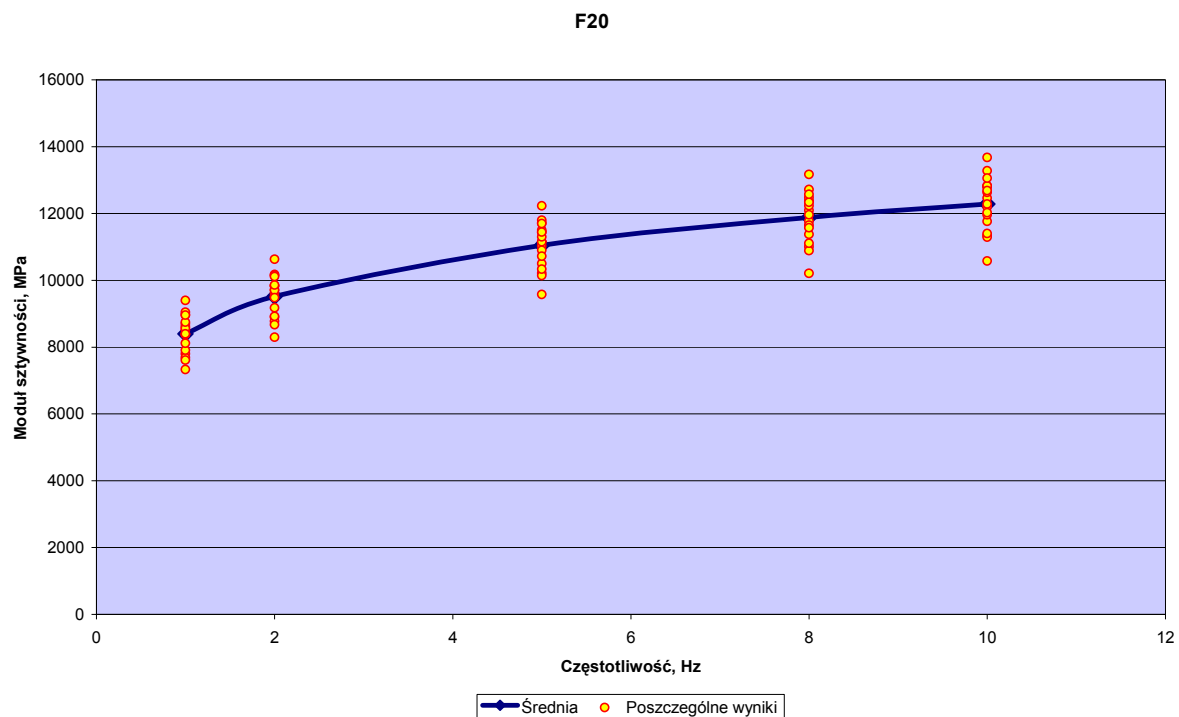
- metoda 4PB czteropunktowego zginania belki prostopadłościennnej
- temperatura 10°C
- częstotliwość obciążenia 10 Hz
- warunki stałego odkształcenia
- każda mieszanka badana przy 3 poziomach odkształcenia, po 6 próbek w tych samych warunkach.

Zbadano po 18 próbek każdej mieszanki, czyli łącznie 54 próbki.

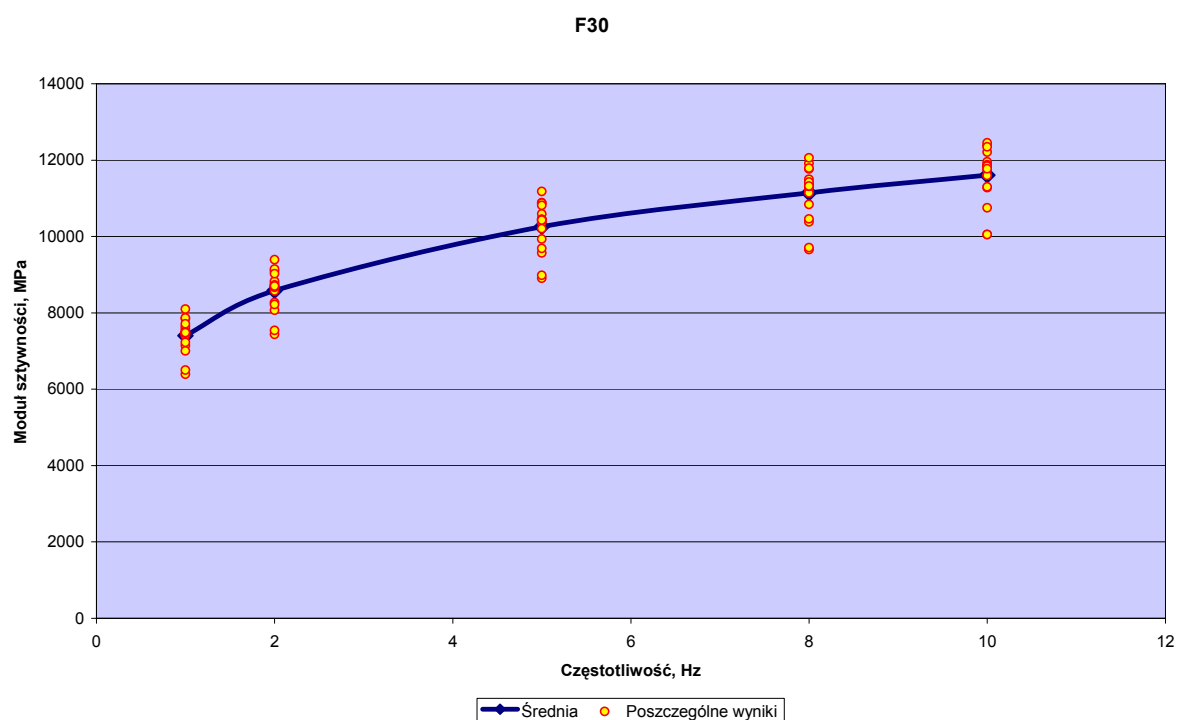
W badaniu wstępnym oznaczano wartość zespolonego modułu sztywności mieszanki w 10°C. Na rys. 48-50 przedstawiono moduł w funkcji częstotliwości obciążenia poszczególnych mieszanek, a na rys. 51 ich porównanie. Na rys. 52 przedstawiono porównanie kąta przesunięcia fazowego mieszanek.



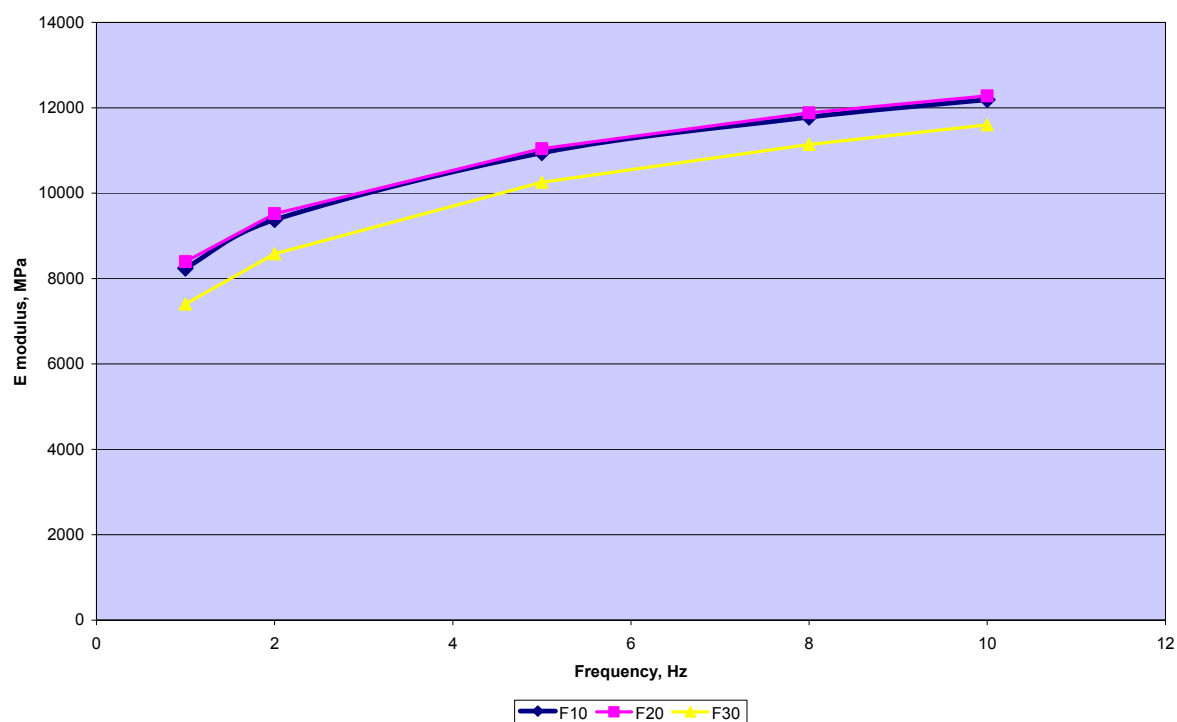
**Rysunek 48. Zespolony moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej F10 w 10°C**



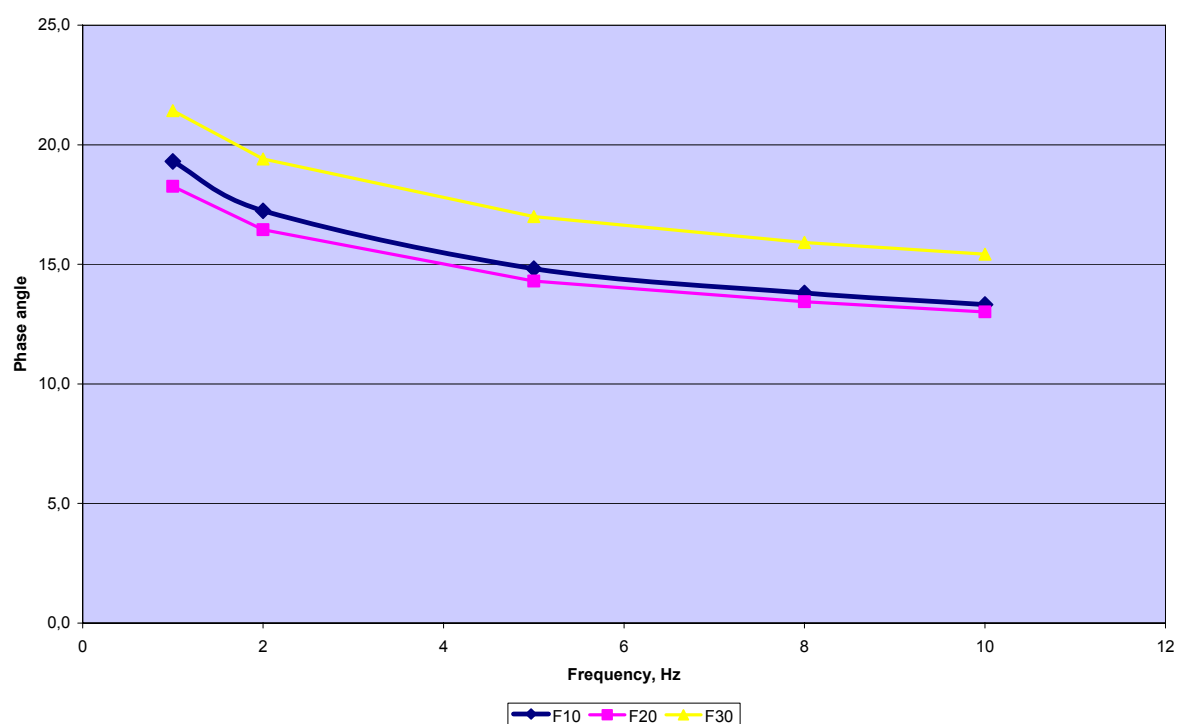
**Rysunek 49. Zespolony moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej F20 w 10°C**



**Rysunek 50. Zespolony moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej F30 w 10°C**



**Rysunek 51. Porównanie zespolonego modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych w 10°C**



**Rysunek 52. Porównanie kąta przesunięcia fazowego mieszanek mineralno-asfaltowych w 10°C**

W tabelicy 1 zestawiono średnie wartości odkształcenia podczas badania poszczególnych mieszanek.

**Tablica 1. Średnie odkształcenie w badaniu zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych**

| Mieszanka | Odształcenie, $\mu\text{m/m}$ |
|-----------|-------------------------------|
| F10       | 149                           |
|           | 192                           |
|           | 244                           |
| F20       | 185                           |
|           | 216                           |
|           | 322                           |
| F30       | 155                           |
|           | 190                           |
|           | 219                           |

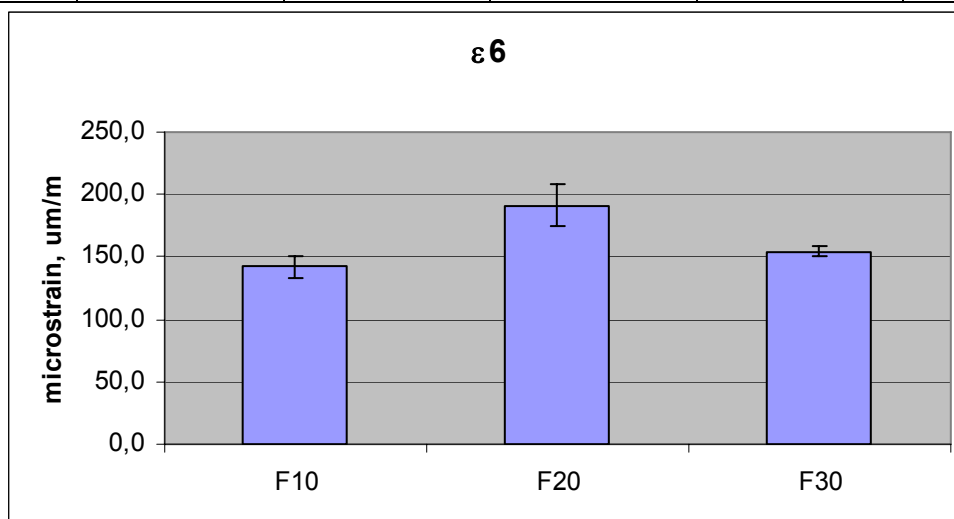
Na podstawie badań zmęczenia opracowano charakterystykę zmęczeniową każdej z trzech mieszanek według równania Wohlera:

$$N = A \cdot \varepsilon^b \quad \text{Równanie 13}$$

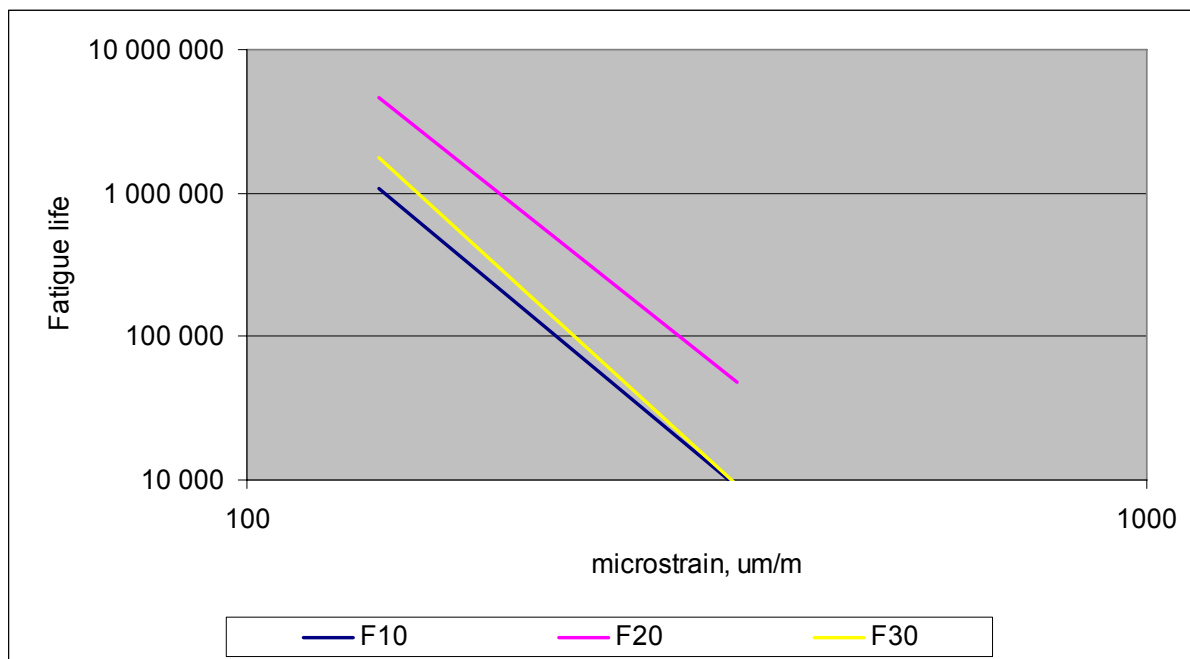
Zestawienie parametrów równania Wohlera A i b wraz z obliczonymi  $\varepsilon_6$  (odkształcenie, przy którym liczba obciążeń do zniszczenia wynosi 1 milion) oraz jego wartościami maksymalną i minimalną przy poziomie ufności 95% przedstawia tablica 2, a rys. 53 i 54 porównanie odpowiednio  $\varepsilon_6$  i charakterystyki zmęczeniowej mieszanek.

**Tablica 2. Parametry charakterystyki zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych**

| Mieszanka | b     | A        | $\varepsilon_6$ | max $\varepsilon_6$ | min $\varepsilon_6$ |
|-----------|-------|----------|-----------------|---------------------|---------------------|
| F10       | -5,25 | 2,02E+17 | 142,2           | 151,4               | 133,7               |
| F20       | -4,99 | 2,33E+17 | 190,4           | 207,9               | 174,3               |
| F30       | -5,73 | 3,54E+18 | 154,3           | 158,3               | 150,3               |



**Rysunek 53. Porównanie  $\varepsilon_6$  mieszanek mineralno-asfaltowych w badaniach RILEM**



**Rysunek 54. Porównanie charakterystyki zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych**

## **7. Przygotowanie i wykonanie badań międzylaboratoryjnych lepiszczy**

### **Przygotowanie**

Przygotowanie badań międzylaboratoryjnych obejmowało:

- wybór metody badawczej
- wybór lepiszczy do badań i wykonanie badań przygotowawczych
- określenie warunków wykonania badań zmęczenia
- opracowanie procedury badania zmęczenia lepiszcza asfaltowego w reometrze ścinania dynamicznego DSR
- przygotowanie i rozesłanie zaproszenia do udziału laboratoriów w badaniach międzylaboratoryjnych.

Wybraną metodą badawczą jest badanie ścinania w reometrze ścinania dynamicznego DSR w systemie płytka-płytki.

Do badań wybrano trzy lepiszcza:

- lepiszcze A - asfalt zwykły 50/70 z zasobów LCPC, Francja - podobny asfalt używany był w wykonanych w ramach wcześniejszego projektu RILEM TC PEB badań międzylaboratoryjnych zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych
- lepiszcze B - asfalt zwykły 50/70 Nynas – asfalt tego samego rodzaju jak lepiszcze A, lecz o innych właściwościach reologicznych
- lepiszcze C – elastomeroasfalt Elf – Total, przygotowany w laboratorium w Lyon, Francja.

Warunki badania lepiszczy ustalono na podstawie wniosków z badań wstępnych wykonanych w laboratoriach przygotowujących lepiszcza LCPC, Nynas, Elf-Total.

Warunki badania włączono do procedury badawczej przygotowanej do rozesłania wśród zgłoszonych uczestników badań międzylaboratoryjnych. Procedura badawcza w załączeniu (Załącznik 1).

### **Przebieg badań międzylaboratoryjnych RILEM**

Do badań międzylaboratoryjnych RILEM RRBFT zgłosiło akces uczestnictwa 23 laboratoria. Ich spis przedstawia załącznik 2.

Prócz badania zmęczenia lepiszcza asfaltowego zdecydowano wykonać badania zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych wykonanych z tymi lepiszczami. Do tych badań zgłosiły się dwa laboratoria: LCPC, Francja (badanie metodą dwupunktowego zginania) oraz IBDiM, Polska (badanie metodą czteropunktowego zginania). Próbkę mieszanek zostały sporządzone w LCPC. Wyniki badań IBDiM przedstawiono w rozdziale 5 niniejszego sprawozdania. LCPC nie dostarczyło dotychczas wyników swoich badań zmęczenia mieszanek, jak i lepiszczy.

Kilku uczestników zgłosiło chęć wykonania dodatkowych badań z zastosowaniem innych metod badawczych (obok badania DSR, a w jednym wypadku jedynie).

Dodatkowe metody badawcze to:

- ścinanie pierścieniowe (*annular shearing*), LCPC, Francja

- skręcanie próbki mieszanki piaskowo-asfaltowej (*Torsion cylinder test on sand-binder mixture*) UWiscconsin, H. Bahia,
- ścinanie pierścieniowe próbki mastyksu asfaltowego (wypełniacz + asfalt) (*annular shearing*), ENTPE, H. di Benedetto, wyłącznie to badanie dodatkowe.

W końcu maja 2007 stan zaawansowania badań zmęczenia lepiszczy metodą ścinania DSR jest następujący (załącznik 3):

- 10 laboratoriów zakończyło badania lepiszczy i przekazało wyniki badań, w tym:
  - o wyniki badań 9 laboratoriów można uznać za akceptowalne (tj. do wykorzystania w analizie)
  - o wyniki badań 1 laboratorium uznano za nieakceptowalne
- 1 laboratorium powiadomiło o zakończeniu badań, a wyniki prześle po wprowadzeniu ich do specjalnie w tym celu przygotowanym arkuszu MS Excel
- 5 laboratoriów prawdopodobnie nie zakończy badań
- 7 laboratoriów nie przekazało informacji o zaawansowaniu badań.

Uwagi o uzyskanych wynikach badań zmęczenia lepiszczy metodą ścinania w DSR:

- Niektóre laboratoria nie stosowały się do przekazane procedury badawczej, np. badanie zakończono po upływie pewnego ustalonego przez wykonawcę czasu (np. 2150 s), czyli wcześniej niż określono w procedurze, a więc nie spełniono warunku zakończenia badania, gdy moduł sztywności lepiszcza zmaleje do 80% wartości początkowej
- Znaczny rozrzut wyników badań pomiędzy laboratoriami i w ramach jednego laboratorium, nawet używając podobne reometry (np. Paar Physica MSR 500 lub MSR 501)
- Powszechny problem w użyciu reometru Bohlin (odkształcenie znacznie odbiegające od założonej wartości) lub reometru CarriMed (niedostatki oprogramowania)
- W niektórych wypadkach moduł zespolony wzrastał w czasie badania, a dopiero w końcu badania malał
- Badanie zmęczenia lepiszcza elastomerowo-asfaltowego nie mogło być przeprowadzone z najmniejszym założonym odkształceniem – nie uzyskano granicy kończącej badanie (80% modułu początkowego).

## 8. Wyniki badań i analiza

W załączniku 4 na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki badań uzyskane w poszczególnych laboratoriach. Uwzględniono wyniki laboratoriów A, B, G, J, K, L, N, P, T.

Po analizie wstępnej wyniki laboratorium G i L uznano za nieakceptowalne, a przedstawiono je w celach porównawczych.

Uzyskane wyniki badań zależności modułu sztywności ścinania  $G^*$  oraz kąta przesunięcia fazowego  $\delta$  wykorzystano do wyznaczenia charakterystyki zmęczeniowej badanych lepiszczy. Zastosowano dwie metody badawcze:

- konwencjonalną

- energetyczną.

Obie metody opisano wcześniej.

Wynikami analizy są:

- moduł sztywności ścinania  $G^*$  i kąt przesunięcia fazowego  $\delta$
- liczba obciążeń do zniszczenia  $N$  (w metodzie konwencjonalnej) lub  $N1$  (w metodzie energetycznej) przy różnym poziomie odkształcenia
- charakterystyka zmęzeniowa lepiszcza w postaci zależności trwałości zmęzeniowej od poziomu odkształcenia, wyrażona parametrami równania 14:  $A$ ,  $b$  wraz z oceną statystyczną w postaci współczynnika determinacji  $R^2$
- parametr  $\varepsilon_6$ .

Wyniki analizy zmęczenia przedstawiono w tablicach w Załączniku 5. Na rys. 55-69 przedstawiono wybrane wyniki badań.

Rys. 55 ilustruje wadliwe wyniki uzyskane w laboratorium G. Powodem jest niezdolność sprzętu DSR Bohlin do spełnienia warunków wymaganych w badaniu wielokrotnego obciążenia próbki asfaltu. Stosowany reometr nie pozwolił na utrzymanie stałego odkształcenia w długotrwałym badaniu. Podobne zjawisko występowało w IBDiM w starym reometrze CarriMed.

Wyniki laboratorium J badań tego samego asfaltu A (zwykłego) ilustrują różnicę między dobrym a złym sprzętem lub raczej odpowiednim i nieodpowiednim do badania zmęczenia (rys. 56). Trzeba wyraźnie podkreślić, że niektóre DSR, np. Bohlin, mogą być stosowane do prostego badania modułu sztywności lepiszcza, lecz badanie zmęczenia wymagające wielokrotnego, długotrwałego obciążenia powtarzalnego jest znacznie bardziej wymagające.

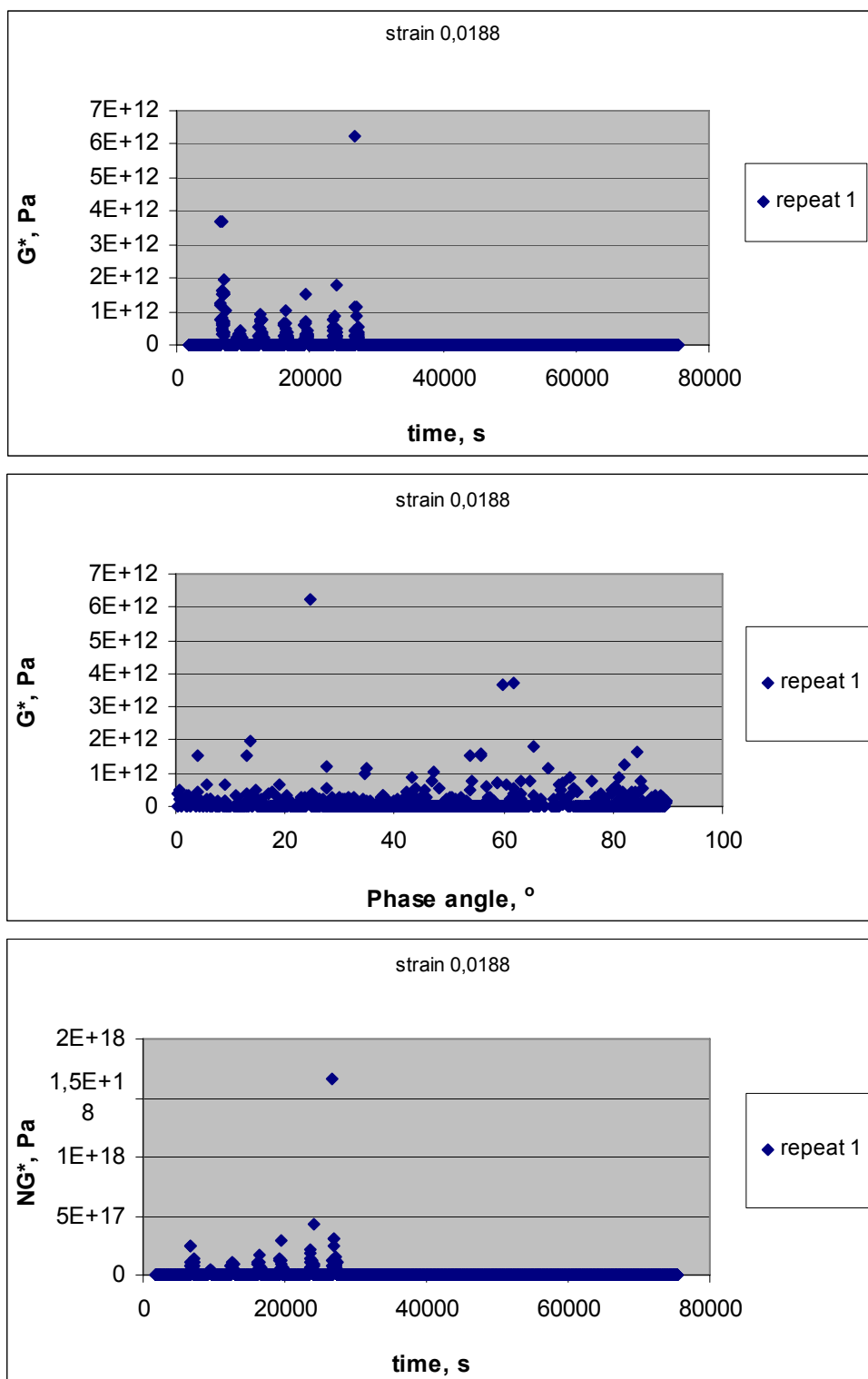
Podobnie rys. 57 pokazuje, że odpowiedni DSR pozwala wykonać badania także polimeroasfaltu, który jak się okazało sprawia dodatkowe problemy wskutek swej innej charakterystyki reologicznej. Badanie w tym wypadku jest wyraźnie dłuższe niż zwykłego asfaltu.

Rys. 58 i 59 przedstawiają wyniki badań wstępnych, w których mierzono moduł i kąt przesunięcia fazowego lepiszczy przed przystąpieniem do badań zmęzeniowych. Podane wyniki wykazują dość duże zróżnicowanie, mimo odrzucenia wyników odchylonych dwóch laboratoriów G i L. Badane trzy lepiszcza wykazują zbliżony moduł  $G^*$  oraz kąt przesunięcia fazowego w temperaturze badania 10°C.

Rys. 60 i 61 ilustrują różnice między wynikami odrzuconymi (laboratoria G i L) a akceptowanymi, choć dotyczą najprostszego w badaniu zmęczenia asfaltu zwykłego.

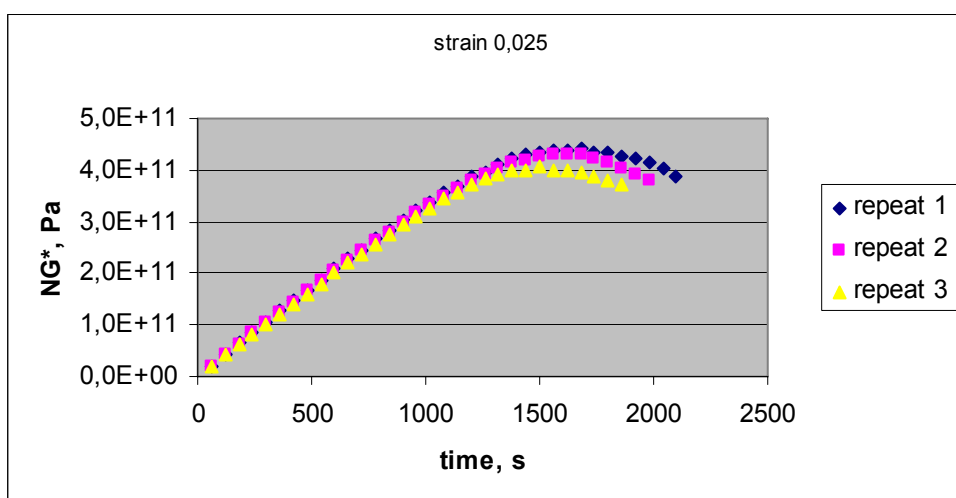
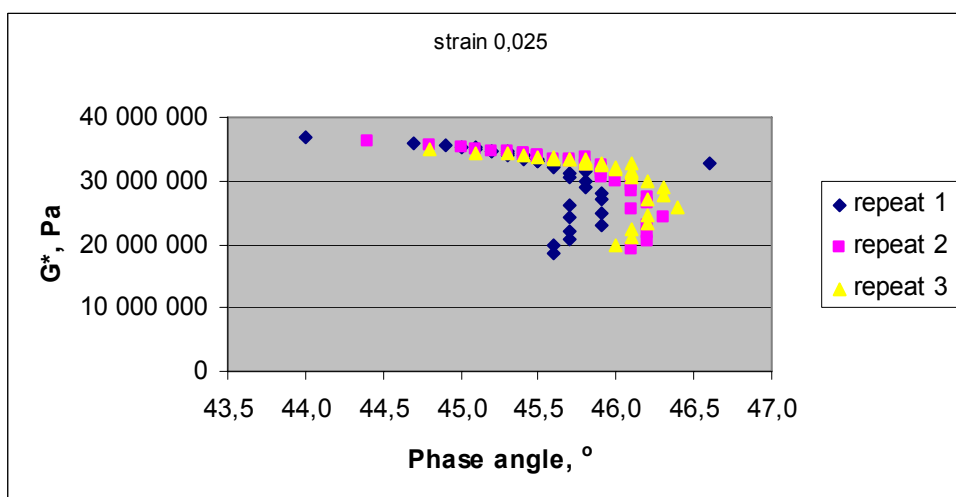
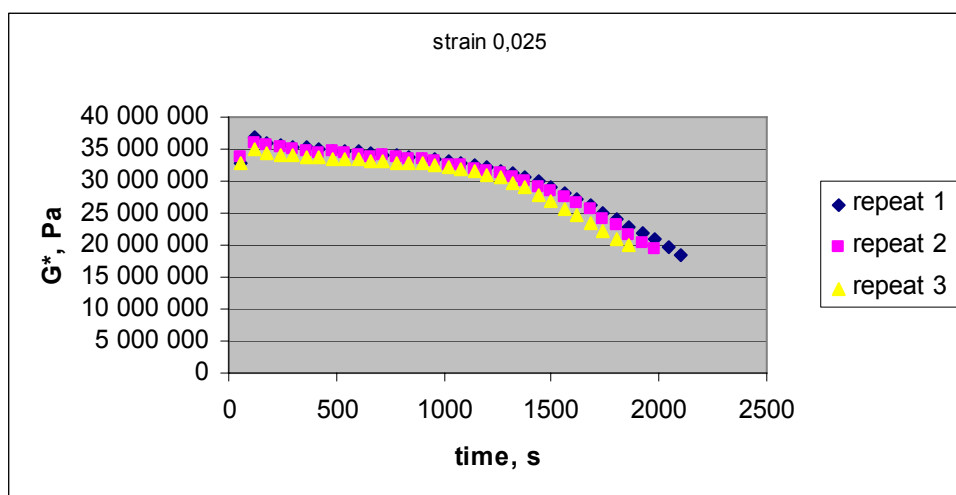
Znaczny wpływ na trudność wykonania badania, jak i na trwałość zmęzeniową lepiszcza, wywiera wielkość odkształcenia – im mniejsze odkształcenie, tym trudniejsze w wykonaniu badanie zmęczenia, jak też tym większa trwałość zmęzeniowa. W wypadku polimeroasfaltu skala trudności znacznie wzrasta – spośród 9-ciu laboratoriów wiarygodne wyniki zmęczenia polimeroasfaltu przy małym odkształceniu uzyskano tylko w 3-ech.

## Laboratorium G, lepiszcze A



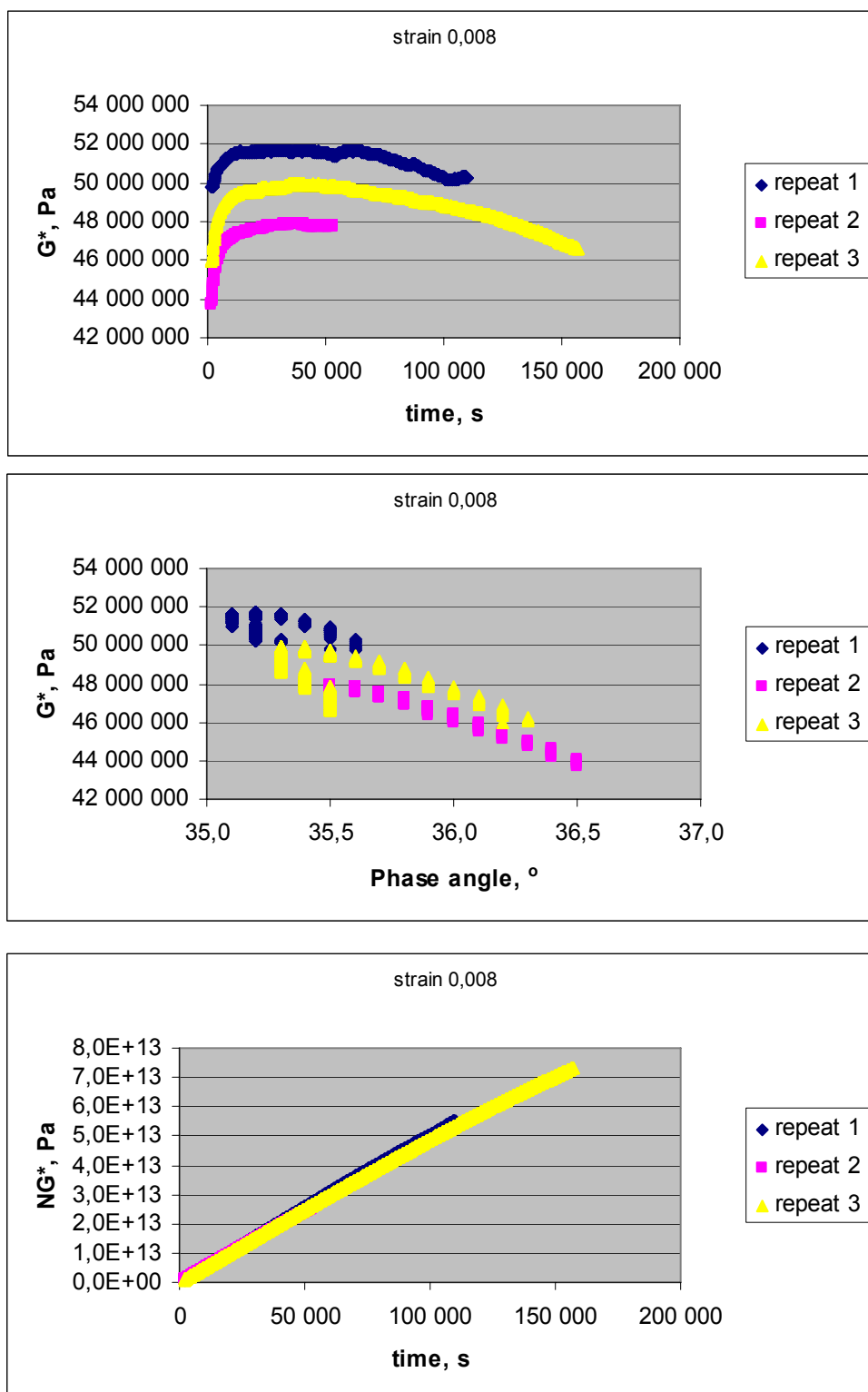
**Rysunek 55. Przykład wadliwych wyników badania zmęczenia lepiszcza, asfalt zwykły A, laboratorium G, DSR Bohlin**

## Laboratorium J, lepiszcze A

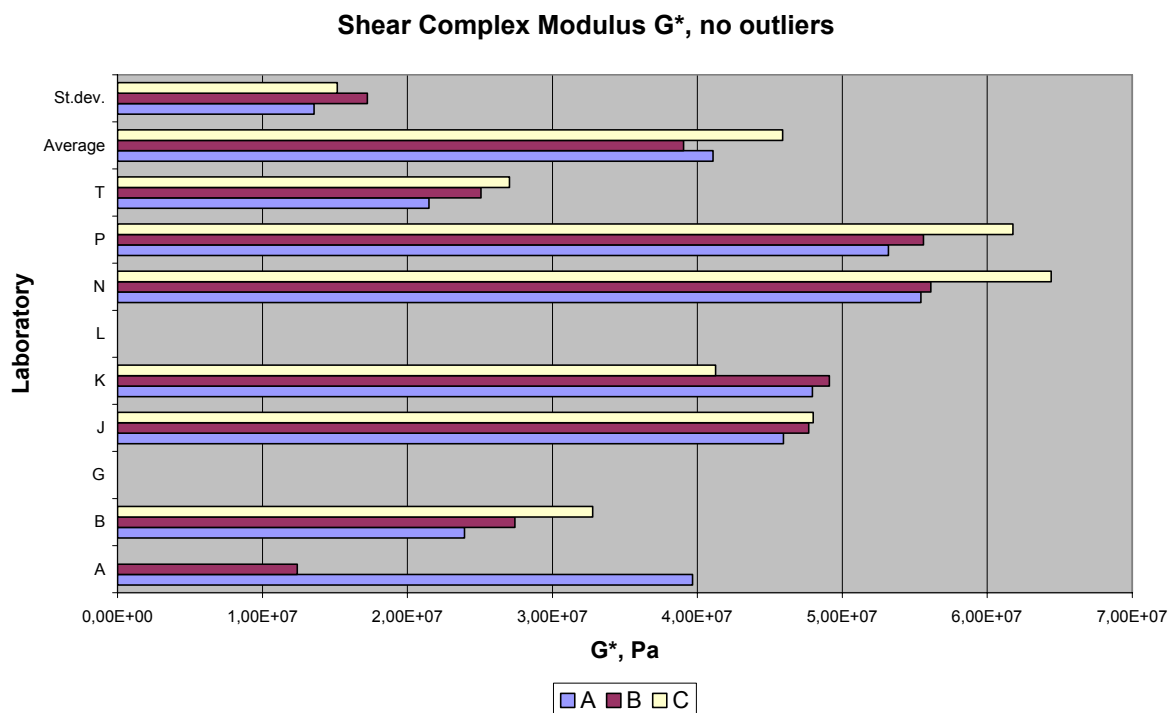


Rysunek 56. Przykład akceptowalnych wyników badania zmęczenia lepiszcza, asfalt zwykły A, laboratorium J, DSR UDS 200 Paar Physica

## Laboratorium J, lepiszcze C



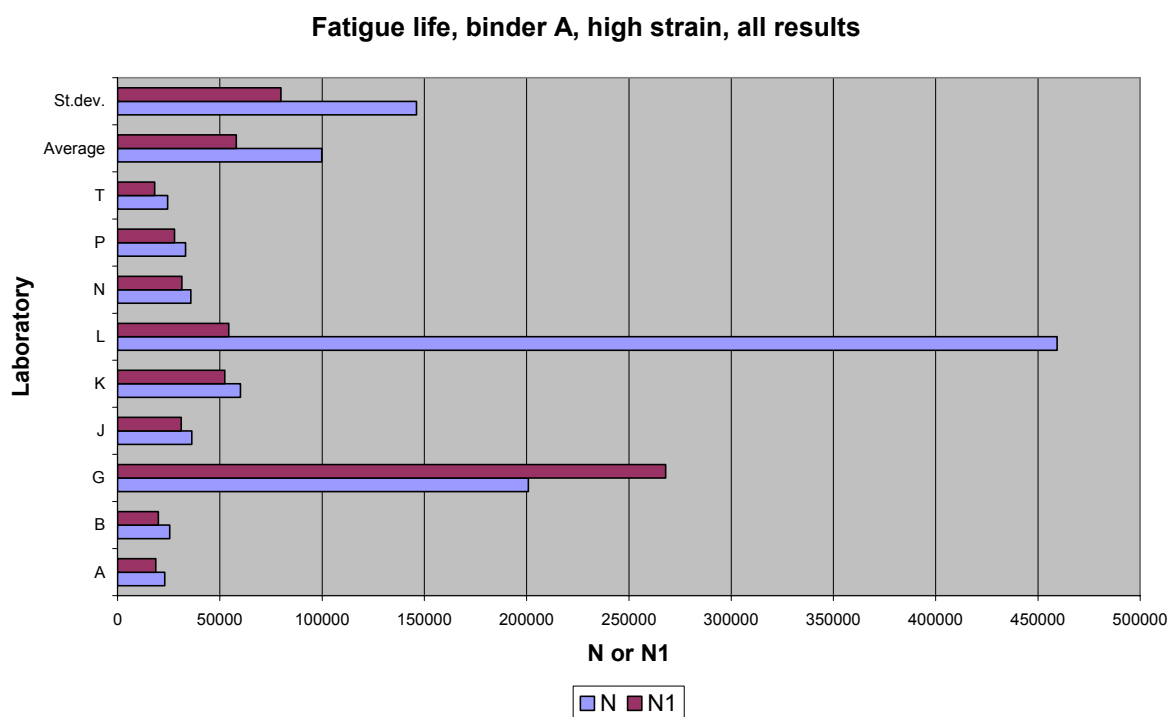
Rysunek 57. Przykład trudności wykonania badania zmęczenia, polimerasfalt C, małe odkształcenie, laboratorium J, DSR UDS 200 Paar Physica



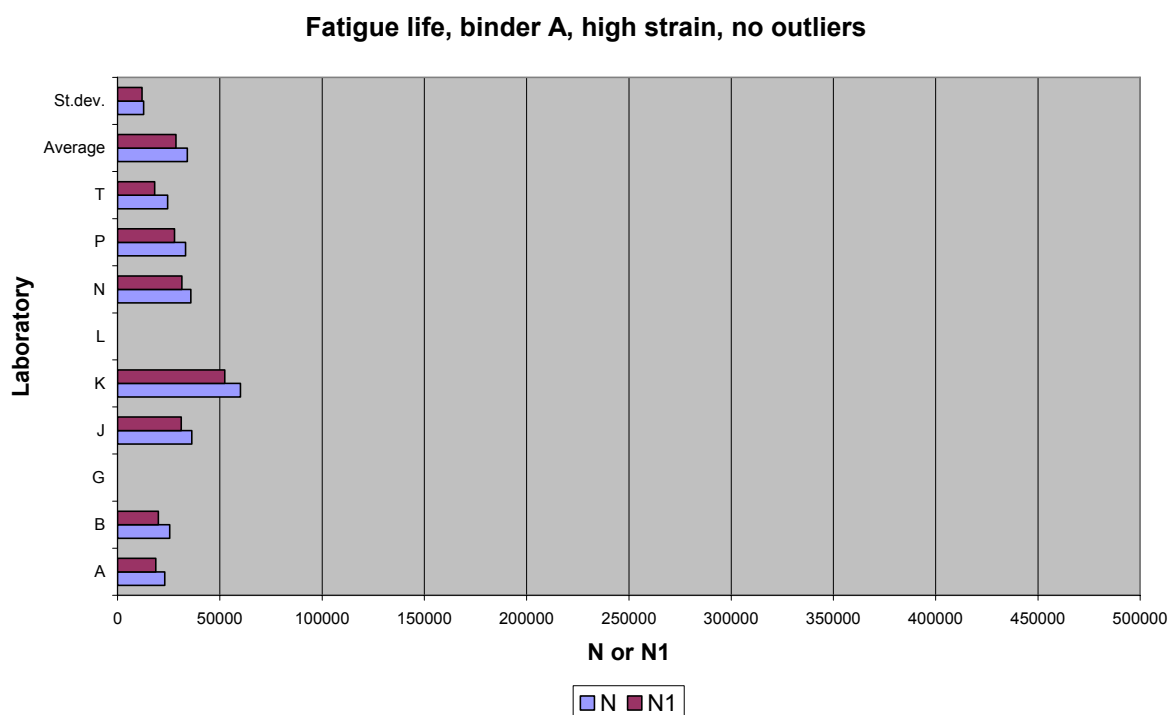
**Rysunek 58. Moduł sztywności  $G^*$ , bez wyników odchylonych**



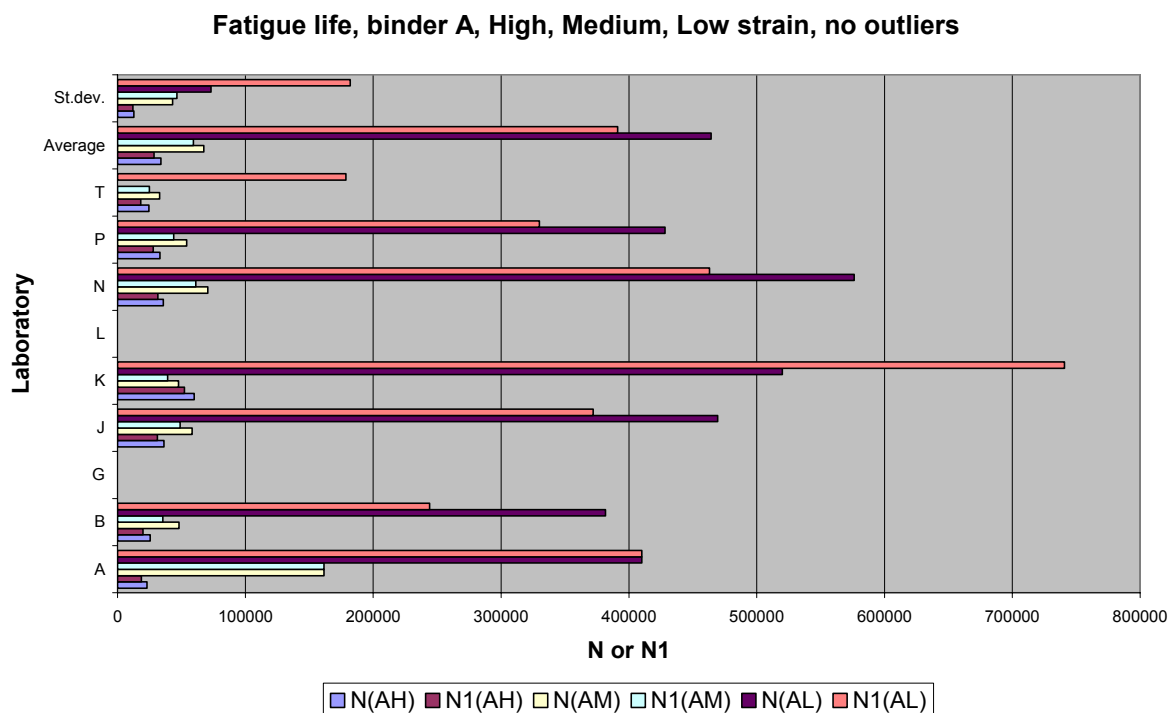
**Rysunek 59. Kąt przesunięcia fazowego, bez wyników odchylonych**



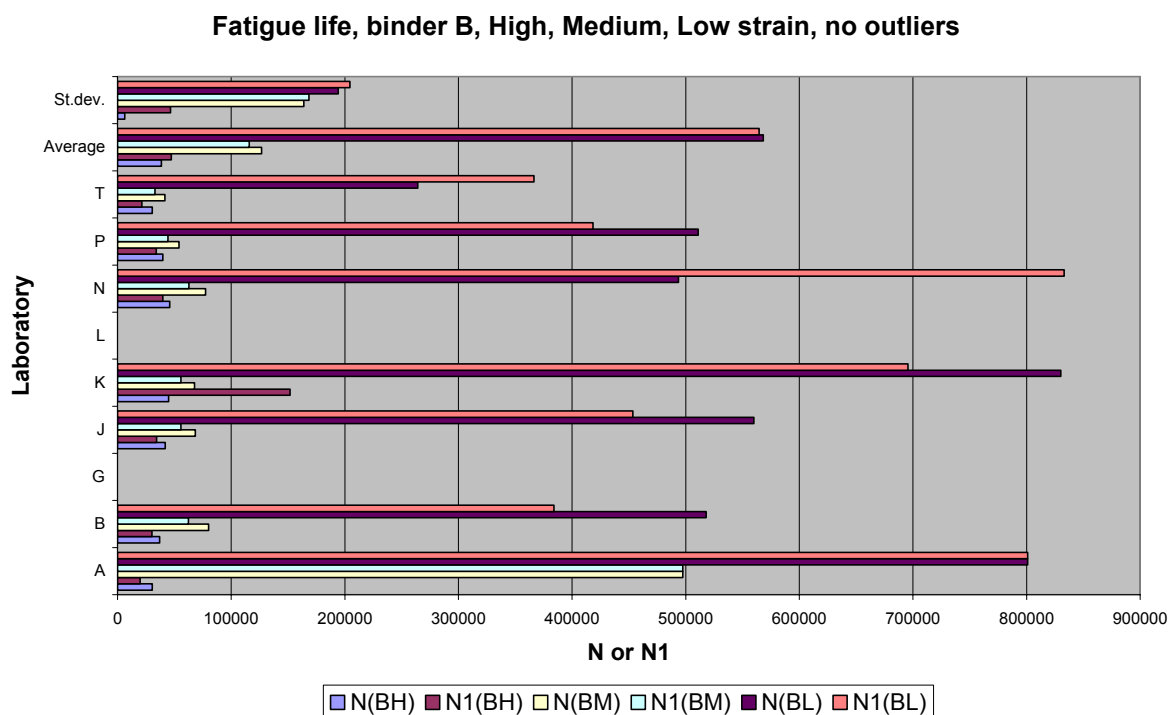
**Rysunek 60. Trwałość zmęczeniowa, lepiszcze A, duże odkształcenie, wszystkie wyniki**



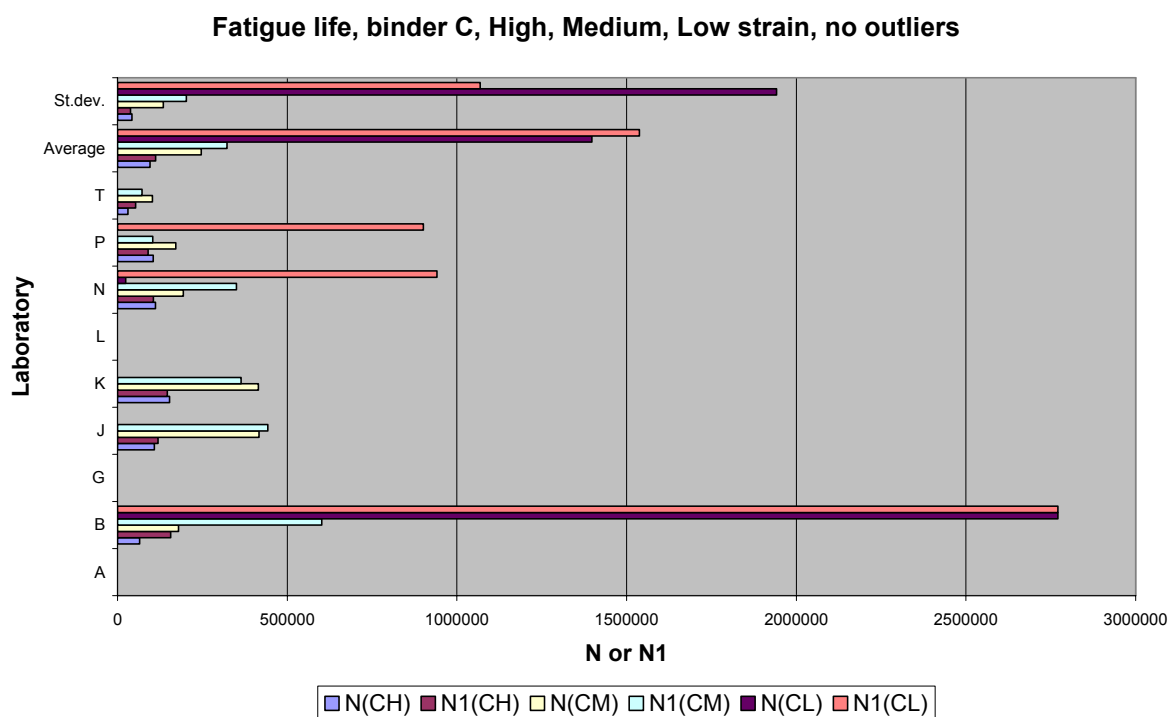
**Rysunek 61. Trwałość zmęczeniowa, lepiszcze W, bez wyników odchylonych**



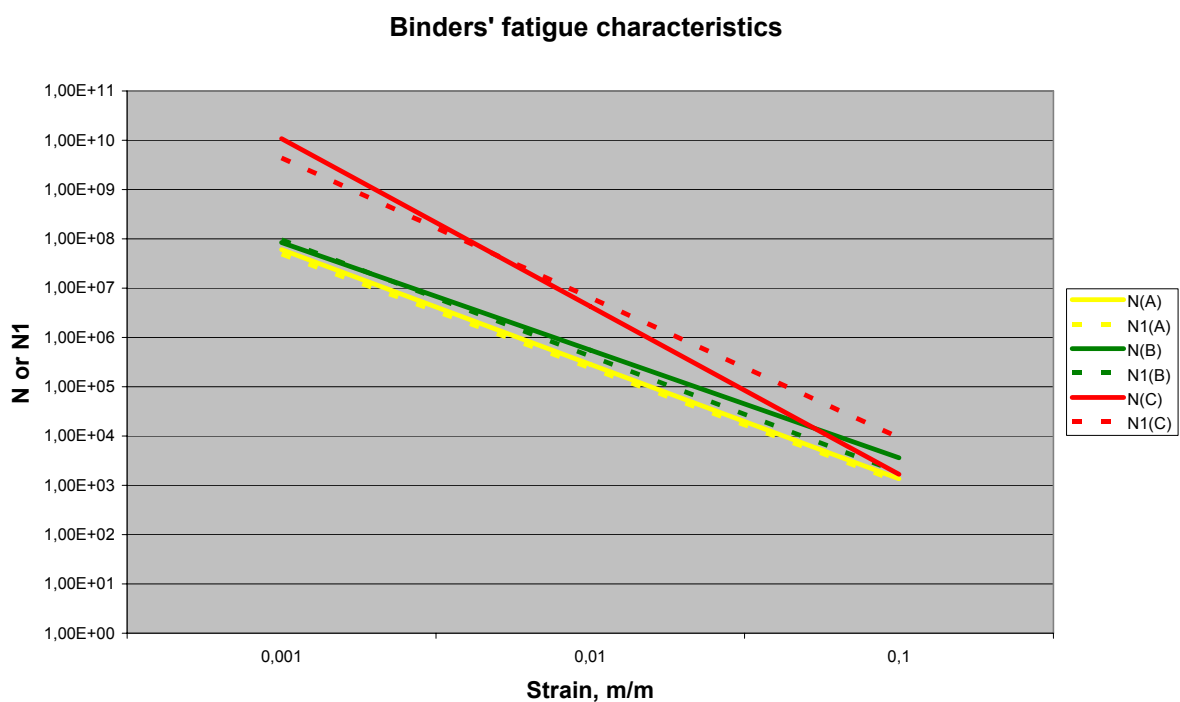
**Rysunek 62. Trwałość zmęczeniowa, lepiszcze A, duże, średnie i małe odkształcenie**



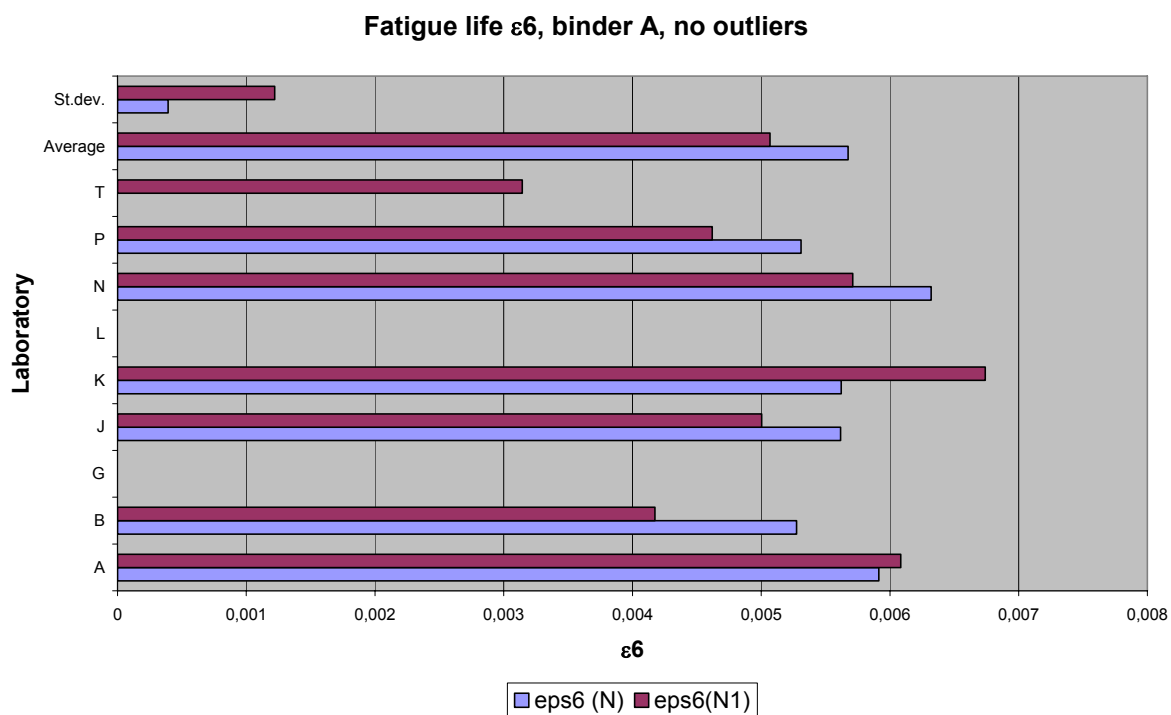
**Rysunek 63. Trwałość zmęczeniowa, lepiszcze B, duże, średnie i małe odkształcenie**



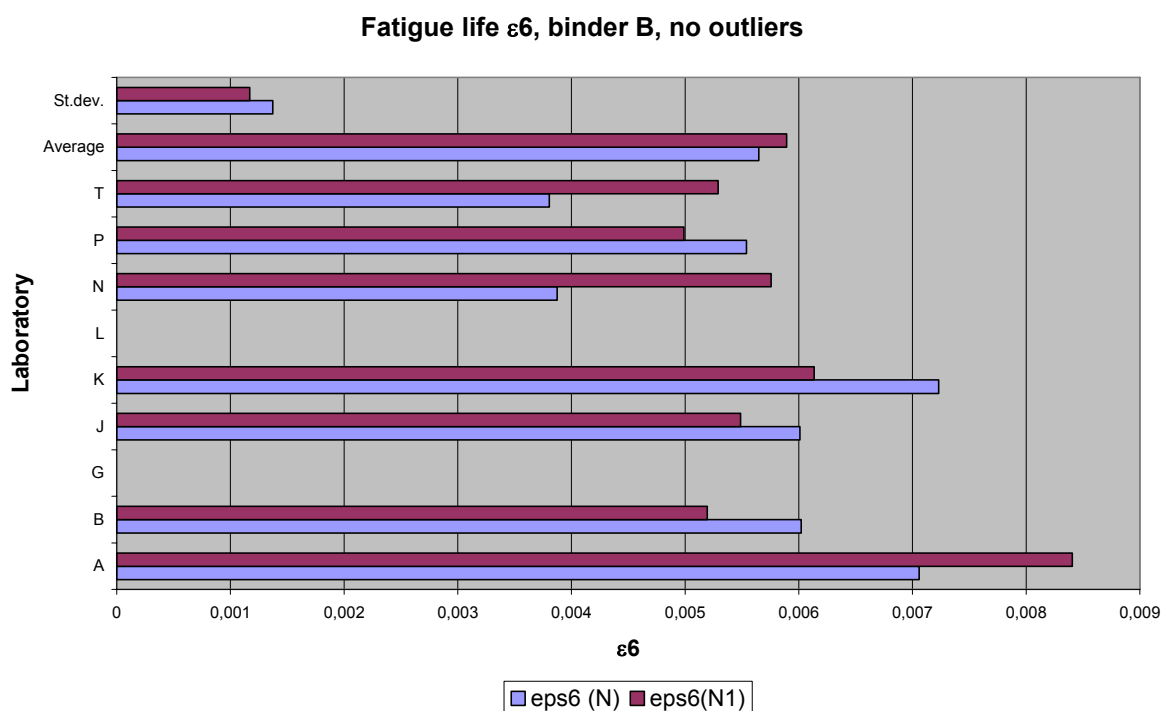
**Rysunek 64. Trwałość zmęczeniowa, lepiszcze C, duże, średnie i małe odkształcenie**



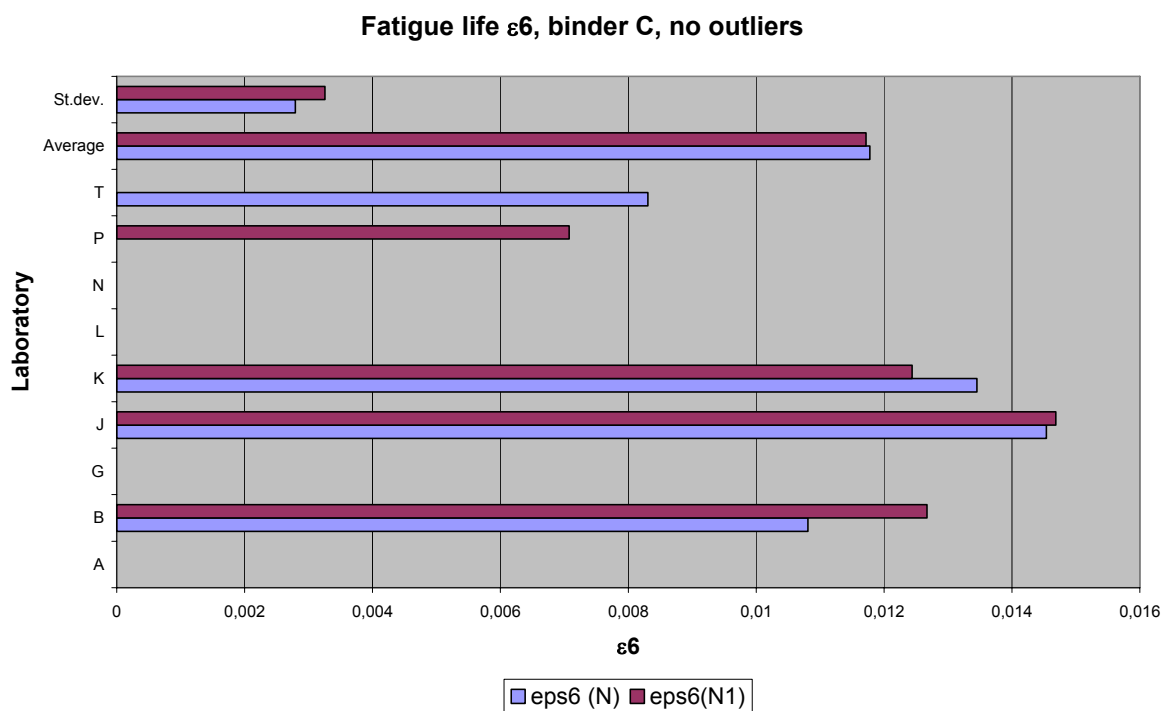
**Rysunek 65. Charakterystyka zmęczeniowa lepiszczy A, B, C wyznaczona metodą konwencjonalną N i metodą energetyczną N1**



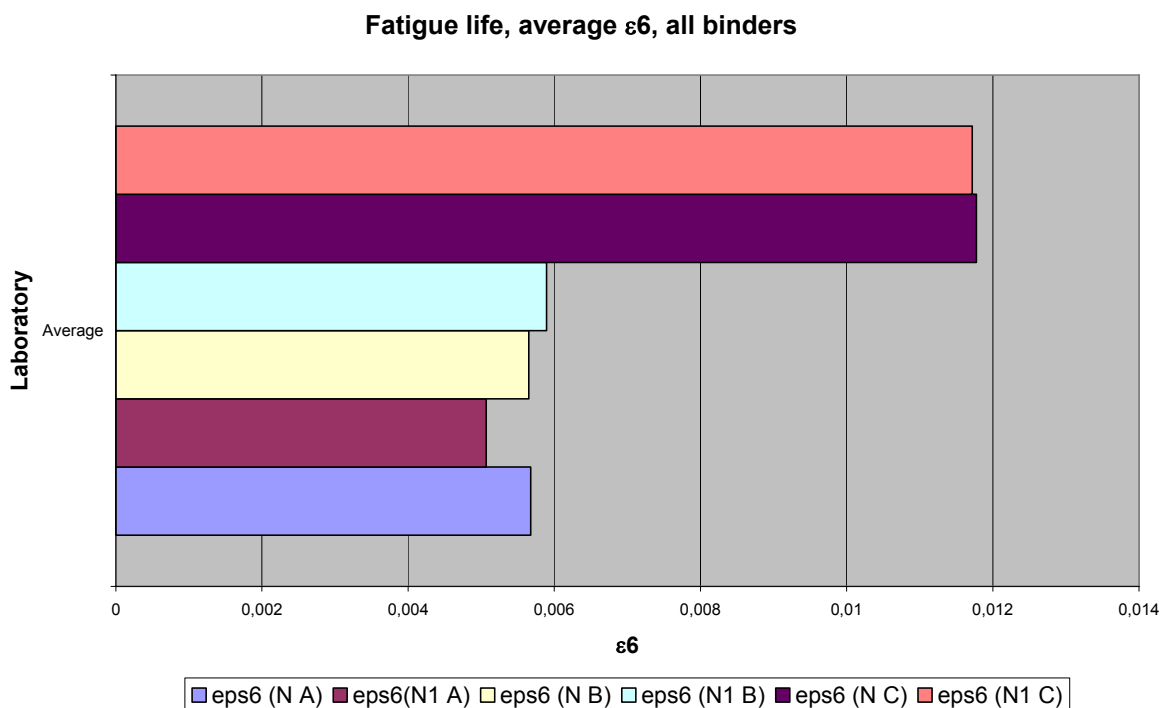
**Rysunek 66. Parametr  $\epsilon_6$  lepiszcza A, bez wyników odchylonych**



**Rysunek 67. Parametr  $\epsilon_6$  lepiszcza B, bez wyników odchylonych**



**Rysunek 68. Parametr  $\epsilon_6$  lepiszcza A, bez wyników odchylonych**



**Rysunek 69. Wartość średnia parametru  $\epsilon_6$  lepiszczy A, B, C**

Podsumowanie porównania charakterystyki zmęczeniowej badanych lepiszczy przedstawiono na rys. 65. Oba zwykłe asfalty wykazały nieco różną charakterystykę. Lepiszczka te były tak dobrane, aby wykazywały różną charakterystykę zmęczeniową przy podobnym module sztywności. Asfalt B przy większym odkształceniu wykazuje nieco lepszą trwałość zmęczeniową niż asfalt A.

Najlepszą charakterystykę zmęczeniową wykazuje polimeroasfalt C, zwłaszcza w strefie małego odkształcenia jego trwałość zmęczeniowa jest wyraźnie większa niż zwykłych asfaltów. Potwierdzają to rysunki 66-69 przedstawiające wartości parametru  $\varepsilon_6$  charakteryzującego trwałość zmęczeniową lepiszczy.

Należy zwrócić uwagę, że metoda energetyczna i konwencjonalna w wypadku zwykłych asfaltów nie daje istotnych różnic w prognozowaniu trwałości zmęczeniowej. Lecz w wypadku polimeroasfaltu różnica jest już istotna. Może to mieć ważne znaczenie w projektowaniu konstrukcji nawierzchni. Ten sam wniosek został sformułowany na podstawie badań mieszanek mineralno-asfaltowych w pracy doktorskiej W. Bańkowskiego [5].

Wyniki badań lepiszczy uzyskują również potwierdzenie w badaniach mieszanek mineralno-asfaltowych (rys. 54). Mieszanaka F20 wykazuje wyraźnie lepszą charakterystykę zmęczeniową niż dwie pozostałe F10 i F30. Także obraz charakterystyki tych dwóch mieszanek jest zbliżony do charakterystyki lepiszczy A i B. Taka zgodność potwierdza słuszność poszukiwania metody badania zmęczenia lepiszcza jako badania wspomagającego prognozowanie trwałości zmęczeniowej nawierzchni asfaltowej. Badania wykonywane na lepiszczu, pomimo wszelkich problemów, są znacznie tańsze i szybsze niż badania mieszanek mineralno-asfaltowych. Badanie to może stanowić znaczne ułatwienie procesu projektowania i prognozowania, jak też optymalizacji trwałości zmęczeniowej nawierzchni.

## **9. Weryfikacja i opracowanie opisu metody badawczej**

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące uwagi do procedury badawczej zmęczenia lepiszcza asfaltowego w reometrze DSR:

- zaproponowana temperatura 60°C rozgrzewania płytki do przyklejenia asfaltu lub polimeroasfaltu nie jest uniwersalna, w wypadku bardziej miękkich asfaltów w tej temperaturze w próbce tworzy się dwustronny menisk wklęsły
- czas wykonania wszystkich wymaganych w badaniach międzylaboratoryjnych RILEM 9-ciu pomiarów jest zbyt krótki
- należy kontrolować, czy delaminacja (odspojenie) próbki ma charakter kohezyjny, czy adhezyjny
- bardzo istotna jest geometria próbki, np. próbka Total, powtórzenie 3 z odkształceniem 0,008, została poddana badaniu zmęczenia bez obcinania, z minimalnym „meniskiem wypukłym” – obserwujemy dwa razy wyższy moduł
- polimeroasfalt źle przykleja się do płytek, a czas badania jest bardzo długi
- warunki badania są bardzo rygorystyczne, wręcz krytyczne czasem niewykonalne ze względów sprzętowych.

Podane uwagi oddają problemy, jakie pojawiają się w badaniach zmęczenia lepiszcza w DSR. Te i uwagi innych laboratoriów będą rozpatrywane przez grupę roboczą Komitetu Technicznego RILEM.

## **10. Podsumowanie**

Prowadzone badania międzylaboratoryjne mające na celu opracowanie i weryfikację metody badawczej zmęczenia lepiszcza asfaltowego wykazują znaczne trudności w wykonywaniu tego badania. Stwierdzono liczne problemy w uczestniczących laboratoriach wynikające z niedostatków sprzętu pomiarowego (reometrów DSR), oprogramowania, trudności przygotowania próbek do badań,

przyklejenia próbek do płytek reometru (delaminacja – odklejanie próbki asfaltu od płytki).

Wyniki badań zmęczenia lepiszcza wykazały znaczne trudności sprzętowe i poprawnego wykonania procedury badawczej. Długi czas badania stanowił czynnik zniechęcający wielu uczestników deklarujących początkowo chęć uczestnictwa.

Pomimo trudności uzyskano zachęcające wyniki potwierdzające poprawność decyzji o podjęciu badań zmęczenia lepiszcza w IBDiM i pracy badawczej z tym związanej na zlecenie GDDKiA. Uzasadnione też okazały się badania międzylaboratoryjne RILEM.

Stwierdzono wyraźną różnicę w trwałości zmęczeniowej asfaltów zwykłych i polimeroasfaltu. Trwałość zmęczeniowa polimeroasfaltu jest wyraźnie większa. Uzyskano zgodność wyników badań mieszanek mineralno-asfaltowych i lepiszczy. Jest to bardzo optymistyczna informacja, wskazująca, że warto kontynuować prace nad doskonaleniem procedury badawczej i sprzętu pomiarowego do badania zmęczenia lepiszczy. Badanie to mimo wszelkich trudności jest znacznie szybsze, tańsze i łatwiejsze niż badanie mieszanki mineralno- asfaltowej.

## **11. Literatura**

- 
- 1 *Prevention of Reflective Cracking in Pavements. State of the Art Report of RILEM TC 157 PRC.* Edited by A.Vanelstraete & L. Francken. E&FN Spon, 1997
  - 2 Jacobs M.M.J.: "Crack growth in asphaltic mixes" – TU Delft 1995
  - 3 Paris P., Erdogan F.: A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering* 85, 1963
  - 4 Lundström R.: Rheological and fatigue characterization of asphalt concrete mixtures using uniaxial testing, KTH 2002
  - 5 Bańkowski W.: Analiza trwałości zmęczeniowej kompozytów mineralno-asfaltowych metodą konwencjonalną oraz metodą energii rozproszonej. Praca doktorska, PW, 2005
  - 6 Hopman P.C., Kunst P.A.J.C., Pronk A.C.: A renewed interpretation method for fatigue measurements-verification of Miner's rule, *Proc. 4-th Eurobitume*, Madryt 1989
  - 7 Van Dijk W.: *Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes*. Proc. AAPT, Vol. 44, 1975
  - 8 Pronk A.C.: „Analytical description of the heat transfer in an asphalt beam”, DWW 1996
  - 9 Pronk A.C., Krans F. Gogh: „Temperature increase in an asphalt beam during fatigue – theory and practice”, CROW 1996
  - 10 Hopman P., Kunst p., Pronk A.C.: „A renewed interpretation method for fatigue measurement verification of Miner' rule”, *Eurobitume* 1989
  - 11 Pronk A.C.: „Fatigue lives of asphalt beams in 2 and 4 point dynamic bendings tests based on a 'new' fatigue life definition using the dissipated energy concept. Controlled displacement mode” – DWW 1997
  - 12 Pronk A.C.: „Fatigue lives of asphalt beams in 2 and 4 point bending tests based on a 'new' fatigue life definition using the 'Dissipated energy Concept'; Phase IV: DAB 0/8; Weibull stressed volume effect” – raport W-DWW-99-070; Delft 1999
  - 13 Pronk A.C.: „Fatigue lives of asphalt beams in 2 and 4 point dynamic bending tests based on a 'new' fatigue life definition using the dissipated energy concept. Controlled force mode” – DWW 1997
  - 14 Pronk A.C., Hopman P.C.: Energy dissipation: the leading factor of fatigue, *Proc. SHRP: Sharing the benefits*, London 1990
  - 15 Pronk A.C.: Fatigue lives of asphalt beams in 2 and 4 point bending tests based on a 'new' fatigue life definition using the 'Dissipated energy Concept'; Phase II: DAB 0/8; Controlled Displacement Mode, raport W-DWW-98-001; Delft 1998
  - 16 Rowe G.M., Bouldin M.G.: Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphalt mixtures, *Proc. Euroasphalt&Eurobitume Congress*, Barcelona 2000

- 
- 17 Pell P.S.: Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes. The International Conference on Structural Design and Asphalt Pavements, Ann Arbor, 1962
  - 18 Potschka V., Schmidt H.: Fatigue life of polymer modified bitumen. Proc. Eurobitume Congress, Stockholm, 1993
  - 19 Anderson D.A., Christensen D.W., Bahia H.U., Dongre R., Sharma M.G., Antle C. E, Button J.: Binder Characterization and Evaluation--Volume 3: Physical Characterization Strategic Highway Research Program Washington, DC 1994
  - 20 Claxton M., Lesage J., Planque J.: When can bitumen rheological properties be used successfully to predict asphalt mix performance. Euraspphalt&Eurobitume Congress, Strasbourg, 1996
  - 21 Bahia H.U., Zhai H.: Critical properties of modified binders: summary of results from NCHRP 9-10 project. 78th TRB Meeting, Washington DC, 1999
  - 22 Bahia H., Zhai H., Bonnetti K., Kose S.: Non-Linear Viscoelastic and Fatigue properties of Bitumen, Proc. of AAPT, Vol. 68, 1999
  - 23 Bahia H. U., Hanson D. I., Zeng M., Zhai H., Khatri M. A., Anderson R. M.: Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, NCHRP Report 459, Transportation Research Board, 2001
  - 24 Phillips M.: Multi-Step Models for Fatigue and Healing, and Binder Properties Involved in Healing. Eurobitume Workshop: Performance Related Properties for Bituminous Binders, Luxemburg, 1999
  - 25 Soenen H., Eckmann B.: Binder-related fatigue properties studied by rheology. V International Conference Durable and Safe Road Pavements, Kielce, Poland, 1999
  - 26 de La Roche C., Piau J.-M., Stefani C.: Study of the bitumen behaviour in the pseudo-contact between aggregate and first results of the Repeated Local Fracture of Bitumen Test. Eurobitume Workshop: Performance Related Properties for Bituminous Binders, Luxemburg, 1999
  - 27 Bonnot J., Phillips M., Sybilski D.: Module 2 Briefing "Binder properties needed for the Performance Requirements". Eurobitume Workshop: Performance Related Properties for Bituminous Binders, Luxemburg, 1999
  - 28 Bahia H. U. Using Damage Testing to Relate Binder Properties to Pavement Performance The First International Symposium on Binder Rheology and Pavement Performance Calgary, Alberta, CA 2000
  - 29 Anderson D.A., Le Hir M.Y., Marasteanu M., Planche J-P., Martin D., Gauthier G.: Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binder, Transportation Research Record 1766, 2001
  - 30 Hammoum F., de La Roche C., Piau J.-M., Stefani C.: Experimental investigation of fracture and healing of bitumen at pseudo-contact of two aggregates. Ninth International Conference on Asphalt Pavements. ISAP, Copenhagen, 2002
  - 31 Airey G.D., Thom N.H., Osman S., Huang H., Collop A.C., A comparison of bitumen/mastic fatigue data from different test methods, Fifth Rilem Conference: Cracking in Pavements, Mitigation, Risk assessment, and Prevention, May 5-7, 2004
  - 32 Gauthier G., Le Hir Y., Planche J.P., Fatigue of bituminous binders and mixes: analysis and correlations using a new, intrinsic approach, 3 rd Euraspphalt &Eurobitume Congress Vienna 2004 –Paper 318
  - 33 Planche J.-P., Anderson D.A., Gauthier G., Le Hir Y.M., Martin D.: Evaluation of fatigue properties of bituminous binders. 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials PTEBM '03, Zurich, 2003
  - 34 Lu X., Soenen H., Redelius P.: Fatigue and Healing Characteristics of bitumens studied using dynamic shear rheometer. 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials PTEBM '03, Zurich, 2003
  - 35 Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests, Report on Phase 1 of the BitVal Project (Antunes M.L., Baena J.M., Blab R., Carswell I., Hirsch V., Jørgensen T., Kalman B., Nicholls C., Sáez R.J., Such C., Sybilski D., Tusar M., Vanelstraete A., Vansteenkiste S., de Visscher J., Beuving E., Harrison T., Phillips S., Stawiarski A.)
  - 36 Bahia H.: Prezentacja podczas spotkania TG1 TC 206 ATB RILEM, Madryt, styczeń 2005