

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

**Sprawozdanie końcowe**

**„Analiza zdolności zbrojenia nawierzchni siatką z wykorzystaniem Metody  
Elementów Skończonych”**

**Temat WS-02**

Opracowali:

**inż. Dominika Jezierska**  
**inż. Maciej Maliszewski**  
**mgr inż. Robert Mularzuk**

Kierownik Zakładu  
Technologii Nawierzchni:

**prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski**

Współpraca – Politechnika Warszawska  
**dr hab. inż. Stanisław Jemiolo**

Warszawa, czerwiec 2006 r.



## Spis treści

Wstęp.....	4
<b>I. Modele kompozytów o izotropowej matrycy zbrojonej regularną siatką.....</b>	<b>5</b>
1. Uwagi wstępne .....	5
1.1. Podstawowe pojęcia mechaniki kompozytów.....	5
1.2. Wyznaczenie sprężystych własności efektywnych metodą energetyczną .....	7
2. Liniowo-sprężysty ortotropowy model przestrzenny – izotropowa matryca zbrojona dwiema rodzinami włókien .....	12
2.1. Podstawowe założenia i relacje konstytutywne .....	12
2.2. Wyprowadzenie związku odwrotnego .....	14
2.3. Podstawowe uwagi i wnioski .....	15
3. Nieliniowo-sprężysty ortotropowy model przestrzenny – izotropowa matryca zbrojona dwiema rodzinami włókien nie przenoszących ściskania .....	20
3.1. Podstawowe założenia i relacje konstytutywne .....	20
3.2. Modyfikacja modelu z uwzględnieniem kruchego pęknięcia włókien .....	22
3.3. Interpretacja testu jednoosiowego ściskania/rozciągania w przypadku modelu nieliniowego.....	23
4. Optymalna aproksymacja liniowo-sprężystego ortotropowego modelu kompozytu modelem izotropowym.....	26
4.1. Sformułowanie i rozwiązanie zagadnienia optymalizacji.....	26
4.2. Interpretacja wyników .....	27
5. Optymalna aproksymacja ortotropowego związku Hooke’a PSN materiałem izotropowym PSN oraz interpretacja wyniku w przypadku modelu przestrzennego kompozytu o izotropowej matrycy zbrojonej siatką.....	30
5.1. Uwagi wstępne .....	30
5.2. Siatka jako kontynuacyjny materiał ortotropowy .....	31
5.3. Aproksymacyjny model izotropowy .....	31
<b>II. Wyznaczenie siecznego modułu sztywności siatek szklanych na podstawie pomiarów geometrii oraz analizy wyników badania rozciągania.....</b>	<b>39</b>
1. Siatki wybrane do analizy .....	39
2. Badanie ścinania połączenia międzywarstwowego .....	46
3. Pomiar geometryczny siatek .....	49
4. Wyznaczenie modułu sztywności siatek.....	51
5. Wyznaczenie zastępczego modułu sztywności i współczynnika Poissona kompozytu mieszanki mineralno-asfaltowej z siatką.....	55
<b>III. Zastosowanie teoretycznych modeli warstwy konstrukcyjnej ze zbrojeniem siatką w standardowych programach wspomagających projektowanie konstrukcji nawierzchni.....</b>	<b>57</b>
1. Wstęp .....	57
2. Cel .....	57
3. Program, metodyka pracy .....	58
4. Program komputerowy VEROAD .....	58
4.1. Wstęp.....	58
4.2. Parametry modelu Burgersa .....	58
4.3. Parametry modelu Hueta-Sayegha .....	59
4.4. Uwagi o dokładności obliczeń .....	60

5.	Analiza wyników obliczeń.....	60
5.1	Opis przykładów obliczeniowych .....	60
5.2	Porównanie naprężeń i odkształceń w konstrukcji bez warstwy zastępczej zbrojenia i konstrukcji z tą warstwą .....	62
<b>IV.</b>	<b>Uwagi i podstawowe wnioski .....</b>	<b>77</b>

## **Wstęp**

Niniejsze opracowanie jest sprawozdaniem końcowym finalizującym kilkuletnią pracę zleconą przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie na podstawie umowy nr 679/GDDKiA/2004 z dnia 07.04.2004 r. Praca nosi tytuł „Analiza zdolności zbrojenia nawierzchni siatką z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych” i nadano jej symbol WS-02.

Pracę wykonano w IBDiM oraz we współpracy z dr hab. inż. Stanisławem Jemioło z Politechniki Warszawskiej, który w 2006 r. był również pracownikiem IBDiM.

Sprawozdanie końcowe jest kontynuacją sprawozdania WS-02 z 2005 roku i zawiera cztery rozdziały. W pierwszych trzech sformułowano wnioski szczegółowe dotyczące tematyki w nich zawartych. W ostatnim rozdziale zawarto syntetyczne podsumowanie całej pracy, przy czym istotne pozostają wnioski zapisane w sprawozdaniu z 2005 r.