

**Instytut Badawczy Dróg i Mostów**

**Wdrożenie norm europejskich wraz z weryfikacją i wdrożeniem nowych metod pomiarowych materiałów drogowych według norm PN-EN z uwzględnieniem polskich warunków klimatycznych i technicznych**

**Załącznik 5: Sprawozdanie z badań porównawczych modułu sztywności i zmęczenia**

**Wykonawcy:**

dr inż. Wojciech Bańkowski

**Kierownik tematu:**

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski

**Warszawa, listopad 2006**



## **1 Cel pracy**

Celem pracy jest przeprowadzenie badań porównawczych zespolonego modułu sztywności i zmęczenia oraz wdrożenie norm EN na te metody w wybranych laboratoriach.

Prowadzącym pracę jest IBDiM. Uczestnicy: IBDiM, Budimex Dromex S.A., Politechnika Wrocławska, Laboratorium Drogowe w Poznaniu.

## **2 Program pracy**

Przyjęto następujący program pracy:

- spotkanie organizacyjne - określenie warunków i procedur badań,
- przygotowanie próbek SMA do badań (IBDiM),
- badanie modułu sztywności na tych samych belkach z mieszanki SMA w poszczególnych laboratoriach przy udziale przedstawiciela IBDiM,
- badanie modułu sztywności na belce referencyjnej w poszczególnych laboratoriach,
- dostarczenie masy do przygotowania próbek z BAWMS (BUDIMEX DROMEX S.A.),
- przygotowania próbek BAWMS do badań modułu sztywności i zmęczenia,
- badanie modułu sztywności oraz zmęczenia na belkach z mieszanki BAWMS przygotowanych w laboratorium IBDiM,
- sprawozdanie końcowe (IBDiM).

### **3 Metodyka i warunki badań**

W ramach pracy przygotowano procedury badania w języku polskim oparte na normach PN-EN 12697-24:2005 (U) oraz PN-EN 12697-26:2005 (U).

Przyjęto następujące warunki badań:

- moduł sztywności na belkach SMA: temperatura 10°C, częstotliwość 1, 5, 8, 10 i 20 Hz, odkształcenie 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , obciążenie sinusoidalne,
- moduł sztywności na belce referencyjnej: temperatura 10°C, częstotliwość 1, 5, 10 i 20 Hz, odkształcenie 50, 100 i 150  $\mu\text{m}/\text{m}$ , obciążenie sinusoidalne,
- moduł sztywności na belkach BAWMS: temperatura 10°C, częstotliwość 1, 2, 5, 8, 10 Hz, odkształcenie 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , obciążenie sinusoidalne,
- zmęczenie na belkach BAWMS: temperatura 10°C, częstotliwość 10 Hz, odkształcenie 135, 165, 220  $\mu\text{m}/\text{m}$  (po 6 próbek), obciążenie sinusoidalne (dolne i górne włókna belki są rozciągane naprzemiennie), kryterium zniszczenia 50%, dane zbierane co 100 cykli, moduł początkowy określony w 100-tym cyklu, czas trwania badania wydłużony do 70% spadku modułu.

#### 4 Próbki do badań

W tablicach 1 -3 zestawiono próbki oraz ich wymiary i masy.

**Tablica 1 Wymiary i masa próbek z mieszanki SMA**

Próbka	L	A	b	h	Masa próbki
	mm	mm	mm	mm	g
1	357	119	63,6	50,3	3031,9
2	357	119	63,6	50,4	3037,0
3	357	119	63,7	50,5	3038,1
4	357	119	63,7	50,4	3035,6

**Tablica 2 Wymiary i masa próbki referencyjnej**

L	A	b	h	Masa próbki
mm	mm	mm	mm	g
357	119	63,7	50,0	1801,4

**Tablica 3 Wymiary próbek z mieszanki BAWMS**

Próbka	L	A	b	h
	mm	mm	mm	mm
a	b	c	d	e
1	380	119	63,8	50,6
2	380	119	63,7	50,6
3	380	119	63,5	50,6
4	380	119	63,7	50,6
5	380	119	63,6	50,7
6	380	119	63,6	50,8
7	380	119	63,7	50,5
8	380	119	63,6	50,6
9	380	119	63,5	50,6
10	380	119	63,4	50,7
11	380	119	63,5	50,7
12	380	119	63,5	50,7
13	380	119	63,5	50,7
14	380	119	63,6	50,6
15	380	119	63,3	50,7
16	380	119	63,5	50,6
17	380	119	63,5	50,6
18	380	119	63,4	50,7
19	380	119	63,5	50,6
20	380	119	63,6	50,6
21	380	119	63,6	50,7
22	380	119	63,6	50,6
23	380	119	63,6	50,7
24	380	119	63,5	50,5
25	380	119	63,5	50,6
26	380	119	63,5	50,6
27	380	119	63,7	50,6
28	380	119	63,6	50,6
29	380	119	63,6	50,6
30	380	119	63,4	50,5
31	380	119	63,8	50,8
32	380	119	63,6	50,6
33	380	119	63,8	50,5
34	380	119	63,7	50,6
35	380	119	63,7	50,5
36	380	119	63,6	50,7
37	380	119	63,6	50,6
38	380	119	63,5	50,5
39	380	119	63,5	50,4
40	380	119	63,6	50,5
41	380	119	63,7	50,5
42	380	119	63,7	50,7

a	b	c	d	e
43	380	119	63,8	50,5
44	380	119	63,7	50,6
45	380	119	63,7	50,6
46	380	119	63,7	50,6
47	380	119	63,6	50,5
48	380	119	63,7	50,7
49	380	119	63,8	50,6
50	380	119	63,6	50,6
51	380	119	63,6	50,6
52	380	119	63,6	50,6
53	380	119	63,6	50,5
54	380	119	63,7	50,6
55	380	119	63,7	50,6
56	380	119	63,6	50,5
57	380	119	63,6	50,5
58	380	119	63,6	50,5
59	380	119	63,6	50,4
60	380	119	63,5	50,4
61	380	119	63,7	50,4
62	380	119	63,7	50,4
63	380	119	63,6	50,4
64	380	119	63,7	50,5
65	380	119	63,5	50,6
66	380	119	63,7	50,6
67	380	119	63,5	50,4
68	380	119	63,7	50,6
69	380	119	63,6	50,5
70	380	119	63,6	50,4
71	380	119	63,6	50,4
72	380	119	63,7	50,5
73	380	119	63,8	50,4
74	380	119	63,6	50,5
75	380	119	63,6	50,4
76	380	119	63,7	50,5
77	380	119	63,7	50,6
78	380	119	63,7	50,5
79	380	119	63,8	50,5
80	380	119	63,8	50,6
81	380	119	63,7	50,6
82	380	119	63,7	50,4

W tabelicy 4 przedstawiono podział próbek BAWMS pomiędzy laboratoria. Podział próbek został przeprowadzony losowo, z uwzględnieniem różnic w zawartości wolnej przestrzeni w próbkach.

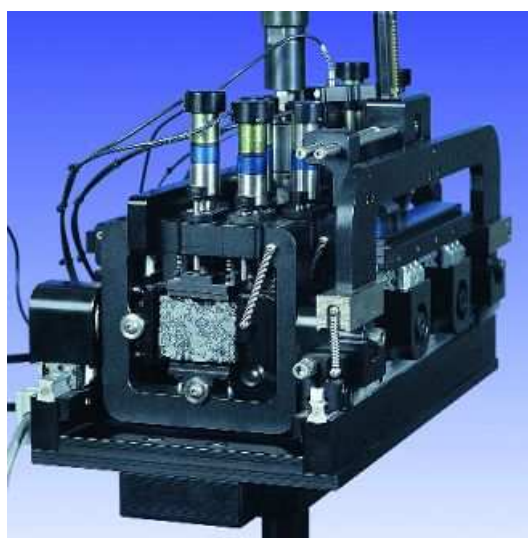
**Tablica 4 Podział próbek**

Laboratorium			
Pol. Wrocław	LD POZNAŃ	IBDiM	BUDIMEX DROMEX
7	1	5	19
8	2	6	20
27	3	11	21
28	4	12	22
39	9	15	23
40	10	16	24
45	13	17	33
46	14	18	34
59	29	25	47
60	30	26	48
61	31	51	49
62	32	52	50
63	35	53	65
64	36	54	66
67	37	57	77
68	38	58	78
75	43	81	79
76	44	82	80

## 5 Przegląd aparatury

W ramach badań porównawczych na belkach SMA dokonano przeglądu aparatury do badań zmęczeniowych dostępnych w poszczególnych laboratoriach. Poniżej przedstawiono listę aparatury:

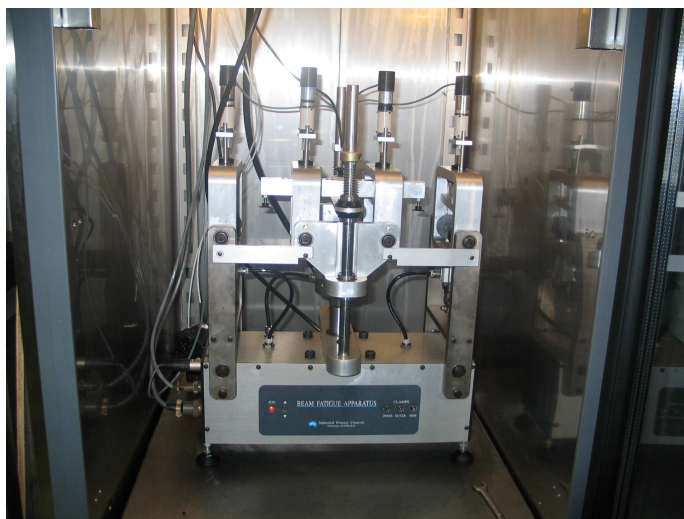
- IBDiM – aparat zmęczeniowy produkcji James Cox & Sons współpracujący ze stanowiskiem pomiarowym MTS o zasilaniu serwohydraulicznym (fot.1),



**Fot. 1 Aparat zmęczeniowy w IBDiM**



- LD Poznań - aparat zmęczeniowy produkcji IPC samodzielny zasilaniu pneumatycznym (fot.2),



**Fot. 2 Aparat zmęczeniowy w LD POZNAŃ**

- BUDIMEX DROMEX S.A. - aparat zmęczeniowy produkcji IPC samodzielny zasilaniu pneumatycznym jak w przypadku LD POZNAŃ
- Politechnika Wrocławska - aparat zmęczeniowy produkcji Cooper samodzielny zasilaniu pneumatycznym (fot.3)



**Fot. 3 Aparat zmęczeniowy na Politechnice Wrocławskiej**

Na podstawie dokonanego przeglądu można stwierdzić, że za wyjątkiem identycznych aparatów w LD Poznań i BUDIMEX DROMEX, urządzenia różnią się

pomiędzy sobą konstrukcją, rodzajem zasilania, oprogramowaniem, stopniem zaawansowania oraz możliwościami dostępnymi dla użytkownika.

Przeprowadzony przegląd pozwolił również wykryć i wyeliminować błędy w obsłudze aparatury oraz w interpretacji wyników.

## 6 Wyniki badań

### 6.1 Wyniki badań modułu sztywności próbek SMA

W tablicach 5-8 zestawiono wyniki badań modułu sztywności w poszczególnych laboratoriach. Na rysunkach 1-4 dokonano porównania wyników.

**Tablica 5 Wyniki badań IBDiM**

Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz
<b>1</b>	6935	9632	10553	11028	12968	20,5	17,6	17,2	16,9	16,7
<b>2</b>	6712	9311	10139	10692	12563	20,8	17,7	17,2	17,0	16,8
<b>3</b>	6902	9506	10397	10843	12699	20,5	17,5	16,9	16,7	16,4
<b>4</b>	6334	8858	9693	10152	12011	21,1	18,0	17,4	17,2	16,9
<b>Średnia</b>	<b>6721</b>	<b>9326</b>	<b>10196</b>	<b>10679</b>	<b>12561</b>	<b>20,7</b>	<b>17,7</b>	<b>17,2</b>	<b>17,0</b>	<b>16,7</b>
<b>Odch.st.</b>	276	339	376	377	403	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Min</b>	6935	9632	10553	11028	12968	21,1	18,0	17,4	17,2	16,9
<b>Max</b>	6334	8858	9693	10152	12011	20,5	17,5	16,9	16,7	16,4
<b>Wsp.zm.</b>	4,1	3,6	3,7	3,5	3,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,4

**Tablica 6 Wyniki badań LD POZNAŃ**

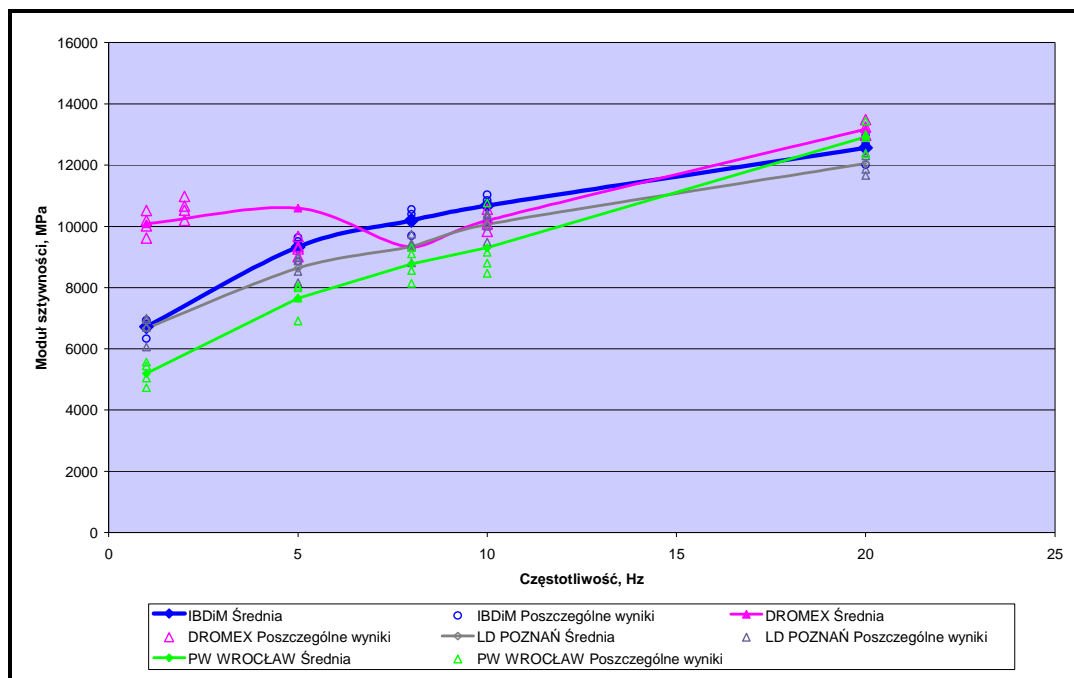
Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz
<b>1</b>	6941	8524	9383	10343	12398	4,1	4,9	4,5	4,9	6,7
<b>2</b>	6993	8872	9443	9996	11861	3,8	5,2	4,2	4,4	6,3
<b>3</b>	6699	8989	9744	10416	12294	5,3	5,4	4,7	5,3	6,7
<b>4</b>	6055	8161	8807	9488	11659	3,7	4,9	4,3	4,5	7,1
<b>Średnia</b>	<b>6672</b>	<b>8636</b>	<b>9344</b>	<b>10061</b>	<b>12053</b>	<b>4,2</b>	<b>5,1</b>	<b>4,4</b>	<b>4,8</b>	<b>6,7</b>
<b>Odch.st.</b>	431	373	391	423	350	0,8	0,3	0,2	0,4	0,3
<b>Min</b>	6993	8989	9744	10416	12398	5,3	5,4	4,7	5,3	7,1
<b>Max</b>	6055	8161	8807	9488	11659	3,7	4,9	4,2	4,4	6,3
<b>Wsp.zm.</b>	6,5	4,3	4,2	4,2	2,9	18,0	5,0	5,4	9,1	5,1

**Tablica 7 Wyniki badań BUDIMEX DROMEX**

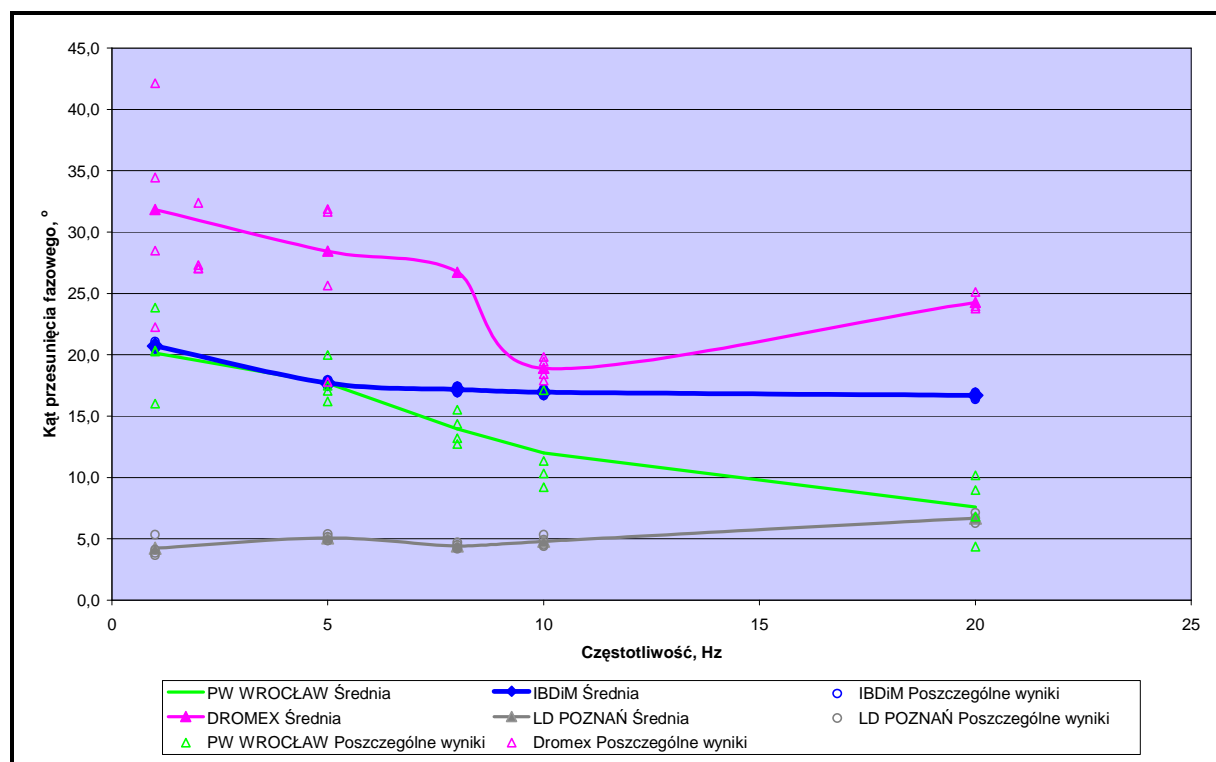
Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz
<b>1</b>	10516	10972	9341	10282	13245	28,5	27,3	17,8	17,9	23,9
<b>2</b>	10190	10526	9258	10073	12978	22,3	27,0	25,6	18,4	25,1
<b>3</b>	10016	10665	9676	10564	13485	34,5	32,4	31,7	19,5	24,2
<b>4</b>	9622	10196	9007	9834	12983	42,2	27,1	31,9	19,8	23,8
<b>Średnia</b>	<b>10086</b>	<b>10590</b>	<b>9321</b>	<b>10188</b>	<b>13173</b>	<b>31,8</b>	<b>28,4</b>	<b>26,7</b>	<b>18,9</b>	<b>24,3</b>
<b>Odch.st.</b>	372	322	276	310	243	8,5	2,6	6,6	0,9	0,6
<b>Min</b>	10516	10972	9676	10564	13485	42,2	32,4	31,9	19,8	25,1
<b>Max</b>	9622	10196	9007	9834	12978	22,3	27,0	17,8	17,9	23,8
<b>Wsp.zm.</b>	3,7	3,0	3,0	3,0	1,8	26,7	9,2	24,8	4,7	2,5

**Tablica 8 Wyniki badań Politechnika Wrocławskiego**

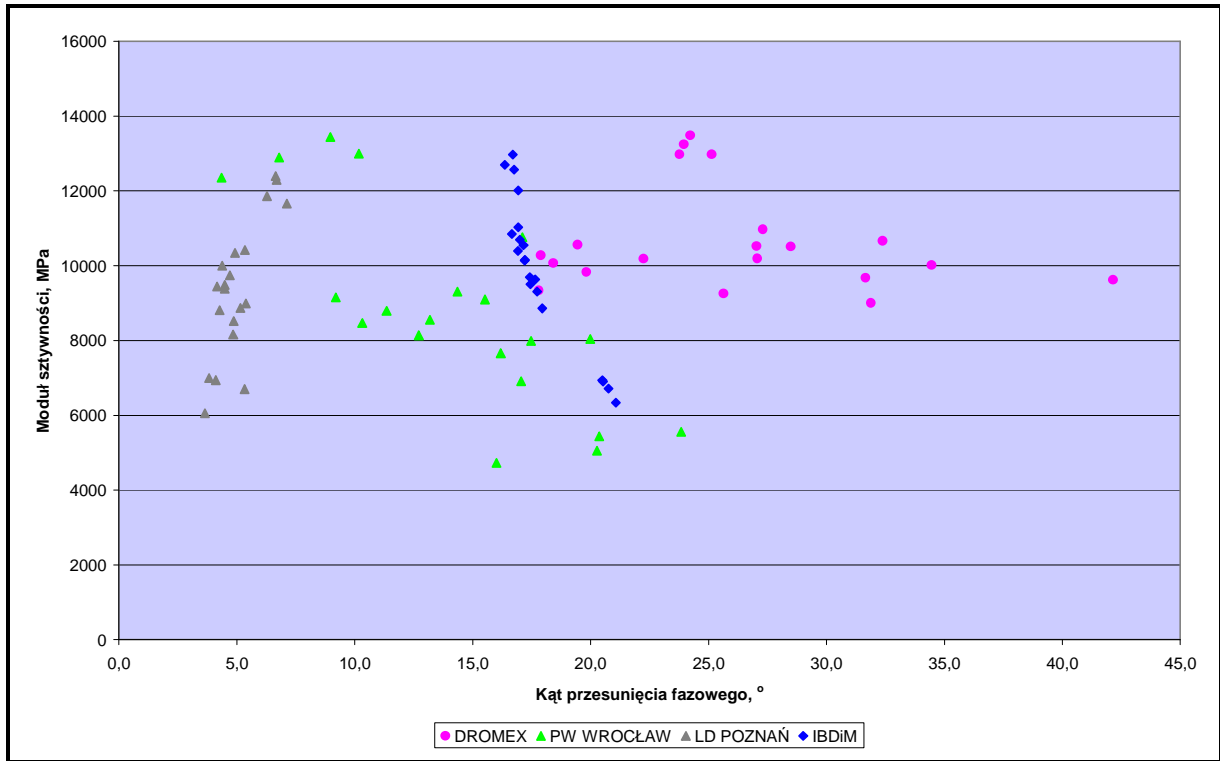
Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz	1 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz	20 Hz
<b>1</b>	5050	6909	8137	8795	12894	20,3	17,1	12,7	11,4	6,8
<b>2</b>	5562	7992	9099	10766	12357	23,8	17,5	15,5	17,1	4,4
<b>3</b>	5441	7658	8553	9155	12997	20,4	16,2	13,2	9,2	10,2
<b>4</b>	4726	8044	9310	8470	13439	16,0	20,0	14,4	10,3	9,0
<b>Średnia</b>	<b>5195</b>	<b>7650</b>	<b>8774</b>	<b>9296</b>	<b>12922</b>	<b>20,1</b>	<b>17,7</b>	<b>13,9</b>	<b>12,0</b>	<b>7,6</b>
<b>Odch.st.</b>	381	523	532	1019	445	3,2	1,6	1,3	3,5	2,6
<b>Min</b>	5562	8044	9310	10766	13439	23,8	20,0	15,5	17,1	10,2
<b>Max</b>	4726	6909	8137	8470	12357	16,0	16,2	12,7	9,2	4,4
<b>Wsp.zm.</b>	7,3	6,8	6,1	11,0	3,4	15,9	9,2	9,0	29,4	33,8



Rysunek 1 Porównanie wyników modułu sztywności



Rysunek 2 Porównanie wyników kąta przesunięcia fazowego



## 6.2 Wyniki badań modułu sztywności belki referencyjnej

W tablicach 9-12 zestawiono wyniki badań modułu sztywności w poszczególnych laboratoriach. Na rysunkach 5-10 dokonano porównania wyników.

**Tablica 9 Wyniki badań IBDiM**

Próba	Moduł sztywności, MPa				Kąt przesunięcia fazowego, °			
	1 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	1 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz
Odkształcenie 50 µm/m								
<b>1</b>	4111	3933	3814	3735	3,6	2,7	1,7	0,9
<b>2</b>	4175	3998	3863	3774	3,6	2,7	1,7	0,9
<b>3</b>	4155	3951	3839	3766	3,5	2,7	1,7	0,9
<b>Średnia</b>	<b>4147</b>	<b>3961</b>	<b>3839</b>	<b>3759</b>	<b>3,6</b>	<b>2,7</b>	<b>1,7</b>	<b>0,9</b>
<b>Odch.st.</b>	33	33	25	21	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Min</b>	4111	3933	3814	3735	3,5	2,7	1,7	0,9
<b>Max</b>	4175	3998	3863	3774	3,6	2,7	1,7	0,9
<b>Wsp.zm.</b>	0,8	0,8	0,6	0,6	0,9	1,8	1,8	1,9
Odkształcenie 100 µm/m								
<b>1</b>	4104	3921	3798	3728	3,7	2,8	1,8	0,8
<b>2</b>	4128	3942	3825	3753	3,6	2,8	1,9	1,1
<b>3</b>	4133	3946	3824	3755	3,8	2,9	1,9	1,0
<b>Średnia</b>	<b>4122</b>	<b>3936</b>	<b>3816</b>	<b>3745</b>	<b>3,7</b>	<b>2,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,0</b>
<b>Odch.st.</b>	15	13	15	15	0,1	0,1	0,0	0,1
<b>Min</b>	4104	3921	3798	3728	3,6	2,8	1,8	0,8
<b>Max</b>	4133	3946	3825	3755	3,8	2,9	1,9	1,1
<b>Wsp.zm.</b>	0,4	0,3	0,4	0,4	2,0	1,9	2,1	13,6
Odkształcenie 150 µm/m								
<b>1</b>	4146	3954	3833	3762	3,4	2,7	1,8	0,9
<b>2</b>	4151	3966	3841	3772	3,4	2,7	1,8	1,0
<b>3</b>	4154	3960	3837	3768	3,2	2,8	1,8	1,1
<b>Średnia</b>	<b>4151</b>	<b>3960</b>	<b>3837</b>	<b>3767</b>	<b>3,3</b>	<b>2,7</b>	<b>1,8</b>	<b>1,0</b>
<b>Odch.st.</b>	4	6	4	5	0,1	0,1	0,0	0,1
<b>Min</b>	4146	3954	3833	3762	3,2	2,7	1,8	0,9
<b>Max</b>	4154	3966	3841	3772	3,4	2,8	1,8	1,1
<b>Wsp.zm.</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	2,9	1,9	1,7	6,7

**Tablica 10 Wyniki badań Politechnika Wrocławska**

Próba	Moduł sztywności, MPa				Kąt przesunięcia fazowego, °			
	1 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	1 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz
Odkształcenie 50 µm/m								
1	7716	4532	4267	2662	6,3	1,6	1,5	2,0
Odkształcenie 100 µm/m								
1	7875	4378	4075	2661	6,8	3,8	0,8	0,6
Odkształcenie 150 µm/m								
1	7480	4798	3443	3136	9,4	2,1	1,4	1,7

Uwaga: W przypadku tego laboratorium przy danym odkształceniu przeprowadzono tylko jedną próbę, bez powtórzeń.

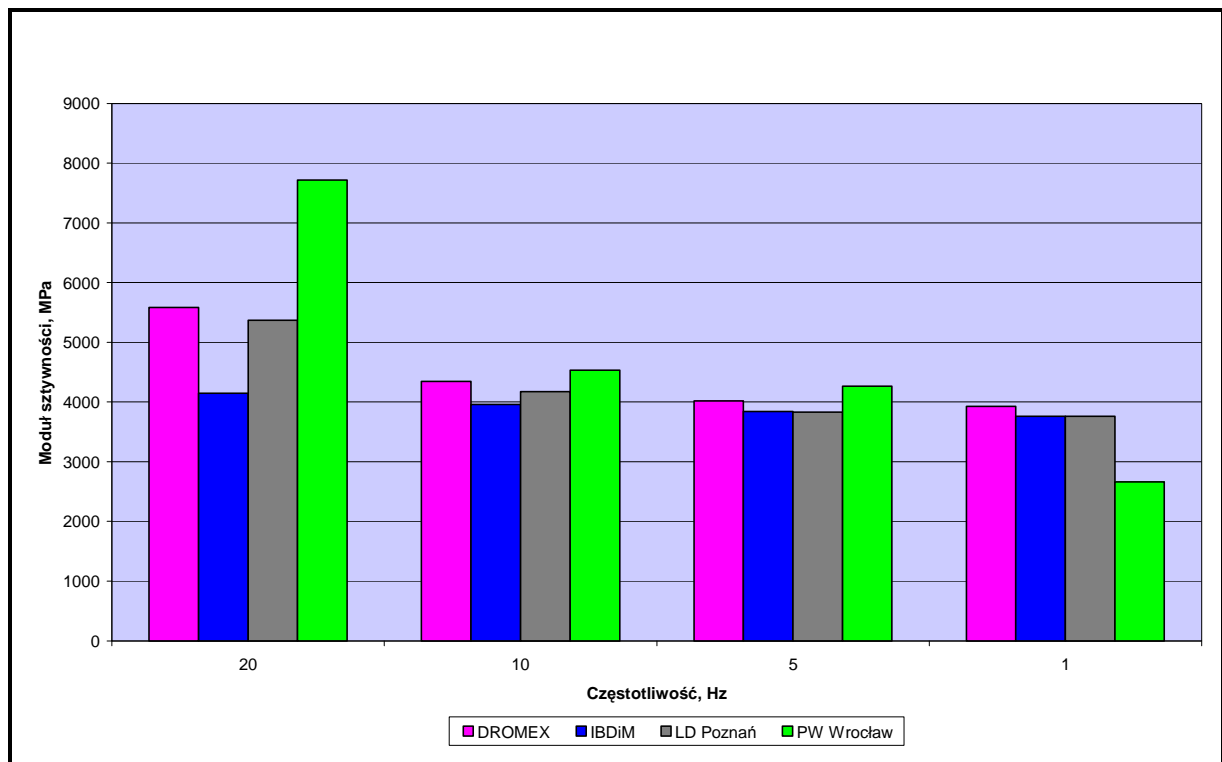
**Tablica 11 Wyniki badań BUDIMEX DROMEX S.A.**

Próba	Moduł sztywności, MPa				Kąt przesunięcia fazowego, °			
	20 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	20 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
Odkształcenie 50 µm/m								
1	5590	4325	4028	3921	10,8	5,1	3,0	2,6
2	5592	4415	4096	3943	10,4	5,6	2,7	1,6
3	5570	4302	3935	3921	10,2	6,3	3,1	1,9
<b>Średnia</b>	<b>5584</b>	<b>4347</b>	<b>4019</b>	<b>3928</b>	<b>10,5</b>	<b>5,6</b>	<b>2,9</b>	<b>2,0</b>
<b>Odch.st.</b>	12	60	81	13	0,3	0,6	0,2	0,5
<b>Min</b>	5570	4302	3935	3921	10,2	5,1	2,7	1,6
<b>Max</b>	5592	4415	4096	3943	10,8	6,3	3,1	2,6
<b>Wsp.zm.</b>	0,2	1,4	2,0	0,3	2,7	10,6	6,7	26,3
Odkształcenie 100 µm/m								
1	5534	4302	3949	3878	11,2	5,7	3,2	1,7
2	5511	4257	3926	3858	11,2	6,2	5,7	1,8
3	5500	4246	3893	3789	11,3	6,4	2,7	1,9
<b>Średnia</b>	<b>5515</b>	<b>4268</b>	<b>3923</b>	<b>3842</b>	<b>11,3</b>	<b>6,1</b>	<b>3,9</b>	<b>1,8</b>
<b>Odch.st.</b>	17	30	28	47	0,0	0,4	1,6	0,1
<b>Min</b>	5500	4246	3893	3789	11,2	5,7	2,7	1,7
<b>Max</b>	5534	4302	3949	3878	11,3	6,4	5,7	1,9
<b>Wsp.zm.</b>	0,3	0,7	0,7	1,2	0,2	6,5	40,9	5,8
Odkształcenie 150 µm/m								
1	5530	4296	3938	3858	11,2	6,3	3,6	1,5
2	5462	4182	3908	3850	14,4	5,3	3,7	1,7
3	5450	4220	3886	3760	12,3	6,0	3,4	1,8
<b>Średnia</b>	<b>5481</b>	<b>4233</b>	<b>3911</b>	<b>3823</b>	<b>12,6</b>	<b>5,9</b>	<b>3,6</b>	<b>1,7</b>
<b>Odch.st.</b>	43	58	26	54	1,6	0,5	0,1	0,2
<b>Min</b>	5450	4182	3886	3760	11,2	5,3	3,4	1,5
<b>Max</b>	5530	4296	3938	3858	14,4	6,3	3,7	1,8
<b>Wsp.zm.</b>	0,8	1,4	0,7	1,4	12,7	9,0	3,6	9,1

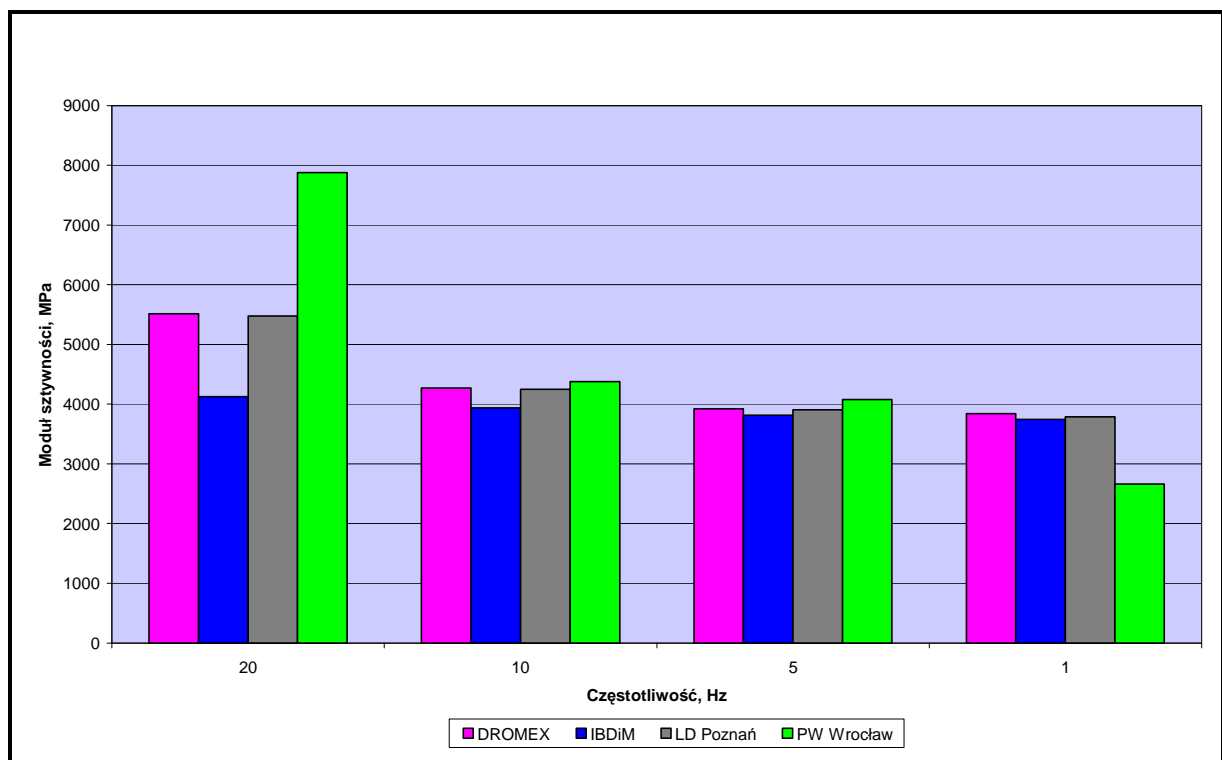


Tablica 12 Wyniki badań LD Poznań

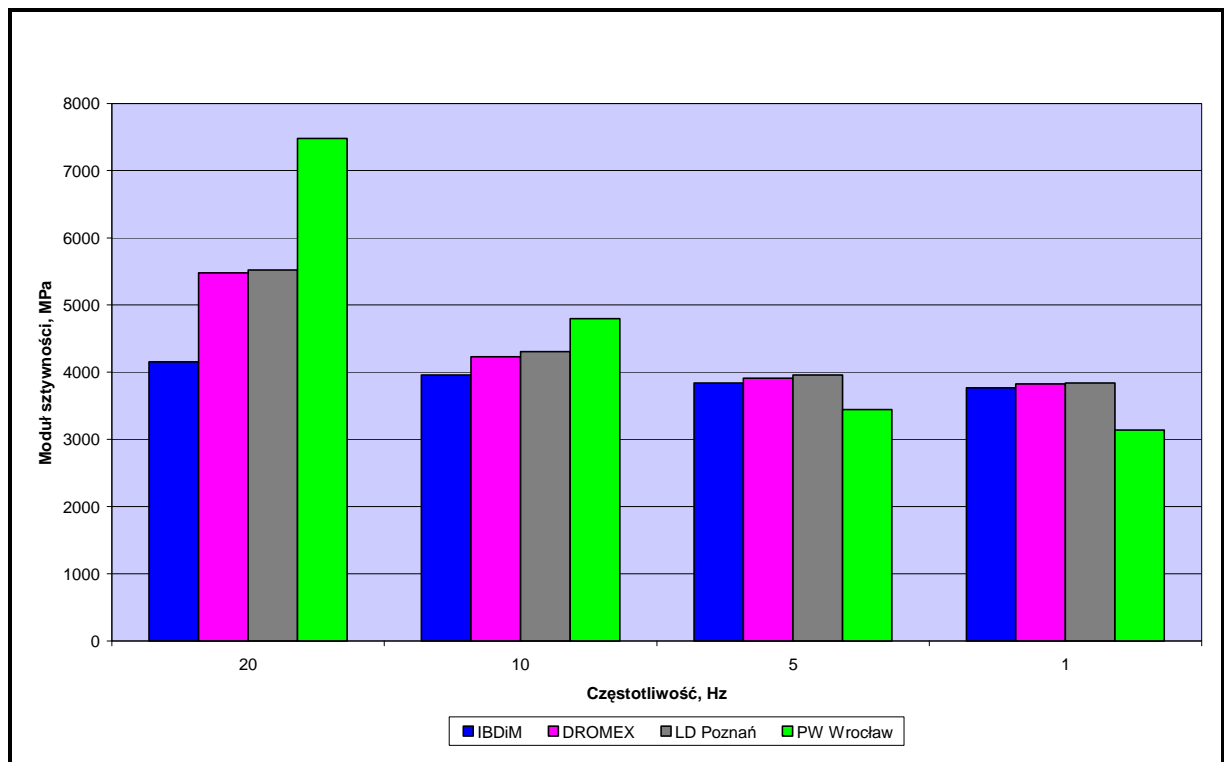
Próba	Moduł sztywności, MPa				Kąt przesunięcia fazowego, °			
	20 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	20 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
Odkształcenie 50 µm/m								
1	5389	4177	3827	3679	0,2	-0,4	-0,9	-2,7
2	5259	4027	3725	3663	1,3	-0,2	-2,4	-2,2
3	5456	4311	3948	3950	0,5	0,4	-1,4	-2,4
<b>Średnia</b>	<b>5368</b>	<b>4172</b>	<b>3834</b>	<b>3764</b>	<b>0,6</b>	<b>-0,1</b>	<b>-1,6</b>	<b>-2,4</b>
<b>Odch.st.</b>	100	142	112	162	0,6	0,4	0,7	0,2
<b>Min</b>	5259	4027	3725	3663	0,2	-0,4	-2,4	-2,7
<b>Max</b>	5456	4311	3948	3950	1,3	0,4	-0,9	-2,2
<b>Wsp.zm.</b>	1,9	3,4	2,9	4,3	91,4	-460,4	-46,6	-9,9
Odkształcenie 100 µm/m								
1	5532	4280	3880	3819	1,1	-1,6	-1,0	-0,8
2	5425	4217	3876	3701	-0,7	-1,3	-0,8	-1,5
3	5477	4254	3962	3842	1,3	-1,4	-0,9	-0,8
<b>Średnia</b>	<b>5478</b>	<b>4250</b>	<b>3906</b>	<b>3788</b>	<b>0,6</b>	<b>-1,4</b>	<b>-0,9</b>	<b>-1,1</b>
<b>Odch.st.</b>	53	32	48	76	1,1	0,2	0,1	0,4
<b>Min</b>	5425	4217	3876	3701	-0,7	-1,6	-1,0	-1,5
<b>Max</b>	5532	4280	3962	3842	1,3	-1,3	-0,8	-0,8
<b>Wsp.zm.</b>	1,0	0,7	1,2	2,0	189,6	-11,9	-12,2	-37,7
Odkształcenie 150 µm/m								
1	5549	4286	3962	3843	0,6	-0,5	-0,6	-0,6
2	5500	4299	3907	3824	0,0	-0,3	-0,9	-1,4
3	5517	4327	3999	3855	0,2	-0,5	-0,6	-1,3
<b>Średnia</b>	<b>5522</b>	<b>4304</b>	<b>3956</b>	<b>3841</b>	<b>0,2</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,7</b>	<b>-1,1</b>
<b>Odch.st.</b>	25	21	46	16	0,3	0,1	0,2	0,4
<b>Min</b>	5500	4286	3907	3824	0,0	-0,5	-0,9	-1,4
<b>Max</b>	5549	4327	3999	3855	0,6	-0,3	-0,6	-0,6
<b>Wsp.zm.</b>	0,5	0,5	1,2	0,4	119,2	-25,4	-24,2	-35,7



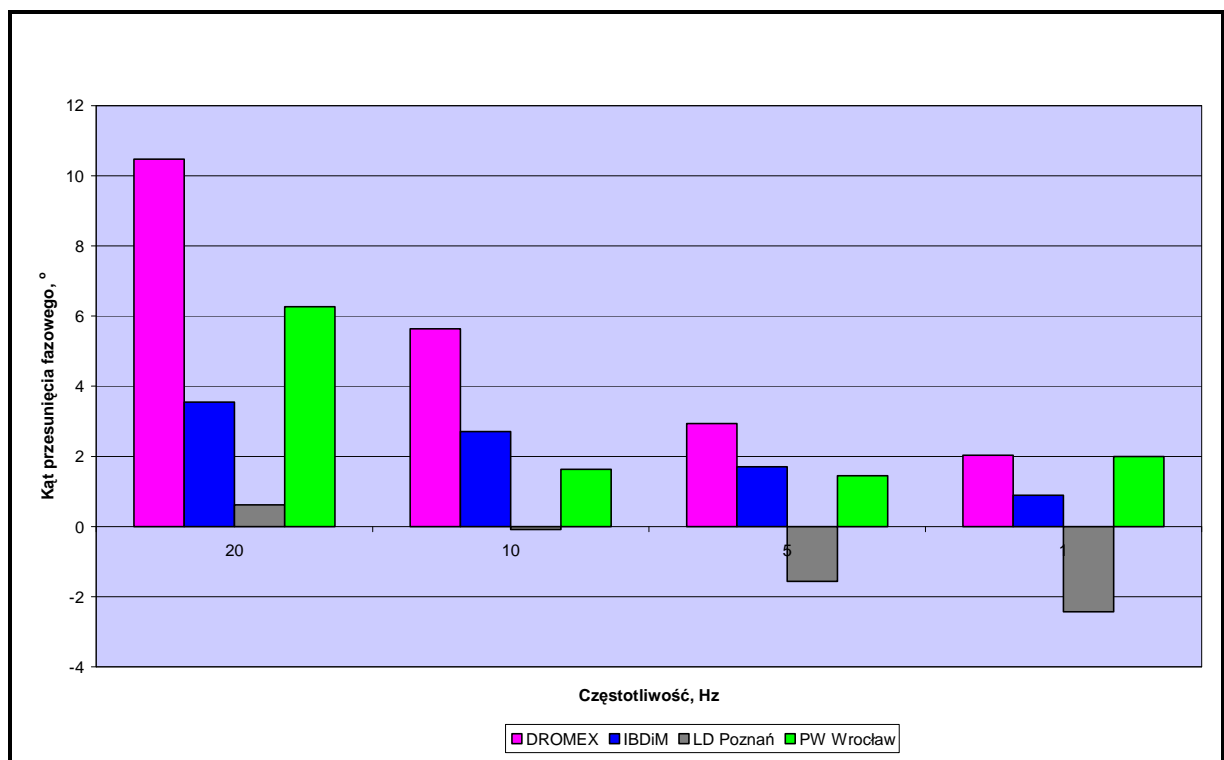
Rysunek 5 Porównanie wyników modułu sztywności przy odkształceniu 50 $\mu$ m/m



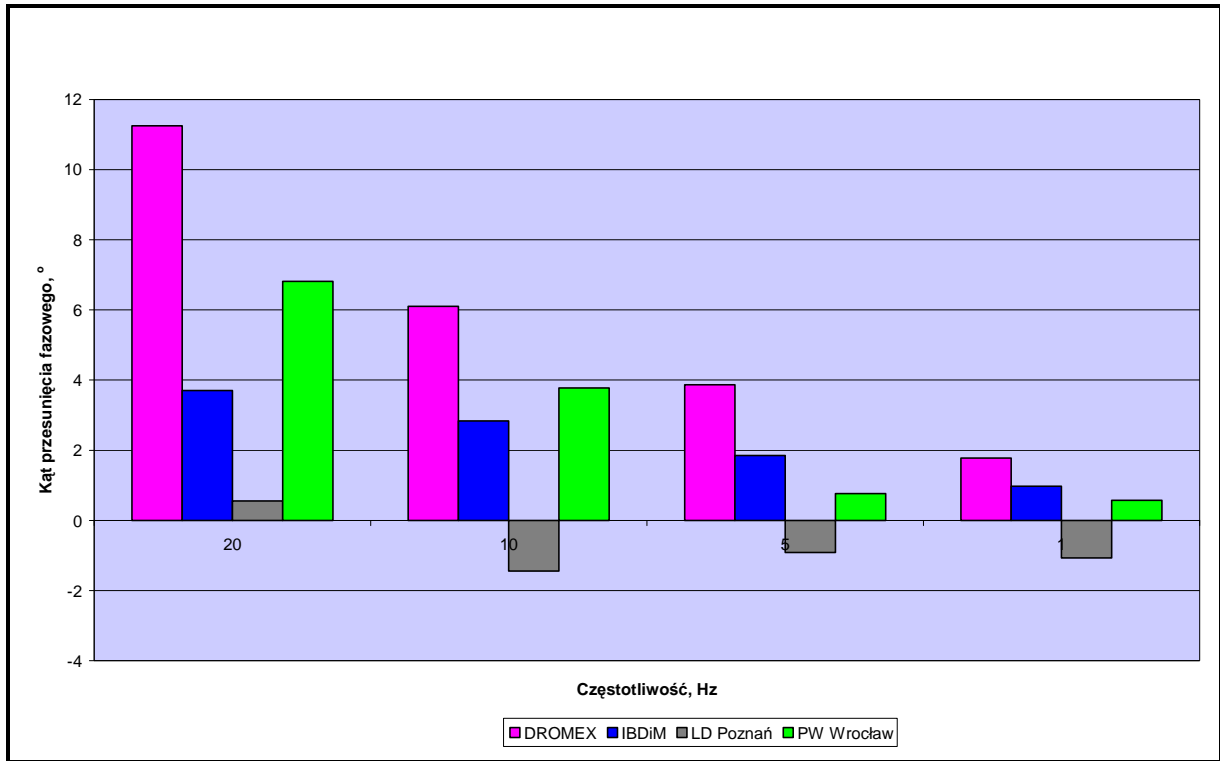
Rysunek 6 Porównanie wyników modułu sztywności przy odkształceniu 100 $\mu$ m/m



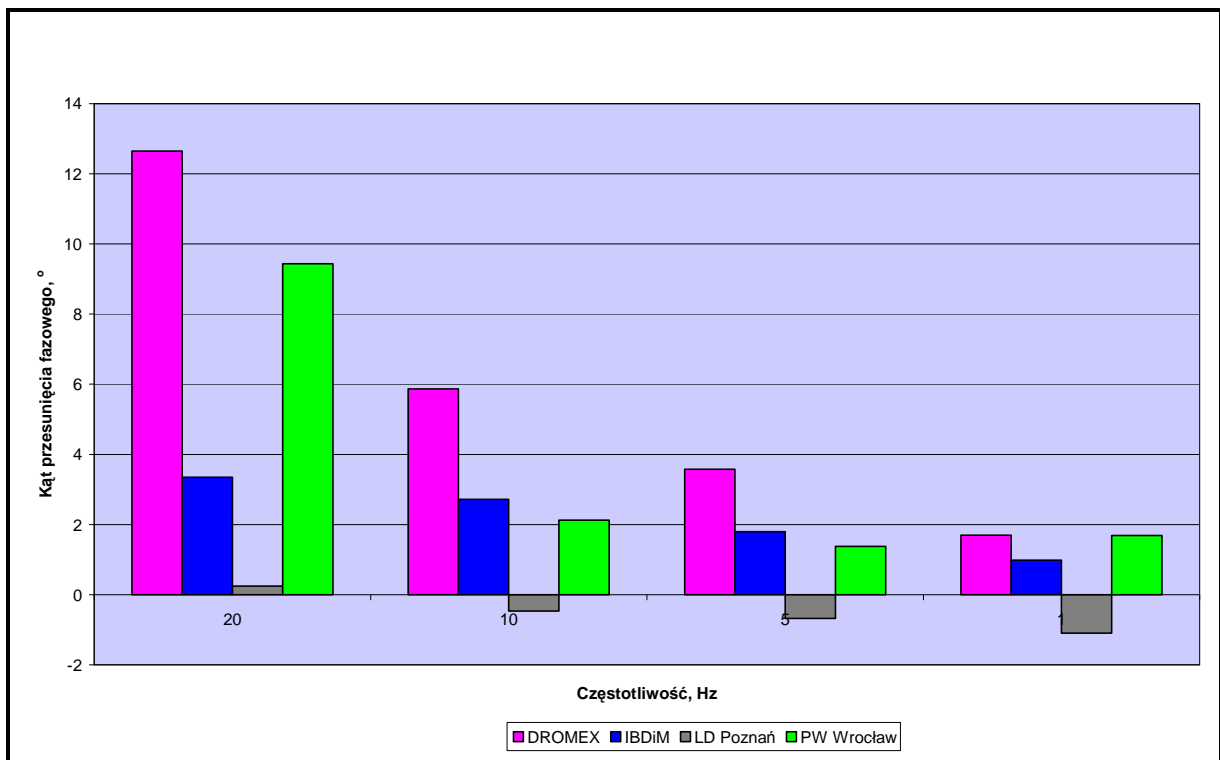
Rysunek 7 Porównanie wyników modułu sztywności przy odkształceniu 150 $\mu$ m/m



Rysunek 8 Porównanie wyników kąta przesunięcia fazowego przy odkształceniu 50 $\mu$ m/m



Rysunek 9 Porównanie wyników kąta przesunięcia fazowego przy odkształceniu 100µm/m



Rysunek 10 Porównanie wyników kąta przesunięcia fazowego przy odkształceniu 150µm/m

### 6.3 Wyniki badań modułu sztywności próbek BAWMS

W tablicach 13-16 zestawiono wyniki badań modułu sztywności w poszczególnych laboratoriach. Na rysunkach 11-12 dokonano porównania wyników. Laboratorium BUDIMEX DROMEX nie dostarczyło wyników z powodu awarii sprzętu.

**Tablica 13 Wyniki badań IBDiM**

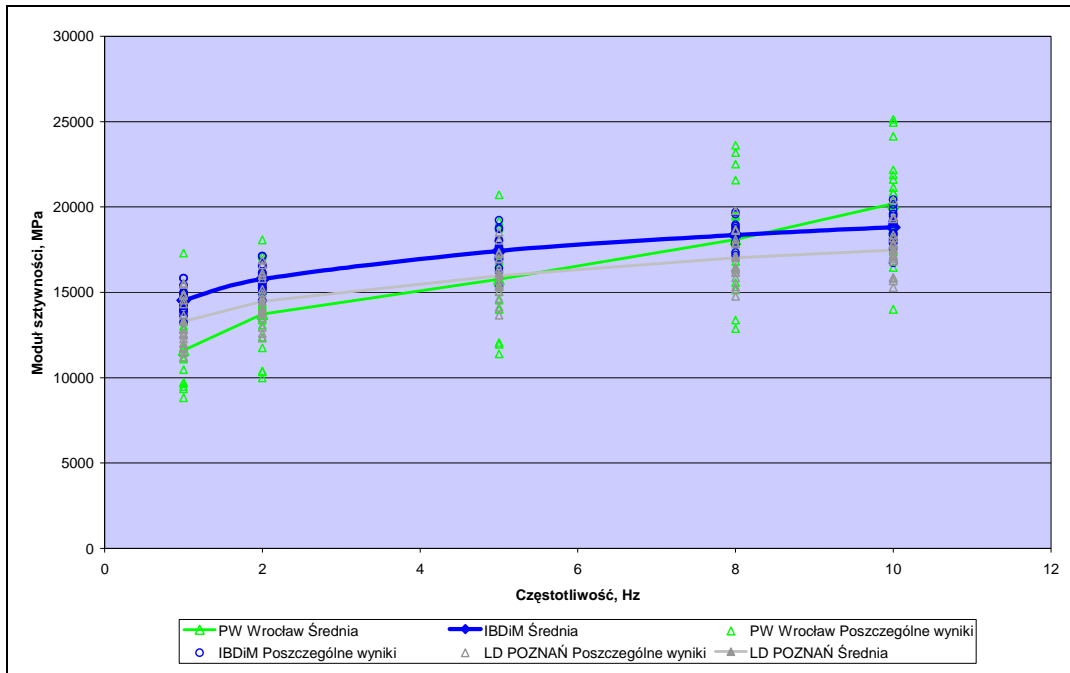
Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	10 Hz	8 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz
5	19011	18657	17712	16144	14938	9,8	9,7	9,7	10,1	10,7
6	18986	18440	17448	15801	14590	10,1	10,1	10,0	10,3	10,8
11	18765	18325	17482	15994	14887	9,2	8,9	8,8	9,0	9,3
12	19464	18963	17999	16628	15408	8,9	8,7	8,5	8,8	9,3
15	19176	17869	16951	15241	13982	9,8	10,1	10,1	10,6	11,3
16	19591	18763	17579	15661	14207	10,2	9,9	10,0	10,6	11,5
17	17859	17343	16422	14941	13866	9,3	9,4	9,3	9,8	10,3
18	20425		19229			9,5		9,1		
25	16726		15349			10,4		10,3		
26	17570	17171	16212	14504	13248	10,6	10,7	10,9	11,6	12,3
41	19105		17999			9,3		9,0		
51	18122	17822	16933	15319	13932	10,3	9,9	9,8	10,5	11,2
52	18408	18266	17205	15441	14056	10,3	10,0	10,2	10,7	11,5
53	18813	18342	17347	15801	14524	10,2	9,9	9,8	10,3	10,7
54	20145	19694	18766	17135	15816	9,4	9,1	8,9	9,6	10,3
55	19005	18483	17625	16141	15004	9,2	9,0	8,8	9,1	9,5
56	18331	17938	17056	15566	14488	9,5	9,3	9,2	9,4	9,6
57	18866	18465	17419	15594	14312	10,5	10,3	10,3	10,7	11,3
58	18751	18332	17408	15698	14422	10,4	10,1	10,1	10,6	11,1
69	19177	18864	18070	16501	15345	9,4	9,3	9,1	9,3	9,6
71	18838	18385	17481	15839	14664	9,4	9,0	9,0	9,2	9,6
72	19854	19570	18710	17099	15840	9,1	8,7	8,5	8,9	9,4
81	18463	17964	17007	15240	13996	10,2	10,1	10,2	10,7	11,5
82	18003	17802	16860	15088	13618	10,9	10,5	10,5	11,3	12,0
<b>Średnia</b>	<b>18810</b>	<b>18355</b>	<b>17428</b>	<b>15780</b>	<b>14531</b>	<b>9,8</b>	<b>9,6</b>	<b>9,6</b>	<b>10,0</b>	<b>10,6</b>
<b>Odch.st.</b>	819	624	831	669	693	0,6	0,6	0,7	0,8	1,0
<b>Min</b>	20425	19694	19229	17135	15840	10,9	10,7	10,9	11,6	12,3
<b>Max</b>	16726	17171	15349	14504	13248	8,9	8,7	8,5	8,8	9,3
<b>Wsp.zm.</b>	4,4	3,4	4,8	4,2	4,8	5,7	6,3	7,1	8,2	9,0

**Tablica 14 Wyniki badań LD Poznań**

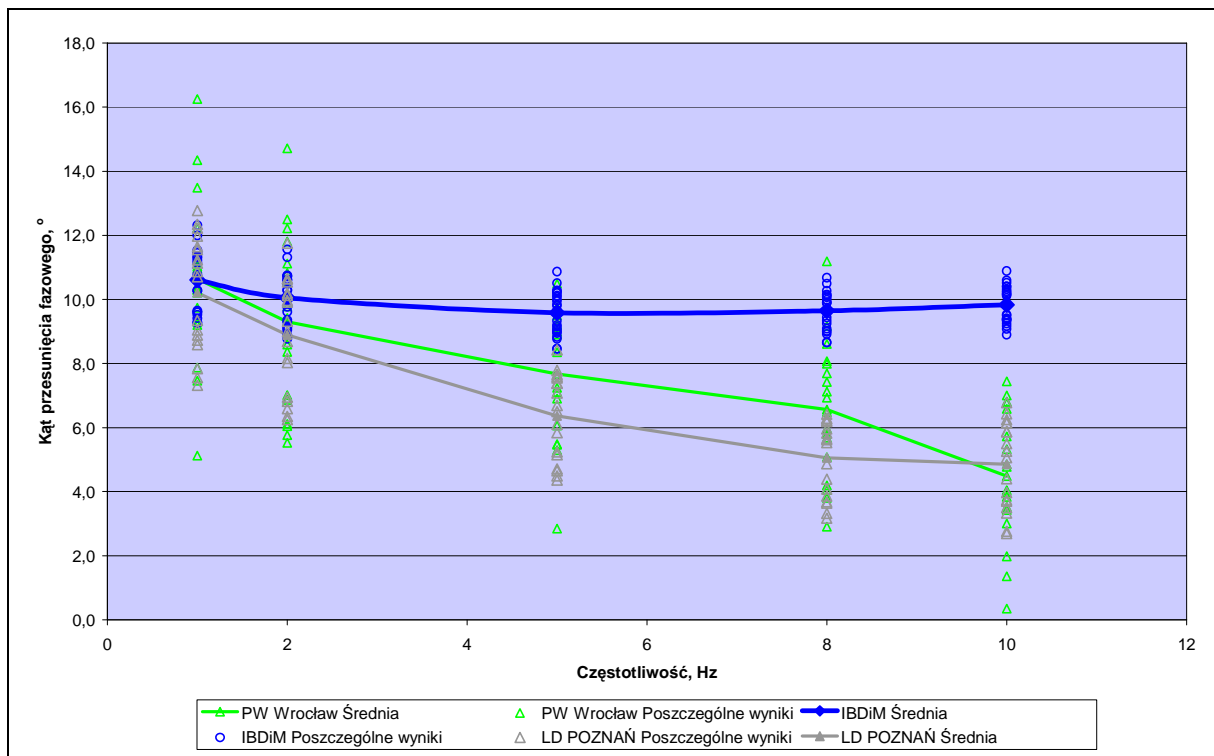
Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	10 Hz	8 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz
<b>1</b>	17855	18096	17344	16135	14854	3,5	4,1	4,5	6,3	7,6
<b>2</b>	18365	17917	16944	15178	14534	3,3	3,7	4,7	6,2	7,8
<b>3</b>	16962	17113	15673	13826	12601	5,3	5,8	7,6	9,3	11,6
<b>4</b>	15667	15332	14628	12948	11740	5,5	6,2	7,4	10,7	12,3
<b>9</b>	17073	16433	15455	13513	12506	6,2	6,0	7,7	10,2	11,2
<b>10</b>	17097	16330	15402	13970	12279	6,2	6,3	7,8	10,5	12,8
<b>13</b>	16808	16150	15342	13755	12578	6,1	6,2	6,7	10,1	11,1
<b>14</b>	17557	17104	16118	14665	13650	3,7	4,4	5,2	6,8	8,9
<b>29</b>	15283	14767	13657	12312	11204	6,4	5,6	7,6	9,9	11,6
<b>30</b>	17197	16156	15352	13503	11992	5,9	6,3	7,4	11,8	12,0
<b>31</b>	19297	18606	17240	15983	14871	2,7	3,6	5,2	8,0	9,1
<b>32</b>	19416	18680	18053	16607	15530	3,7	3,2	4,7	6,6	8,6
<b>35</b>	17768	16471	15053	14077	12817	4,4	5,5	6,5	8,7	9,3
<b>36</b>	17879	17814	16373	14958	14320	5,1	4,9	6,1	9,0	10,9
<b>37</b>	15866	15210	14127	12595	11448	6,8	6,4	8,4	10,6	12,2
<b>38</b>	15819	15857	15306	13818	12003	5,9	5,7	7,1	10,0	10,7
<b>43</b>	18180	18626	16984	15800	14780	4,0	3,9	5,8	6,9	7,3
<b>44</b>	20407	19771	18525	16881	15470	2,8	3,3	4,4	8,2	8,7
<b>Średnia</b>	<b>17472</b>	<b>17024</b>	<b>15976</b>	<b>14473</b>	<b>13288</b>	<b>4,9</b>	<b>5,1</b>	<b>6,4</b>	<b>8,9</b>	<b>10,2</b>
<b>Odch.st.</b>	1369	1398	1324	1374	1455	1,3	1,2	1,3	1,7	1,8
<b>Min</b>	20407	19771	18525	16881	15530	6,8	6,4	8,4	11,8	12,8
<b>Max</b>	15283	14767	13657	12312	11204	2,7	3,2	4,4	6,2	7,3
<b>Wsp.zm.</b>	7,8	8,2	8,3	9,5	11,0	27,8	23,0	20,8	19,5	17,5

**Tablica 15 Wyniki badań Politechnika Wrocławska**

Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	10 Hz	8 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz
<b>7</b>	20800	23182	17343	15076	11100	2,0	8,6	7,1	5,5	5,1
<b>8</b>	14002	12876	11386	9973	9350	5,3	9,2	9,0	10,6	10,3
<b>27</b>	18536	16412	15026	14182	13023	4,9	4,2	2,8	7,0	9,2
<b>28</b>	24136	22514	18768	17114	14988	6,8	11,2	9,5	12,2	14,3
<b>39</b>	17392	16458	15827	13376	11789	5,7	5,8	10,5	9,8	11,0
<b>40</b>	18556	16801	15719	14309	9482	1,4	5,7	7,2	11,1	9,3
<b>45</b>	22182	17985	15567	13071	11707	7,4	7,7	9,7	11,8	9,7
<b>46</b>	20840	18750	16678	15183	13298	4,0	7,1	8,4	8,6	10,2
<b>59</b>	17155	15565	14548	10350	8829	0,4	6,0	9,2	12,5	12,2
<b>60</b>	21880	17500	17179	13976	12869	3,0	2,9	6,1	6,9	13,5
<b>61</b>	21610	18334	15538	14088	11748	3,5	7,4	7,6	14,7	16,3
<b>62</b>	19840	16428	11940	10402	9694	4,8	3,8	8,9	8,4	7,9
<b>63</b>	16452	15137	14000	11750	11179	6,8	8,1	6,9	9,4	10,4
<b>64</b>	21141	19462	16825	14330	10466	3,8	6,9	5,5	6,0	10,3
<b>67</b>	18752	13371	12053	12391	9663	3,4	4,1	5,3	6,1	7,5
<b>68</b>	20284	19507	15468	13927	9716	4,0	5,1	5,5	5,8	11,1
<b>75</b>	24955	21570	19170	15478	12818	7,0	6,5	9,2	10,8	12,2
<b>76</b>	25141	23621	20704	18079	17302	6,6	8,0	9,8	10,1	11,0
<b>Średnia</b>	<b>20203</b>	<b>18082</b>	<b>15763</b>	<b>13725</b>	<b>11612</b>	<b>4,5</b>	<b>6,6</b>	<b>7,7</b>	<b>9,3</b>	<b>10,6</b>
<b>Odch.st.</b>	2973	3138	2478	2188	2195	2,0	2,1	2,0	2,7	2,6
<b>Min</b>	25141	23621	20704	18079	17302	7,4	11,2	10,5	14,7	16,3
<b>Max</b>	14002	12876	11386	9973	8829	0,4	2,9	2,8	5,5	5,1
<b>Wsp.zm.</b>	14,7	17,4	15,7	15,9	18,9	45,4	32,2	26,5	28,9	24,1



Rysunek 11 Porównanie wyników modułu sztywności



Rysunek 12 Porównanie wyników kąta przesunięcia fazowego

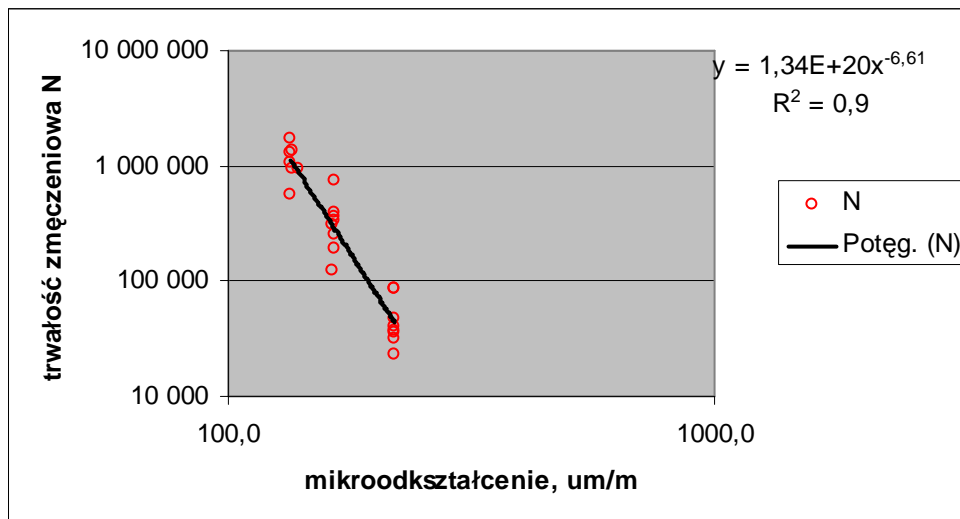


#### 6.4 Wyniki badań zmęczenia próbek BAWMS

W tablicach 16-19 zestawiono wyniki badań zmęczenia w poszczególnych laboratoriach oraz wartości obliczonych parametrów charakterystyk zmęczeniowych. Na rysunkach 13-15 przedstawiono wykresy charakterystyk zmęczeniowych. Laboratorium BUDIMEX DROMEX nie dostarczyło wyników z powodu awarii sprzętu.

**Tablica 16 Wyniki badań zmęczenia (IBDiM)**

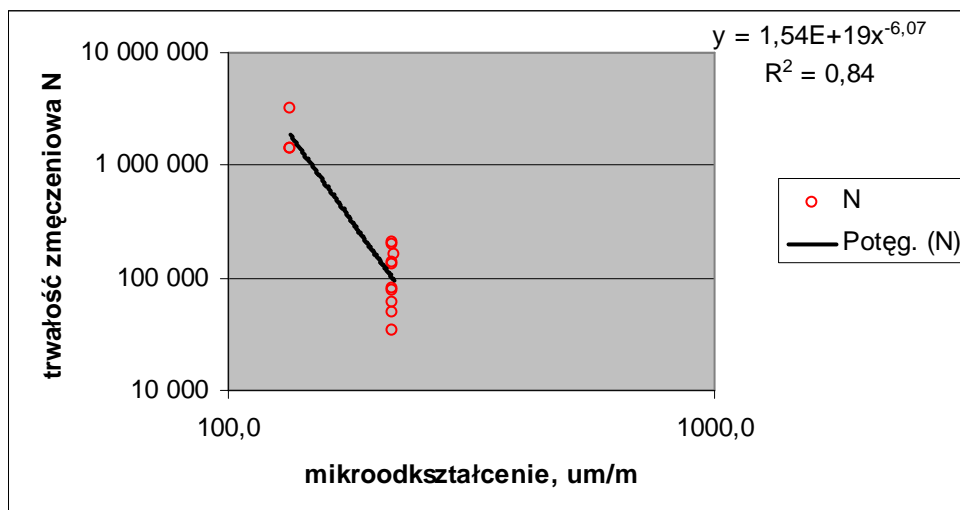
Próbka	$\epsilon$ , $\mu\text{m/m}$	$E_0$	N
17	219,6	16409	46704
18	219,1	18874	31752
25	219,8	15647	35244
41	218,6	18007	23589
52	219,3	17490	41052
69	219,4	18986	86830
81	219,6	17319	87022
82	219,9	17141	36656
<b>Średnia</b>			<b>48 606</b>
<b>Odchylenie</b>			<b>24 579</b>
<b>Współczynnik zmienności, %</b>			<b>50,6</b>
5	164,8	17484	397234
6	164,5	1143	747295
11	164,2	18852	122321
12	164,6	18589	188367
16	164,5	18918	340628
26	164,4	19444	304107
51	164,5	18435	366239
72	164,5	19277	253609
<b>Średnia</b>			<b>339 975</b>
<b>Odchylenie</b>			<b>188 597</b>
<b>Współczynnik zmienności, %</b>			<b>55,5</b>
15	134,9	18352	1382525
42	139,2	20770	942258
53	134,6	18854	1704012
54	134,6	19324	567469
57	134,8	18784	1053737
58	134,9	18719	938858
<b>Średnia</b>			<b>1 129 862</b>
<b>Odchylenie</b>			<b>370 464</b>
<b>Współczynnik zmienności, %</b>			<b>32,8</b>



Rysunek 13 Charakterystyka zmęczeniowa uzyskana w IBDiM

Tablica 17 Wyniki badań zmęczenia (LD POZNAŃ)

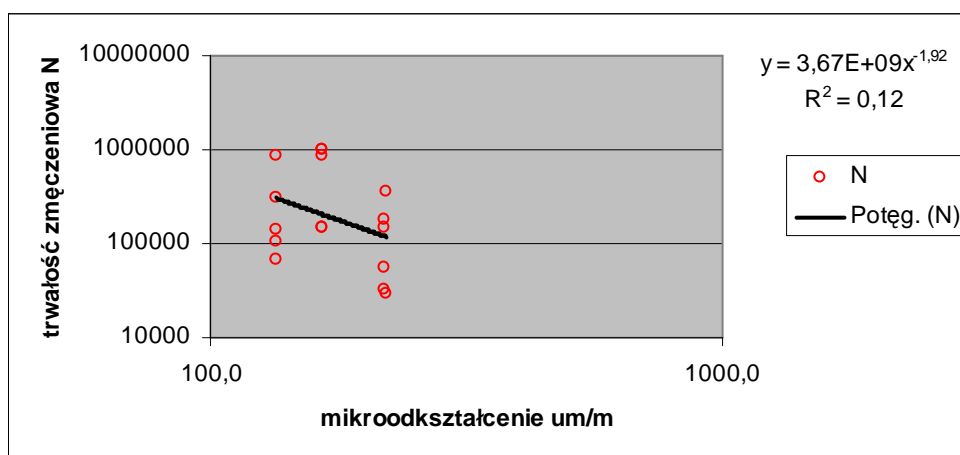
Próbka	$\epsilon$ , $\mu\text{m/m}$	$E_0$	N
1	217,8	18447	200290
2	218,5	18684	134720
3	218,9	17156	158480
10	218,2	17313	207330
13	218,0	16085	80660
14	217,8	16488	59490
35	218,3	20470	50240
37	218,4	15902	131820
38	218,4	16853	77220
43	218,2	19363	33790
<b>Średnia</b>			<b>113 404</b>
<b>Odchylenie</b>			<b>62 194</b>
<b>Współczynnik zmienności, %</b>			<b>54,8</b>
30	134,6	17210	3130080
31	134,6	19704	1408920
36	134,2	18844	1416150
<b>Średnia</b>			<b>1 985 050</b>
<b>Odchylenie</b>			<b>991 632</b>
<b>Współczynnik zmienności, %</b>			<b>50,0</b>



Rysunek 14 Charakterystyka zmęczeniowa uzyskana w LD POZNAŃ

Tablica 18 Wyniki badań zmęczenia (Politechnika Wrocław)

Próbka	$\varepsilon$ , $\mu\text{m/m}$	$E_0$	N
8	220	13734	365 499
60	218	16408	56 499
76	219	19018	182 500
63	220	16103	29 999
67	218	16917	32 499
46	220	16973	146 499
<b>Średnia</b>			<b>135 583</b>
<b>Odchylenie</b>			<b>129 004</b>
<b>Współczynnik zmienności, %</b>			<b>95,1</b>
27	165	17020	1 017 499
62	165	19515	988 999
75	165	21262	848 905
7	165	21545	146 499
28	165	19473	151 501
<b>Średnia</b>			<b>630 681</b>
<b>Odchylenie</b>			<b>444 322</b>
<b>Współczynnik zmienności, %</b>			<b>70,5</b>
45	135	19 532	852999
40	135	17 402	313999
68	135	17 759	139999
61	135	17 120	103533
64	135	18 573	66499
<b>Średnia</b>			<b>295 406</b>
<b>Odchylenie</b>			<b>325 815</b>
<b>Współczynnik zmienności, %</b>			<b>110,3</b>



**Rysunek 15 Charakterystyka zmęczeniowa uzyskana na Politechnice Wrocławskiej**

**Tablica 19 Porównanie parametrów charakterystyk zmęczeniowych**

Parametr	IBDiM	LD POZNAŃ	Polit. Wrocław (1)	Polit. Wrocław (2)
A	$1,03 \cdot 10^{20}$	$1,54 \cdot 10^{19}$	$3,67 \cdot 10^9$	$1,62 \cdot 10^{18}$
b	-6,56	-6,07	-1,92	-5,66
R <sup>2</sup>	0,90	0,84	0,12	0,43
ε <sub>6</sub>	137	149	72	143
ε <sub>6(max)</sub> <sup>1</sup>	147	165	134	168
ε <sub>6(min)</sub> <sup>2</sup>	127	134	28	73

<sup>1), 2)</sup> – wartości określające przedział ufności 95%

Wyniki Politechniki Wrocławskiej przedstawiono w dwóch wariantach: z uwzględnieniem wszystkich wyników (1) i po odrzuceniu wyników wątpliwych (2).

## 7 Analiza wyników

### 7.1 Moduł sztywności próbek SMA

Badania modułu sztywności w tej części pracy prowadzone były na tych samych belkach przekazywanych pomiędzy laboratoriami. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- o wykresy modułów sztywności mają typowy przebieg za wyjątkiem wyników z laboratorium BUDIMEX DROMEX, gdzie w niższych częstotliwościach widać wyraźne zakłócenia przebiegu wykresu,
- o istotne różnice można zauważyć w wynikach pomiaru kąta przesunięcia fazowego, różnice są duże, charakter wykresów na podstawie wyników dla

laboratoriów BUDIMEXU i Politechniki Wrocławskiej jest przypadkowy i odbiega od typowej zależności, gdzie wzrost częstotliwości badania powoduje zmniejszenie wartości kąta przesunięcia fazowego,

- o konsekwencją tych nieprawidłowych przebiegów są nieprawidłowości w przebiegu wykresów Blacka i Cole-Cole, jedynie wykresy IBDiM i LD Poznań mają kształty typowe dla mieszanek mineralno-asfaltowych,
- o różnice w wynikach modułu sztywności w częstotliwości typowej dla tego badania (10 Hz) są na poziomie 10%,
- o najniższe współczynniki zmienności uzyskano w badaniach IBDiM, w pozostałych laboratoriach były nieco wyższe, szczególnie w zakresie kąta przesunięcia fazowego.

## **7.2 Moduł sztywności belki referencyjnej**

Badania modułu sztywności w tej części pracy prowadzone były na specjalnej belce referencyjnej z tworzywa sztucznego przekazywanej pomiędzy laboratoriami. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- o wykresy modułów sztywności mają typowy przebieg za wyjątkiem wyników z laboratorium BUDIMEX DROMEX, gdzie w niższych częstotliwościach widać wyraźne zakłócenia przebiegu wykresu,
- o istotne różnice można zauważyć w wynikach pomiaru kąta przesunięcia fazowego, różnice są duże, szczególnie zaskakujące wyniki uzyskano w przypadku LD POZNAŃ, gdzie wartości są w wielu przypadkach ujemne,
- o różnice w wynikach modułu sztywności w częstotliwości typowej dla tego badania (10 Hz) są na poziomie 5%,
- o największe różnice w wynikach modułu sztywności występują w częstotliwości 20Hz, co może być sygnałem, że aparaty o zasilaniu pneumatycznym mają trudności w prawidłowej pracy w częstotliwościach wyższych od 10Hz,

- o najniższe współczynniki zmienności uzyskano w badaniach IBDiM, w pozostałych laboratoriach były nieco wyższe, szczególnie w zakresie kąta przesunięcia fazowego.

### **7.3 Moduł sztywności próbek BAWMS**

Badania modułu sztywności w tej części pracy prowadzone były na belkach z mieszanki typu BAWMS rozdzielonych pomiędzy laboratoria. Laboratorium BUDIMEX DROMEX nie dostarczyło wyników i nie jest objęte analizą. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- o najlepszą powtarzalność wyników, zarówno w zakresie modułu sztywności jak i kąta przesunięcia fazowego uzyskano w laboratorium IBDiM, natomiast największy rozrzut wyników uzyskano w laboratorium Politechniki Wrocławskiej,
- o wykresy modułów sztywności oraz kąta przesunięcia fazowego mają typowy przebieg, przy czym w przypadku wyników z Politechniki i LD Poznań mają większe nachylenie niż w przypadku IBDiM,
- o różnice w wynikach modułu sztywności w częstotliwości typowej dla tego badania (10 Hz) są na poziomie 5-10%.

### **7.4 Trwałość zmęczeniowa mieszanki BAWMS**

Badania modułu sztywności w tej części pracy prowadzone były na belkach z mieszanki typu BAWMS rozdzielonych pomiędzy laboratoria. Laboratorium BUDIMEX DROMEX nie dostarczyło wyników i nie jest objęte analizą. Laboratorium IBDiM przedstawiło kompletny zestaw wyników 18 badań. W przypadku laboratorium Politechniki Wrocławskiej 2 próbki uległy zniszczeniu. Natomiast ostatnia seria badań przy odkształceniu 135  $\mu\text{m}/\text{m}$  charakteryzowała się bardzo dużym rozrzutem wyników oraz odbiegała od wyników, które byłyby zgodne z oczekiwaniami i zbliżone z wynikami uzyskanymi w pozostałych laboratoriach. W przypadku LD Poznań pięć próbek uległo zniszczeniu. Podobne problemy sygnalizowało laboratorium BUDIMEX DROMEX przy największej amplitudzie. W większości przypadków zniszczenie następowało na początku badania. Należy tutaj podkreślić, że podobne przypadki nigdy się nie zdarzały w 7-letniej praktyce badań w IBDiM. Oczywiście

prawdopodobną przyczyną mogłyby być niedoskonałości w strukturze próbki lub jest uszkodzenie przed badaniem. Jednak bardziej prawdopodobnymi przyczynami są błędy w obsłudze aparatu: np. podczas zaciskania próbki, a przede wszystkim w działaniu samych urządzeń. W okresie początkowym badań cyklicznych w urządzeniach działających na zasadzie sprzężenia zwrotnego następuje stopniowe przybliżanie sygnału uzyskanego do sygnału komendy. Jeżeli parametry pracy urządzenia (tzw. tuning) są źle ustawione, to uzyskanie zamierzonego sygnału może następować z dużym opóźnieniem (lub nigdy może nie być uzyskane), a w innym przypadku może dojść do „przesterowania” tzn. do zadania zbyt dużego obciążenia co może właśnie zniszczyć próbkę. Należy również dodać, że w aparatach IPC i Cooper, możliwości ingerencji w ustawienia „tuningu” są ograniczone. Ograniczona jest również możliwość obserwacji sygnałów w czasie rzeczywistym. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- najlepsze powtarzalności wyników uzyskano w laboratorium IBDiM oraz LD Poznań. W przypadku wyników z Politechniki Wrocławskiej rozrzuty były duże, a współczynniki zmienności przy poszczególnych poziomach odkształcenia wynosiły od 70 do 110%,
- konsekwencją rozrzutu wyników jest szerokość przedziału ufności obliczonego parametru  $\varepsilon_6$ : w przypadku IBDiM od 127 do 147  $\mu\text{m/m}$ , LD Poznań od 134 do 165  $\mu\text{m/m}$ , Politechniki Wrocławskiej od 73 do 168  $\mu\text{m/m}$  (28-134  $\mu\text{m/m}$ ),
- wyniki uzyskane w LD Poznań są około 9% większe od uzyskanych w IBDiM, co należy uznać za dobrą zgodność wyników, w badaniach międzylaboratoryjnych w ramach komitetu RILEM rozrzuty były dużo większe<sup>[1]</sup>,
- również odrzucając wyniki Politechniki przy odkształceniu 135  $\mu\text{m/m}$  uzyskuje się zgodny z pozostałymi laboratoriami wynik  $\varepsilon_6$ , przy szerszym przedziale ufności.

### **7.5 Wpływ bezwładności poruszającej się masy**

Istotną różnicą pomiędzy normami PN-EN 12697-24 i -26 a normą AASHTO TP8-94, która dotychczas była stosowana w Polsce jest uwzględnienie w obliczeniach wpływu bezwładności poruszającej się masy. Dodatkowe badania, analizy i konsultacje z autorem normy EN pozwoliły stwierdzić, że w przypadku aparatury MTS nie ma

potrzeby uwzględniania wpływu masy poruszających się części aparatu. Natomiast uwzględnienie masy próbki zwiększa moduł sztywności o około 1%. W przypadku pozostałych aparatów konieczne jest uwzględnienie wszystkich poruszających się mas. Powoduje to zwiększenie modułu o około 3% (aparaty IPC) i około 8% w przypadku aparatu Coopera.



## 8 Podsumowanie

Podstawowym efektem pracy jest przegląd aparatury dostępnej w Polsce do badań metodą belki czteropunktowo zginanej, w ramach którego przeprowadzono weryfikację procedur stosowanych w laboratoriach oraz wdrożenie metodyki wg nowych norm PN-EN. Dostępna aparatura różni się pomiędzy sobą rozwiązaniami konstrukcyjnymi, oprogramowaniem, możliwością kontrolowania i sterowania przez operatora oraz rodzajem zasilania. Aparaty pneumatyczne IPC lub Cooper są urządzeniami prostszymi w obsłudze i działaniu od aparatury hydraulicznej MTS. Porównanie wyników IBDiM i LD Poznań pozwala jednak stwierdzić, że jest możliwe w pewnym zakresie uzyskanie odtwarzalnych wyników. Niezbędne jest jednak systematyczne i częste sprawdzanie poprawności działania sprzętu wg procedur opisanych w normach EN poprzez badania kontrolne na belkach referencyjnych. Uważamy, że wskazane jest również wyposażenie urządzeń IPC i Cooper w aparaturę lub oprogramowanie pozwalające obserwować zadane i uzyskane sygnały w czasie rzeczywistym, co pozwoli na natychmiastowe wykrycie nieprawidłowości w działaniu systemu. Na podstawie badań na belce referencyjnej można stwierdzić, że aparaty pneumatyczne gorzej działają w wyższej częstotliwości obciążenia. Dlatego też celowe jest zmniejszenie częstotliwości badań zaproponowanych w normie 13108-20, co było już kilkakrotnie zgłaszane w CEN TC227 także przez polskich reprezentantów.

Stwierdzono dobrą odtwarzalność wyników w typowych warunkach badania modułu sztywności (10°C, 10Hz). Natomiast w przypadku pomiaru kąta przesunięcia fazowego różnice są znaczne. Za wyjątkiem IBDiM, rozrzuty w wynikach tego parametru są bardzo duże. Przyczyną może być metoda pomiaru lub odbiegający od sinusoidy sygnał obciążenia. Najdokładniejsza metoda polega na pomiarze odstępu czasowego pomiędzy przejściami przez zero siły i przemieszczenia. W ten sposób działa MTS. Inny sposób to różnica w czasie pomiędzy wartościami szczytowymi tych sygnałów. W obu metodach najdokładniejsze wyniki są wtedy gdy wygląd sygnałów jest idealnym sinusem. Dlatego m.in. korzystne jest stosowanie oscyloskopów do obserwacji poprawności działania urządzenia. Bardziej zaawansowane metody polegają na zastosowaniu np. transformacji Fouriera. Prawdopodobną przyczyną jest również zniekształcenie sygnałów.

Pozytywnie należy ocenić porównanie wyników badania zmęczenia, pamiętając o problemach w niektórych laboratoriach. W tej części pracy jedno z laboratoriów nie dostarczyło z przyczyn technicznych wyników, co ogranicza zakres porównania. W badaniach zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych rozrzuty wyników są zazwyczaj dość duże. Zależą od jednorodności struktury próbek (rozłożenie kruszywa w próbce), zagęszczenia, zawartości asfaltu i uziarnienia mieszanki. Najlepsza powtarzalność wyników uzyskiwana jest w mieszankach drobnoziarnistych o dużej zawartości asfaltu. Dodatkowym czynnikiem jest dokładność aparatury. Z tego powodu konieczne jest przestrzeganie wymaganej przez normy minimalnej liczby badań przy danym poziomie odkształcenia.

Reasumując, należy podkreślić, że wdrażane metody badań zmęczenia i modułu sztywności są badaniami trudnymi, wymagają od operatora sporej wiedzy i kultury technicznej. Jak pokazały doświadczenia z przeglądu laboratoriów, możliwe jest nieświadome popełnianie bardzo poważnych błędów w obsłudze i analizie wyników. Podczas wdrażania tych metod w kolejnych laboratoriach konieczne jest szkolenie operatorów i prowadzenie badań porównawczych. W dalszej perspektywie należy dążyć do określenia dokładności powtarzalności i odtwarzalności, które nie są do tej pory podawane przez normy EN.

---

<sup>1</sup> Di Benedetto H., de La Roche C., Baaj H., Pronk A., Lundström R.: "Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution" - PTEBM, Zurich 2003;