



**POLITECHNIKA GDAŃSKA**  
**Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**  
**Katedra Inżynierii Drogowej**

---

ul. G. Narutowicza 11  
80-233 GDAŃSK

Tel: (0-58) 347 13 47

Fax: (0-58) 347 10 97

**MODELOWANIE TEORETYCZNE WPŁYWU  
SCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA  
ZACHOWANIE SIĘ NAWIERZCHNI  
ASFALTOWYCH**

**RAPORT Z DRUGIEGO ETAPU**

**Opracowano na zlecenie:**

**Generalna Dyrekcja Dróg  
Krajowych i Autostrad  
ul. Żelazna 59  
00-848 WARSZAWA**

**Opracowali:**

**prof. dr hab. inż. Józef Judycki – autor kierujący**

**dr inż. Piotr Jaskuła**

**dr hab. inż. Wojciech Witkowski**

**Kierownik Katedry Inżynierii Drogowej - prof. dr hab. inż. Józef Judycki**

**Gdańsk, listopad 2012**

# MODELOWANIE TEORETYCZNE WPŁYWU SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA ZACHOWANIE SIĘ NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

## SPIS TREŚCI

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. WSTĘP .....</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1. PODSTAWA OPRACOWANIA .....  | 3         |
| 1.2. CEL PRACY .....   | 3         |
| 1.3. ZAKRES PRACY .....  | 3         |
| 1.3.1. <i>Zakres całej kilkuetapowej pracy badawczej</i> .....   | 3         |
| 1.3.2. <i>Zakres II etapu pracy stanowiącego niniejsze opracowanie</i> .....   | 4         |
| <b>2. WYKORZYSTANIE OPROGRAMOWANIA ABAQUS DO MODELOWANIA KONSTRUKCJI<br/>    NAWIERZCHNI DROGOWEJ .....</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1. ELEMENTY SKOŃCZONE .....  | 6         |
| 2.2. UWZGLĘDNIENIE NIELINIOWOŚCI ODDZIAŁYWANIA MIĘDZY CZĘŚCIAMI MODELU .....   | 10        |
| 2.3. ODDZIAŁYWANIA MIĘDZY CZĘŚCIAMI MODELU .....   | 11        |
| 2.3. SYMULACJA SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ W ANALIZACH OBLICZENIOWYCH .....   | 12        |
| <b>3. MODELOWANIE SZCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ W PROGRAMIE ABAQUS Z<br/>    WYKORZYSTANIEM PARAMETRÓW MIERZONYCH W LABORATORIUM.....</b>           | <b>16</b> |
| 3.1. MODEL BADANIA LEUTNERA.....   | 16        |
| 3.1.1. <i>Model badania Leutnera, modelowanie 2D</i> .....   | 16        |
| 3.1.2. <i>Model Leutnera modelowanie 3D</i> .....  | 21        |
| 3.2.    MODELOWANIE KONTAKTU MIĘDZYWARSTWOWEGO POPRZEZ POWIĄZANIE PŁASZCZYZN .....   | 23        |
| 3.3.    MODELOWANIE KONTAKTU MIĘDZYWARSTWOWEGO Z ZASTOSOWANIEM PEŁNEGO POŚLIZGU .....  | 27        |
| 3.4.    MODELOWANIE KONTAKTU MIĘDZYWARSTWOWEGO Z ZASTOSOWANIEM TARCIA.....   | 30        |
| 3.5.    MODEL ZESPOLONY (TARCIE I KONTAKT KOHEZYJNY) .....   | 35        |
| 3.6.    WSKAZANIE MODELU DO DALSZYCH ANALIZ.....   | 42        |
| <b>4. KALIBRACJA MODELU OBLICZENIOWEGO Z PARAMETRAMI MIERZONYMI W TERENIE ...</b>  | <b>48</b> |
| 4.1. WPROWADZENIE .....  | 48        |
| 4.2. ODCINEK DOŚWIADCZALNY .....   | 48        |
| 4.2.1. <i>Warstwy szczepne</i> .....   | 49        |
| 4.2.2. <i>Badania szczepności międzywarstwowej próbek wyciętych z nawierzchni odcinka<br/>            doświadczalnego wg metody Leutnera</i> ..... | 50        |
| 4.3. BADANIE UGIĘĆ URZĄDZENIEM FWD .....   | 51        |
| 4.3.1. <i>Wyniki badań FWD</i> .....   | 51        |
| 4.3.2. <i>Obliczenia odwrotne</i> .....  | 52        |
| 4.4. MODEL OBLICZENIOWY KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO DO PROGRAMU<br>ABAQUS .....  | 54        |
| 4.5. WYNIKI UGIĘĆ NAWIERZCHNI OBLICZONYCH W MES ORAZ POMIERYCH W TERENIE NA ODCINKU<br>DOŚWIADCZALNYM .....  | 59        |
| <b>LITERATURA.....</b>   | <b>61</b> |
| <b>ZAŁĄCZNIK .....</b>   | <b>62</b> |

# MODELOWANIE TEORETYCZNE WPŁYWU SCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ NA ZACHOWANIE SIĘ NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

## 1. WSTĘP

### 1.1. Podstawa opracowania

Opracowanie niniejsze wykonano na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie (GDDKiA w Warszawie) w ramach umowy nr 3097/2011 z dnia 18.11.2011 r., wg harmonogramu dla etapu II.

### 1.2. Cel pracy

W pracy zostanie rozpoznany rzeczywisty mechanizm pracy połączenia między warstwami asfaltowymi, zostanie znaleziony model teoretyczny, który uwzględni rzeczywistą pracę połączenia lub osłabienia, czy braku połączenia warstw asfaltowych na stan naprężeń i odkształceń konstrukcji nawierzchni. Zostanie uwzględniony fakt braku szczepności przy pobieraniu próbek podczas odwiertu, ale występowaniu tarcia, minimalnego sklejenia i zazębienia warstw. Zweryfikowany stan naprężeń i odkształceń zostanie wykorzystany w mechanistycznych metodach analizy konstrukcji nawierzchni.

Celem pracy jest udzielenie odpowiedzi na pytania:

- W jakim stopniu wbudowanie warstw asfaltowych z zakłóconą szczepnością międzywarstwową wpływa niekorzystnie na konstrukcję nawierzchni?
- Czy konieczne jest frezowanie warstw asfaltowych po niekorzystnych wynikach szczepności?
- Jakie są minimalne wartości szczepności międzywarstwowej?

### 1.3. Zakres pracy

#### 1.3.1. Zakres całej kilkuetapowej pracy badawczej

Praca została podzielona na trzy etapy, a w zakres każdego etapu wchodzi:

**Etap I (prace wstępne) – zrealizowano w 2011 r.**

**Rozdział 1: „Wpływ braku szczepności na pracę konstrukcji nawierzchni”,** w którym wskazano na zmiany stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w konstrukcji nawierzchni przy braku szczepności międzywarstwowej. Brak

szepności pomiędzy warstwami asfaltowymi zmniejsza efektywną sztywność pakietu warstw asfaltowych, zwiększając ugięcia nawierzchni, a te zwiększają odkształcenia rozciągające na spodzie warstw. Większe odkształcenia na spodzie warstw asfaltowych wpływają na obniżenie trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni.

**Rozdział 2: „Przegląd dostępnych metod modelowania układu warstw konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem modelowania szepności międzywarstwowej”**, który zawiera zestawienie prób modelowania szepności międzywarstwowej w pakiecie warstw asfaltowych, z wykorzystaniem metod opartych na analizie mechanistycznej konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem teorii wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej oraz metody elementów skończonych (MES). Zastosowanie MES umożliwia uwzględnienie w analizach obliczeniowych złożonego zjawiska szepności międzywarstwowej, to jest zazębienia (tarcia), jak i sklejenia warstw poprzez lepiszczce asfaltowe (stanu lepko-sprężystego asfaltu).

### **Etap II (realizowany w 2012 roku)**

1. Określenie modelu teoretycznego z wykorzystaniem MES i wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej, który uwzględni wpływ rzeczywistej szepności międzywarstwowej na prace konstrukcji nawierzchni.
2. Uwzględnienie dotychczasowych pomiarów szepności aparatem Leutnera, ugięć nawierzchni na odcinku doświadczalnym w obliczaniu konstrukcji nawierzchni.

### **Etap III (przewidziany do realizacji w 2013 roku)**

1. Opracowanie wytycznych pozwalających na prowadzenie badań szepności międzywarstwowej aparatem Leutnera.
2. Opracowanie minimalnych wymagań szepności międzywarstwowej do stosowania na budowach oraz zaleceń mających na celu zwiększenie szepności międzywarstwowej podczas budowy.
3. Wypracowanie schematu postępowania przy stwierdzonym braku szepności międzywarstwowej podczas obioru robót.

### **1.3.2. Zakres II etapu pracy stanowiącego niniejsze opracowanie**

Niniejsze opracowanie składa się z czterech rozdziałów. Zawiera ono sprawozdanie z prac badawczych wykonanych w okresie od stycznia do końca listopada 2012 roku. Zakres poszczególnych rozdziałów odpowiada treści harmonogramu zawartemu w programie badawczym – integralnej części umowy.

**Rozdział 1** – to wstęp.

## **Rozdział 2 – „Wykorzystanie oprogramowania Abaqus do modelowania konstrukcji nawierzchni drogowej”**

W rozdziale omówiono możliwości programu Abaqus. Scharakteryzowano elementy skończone, metody uniknięcia blokady. Omówiono możliwości uwzględnienia nieliniowości oddziaływania między częściami modelu. Opiszano wbudowane w Abaqusie możliwości symulacji szczepności międzywarstwowej.

## **Rozdział 3 – „Modelowanie szczepności międzywarstwowej w programie Abaqus z wykorzystaniem parametrów mierzonych w laboratorium”**

W pierwszej części rozdziału wykonano symulację numeryczną badania Leutnera z zastosowaniem płaskiego i przestrzennego stanu naprężeń i odkształceń. Bardzo dobra zgodność uzyskanych wyników z rezultatami osiąganymi w Laboratorium pozwoliła na tworzenie dalszych modeli pełnej konstrukcji nawierzchni, gdzie symulowano szczepność międzywarstwową. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i oceny uzyskanych rezultatów wskazano model szczepności międzywarstwowej, który dobrze symuluje zachowanie się nawierzchni. Wskazany model wykorzystano w dalszych analizach obliczeniowych.

Wykonano szereg obliczeń mechanistycznych z zastosowaniem kilku modeli symulacji szczepności międzywarstwowej. Do obliczeń mechanistycznych z zastosowaniem programu Abaqus wykorzystano jeden z superkomputerów Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej. Zadania obliczeniowe wysyłało do komputera Galera, który dzięki wysokiej mocy obliczeniowej wyniki zwracał po upływie 5-7 godzin. W takich obliczeniach wykorzystywano 16 procesorów Intela z 1334 procesorów superkomputera. Tego typu obliczenia dla jednego zadania obliczeniowego na standardowym komputerze stacjonarnym lub przenośnym, wyposażonym od 2 do 4 procesorów trwały od 22 do 27 godzin.

## **Rozdział 4 - „Kalibracja modelu obliczeniowego z parametrami mierzonymi w terenie”**

Wyniki ugięć, a nawet czas ugięć nawierzchni odcinka doświadczalnego, rzeczywistej nawierzchni, pomierzone urządzeniem FWD porównywano z ugięciami (czasami ugięć) uzyskanymi z obliczeń mechanistycznych modelu konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego przy zastosowaniu metody elementów skończonych MES w programie Abaqus. Porównywanie wyników ugięć ma szczególne znaczenie przy konstrukcjach nawierzchni z osłabioną lub brakiem szczepności międzywarstwowej, co można lepiej symulować i kontrolować w metodzie MES niż przy zastosowaniu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Na odcinku doświadczalnym stworzono sekcje konstrukcji nawierzchni, gdzie kontrolowano szczepność międzywarstwową na poziomie warstwy wiążącej i podbudowy. Uzyskane zgodności z porównania

czasz ugięć pozwolą weryfikować i wybrać właściwy model nawierzchni w metodzie MES, a przy jego pomocy precyzyjniej prognozować zachowanie się konstrukcji nawierzchni z osłabioną szczepnością międzywarstwową warstw asfaltowych.

## **2. WYKORZYSTANIE OPROGRAMOWANIA ABAQUS DO MODELOWANIA KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI DROGOWEJ**

Program Abaqus jest programem metody elementów skończonych. Posiada szerokie spektrum zastosowań: modelowanie zagadnień mechanicznych z różnych branż (inżynieria lądowa, geotechnika, przemysł okrętowy), przepływu ciepła, zagadnień piezoelektrycznych, czy mechaniki płynów. Program posiada obszerną bibliotekę materiałów sprężystych i niesprężystych, z uwzględnieniem modeli zniszczenia. Pozwala na przeprowadzenie symulacji dynamicznych przy użyciu jawnych lub niejawnych metod całkowania równań ruchu. Program składa się z trzech głównych modułów: pełniącemu funkcję pre- i postprocesora modułu CAE i dwóch modułów rozwiązujących tj. standard i explicit.

W zależności od przyjętej metody rozwiązania zadania użytkownik programu ma możliwość wyboru elementów skończonych dostępnych w bibliotece programu. Należy mieć jednak na uwadze, że pewne elementy na przykład elementy nieskończone, elementy powłokowe wyższego rzędu nie są dostępne z poziomu preprocesora i wymagają dodatkowej ingerencji w plik danych.

### **2.1. Elementy skończone**

Abaqus, ze względu na mnogość możliwych zastosowań posiada obszerną bibliotekę elementów skończonych. Dlatego bardzo ważne jest odpowiednie wybranie elementu do planowanej analizy. Poniżej przedstawiono wybrane elementy skończone służące do modelowania zagadnień mechanicznych na tle technik zapobiegania efektowi blokady numerycznej.

Zgodnie z metodologią MES w rozwiązaniu zadania wprowadza się aproksymację dziedziny zadania w postaci sumy niepokrywających się obszarów tj. elementów skończonych. W związku z tym stosowanie każdego programu MES wymaga od użytkownika świadomości, że metoda elementów skończonych ma charakter przybliżony. Podstawowym sformułowaniem MES jest zasada przemieszczeń wirtualnych. Jest ona bazą formułowania przemieszczeniowych elementów skończonych, tj. takich w których niewiadomymi węzłowymi są wyłącznie przemieszczenia.

W odniesieniu do statyki ciała liniowo sprężystego  $B$  zasada przemieszczeń wirtualnych ma postać

$$\int_B (\mathbf{D}\delta\mathbf{u})^T \mathbf{E}(\mathbf{D}\mathbf{u}) dV = \int_B \delta\mathbf{u}^T \mathbf{f} dV + \int_{\partial B_f} \delta\mathbf{u}^T \mathbf{t}^* dA \quad (1.1)$$

We wzorze (1.1) przyjęto następujące oznaczenia:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \in B, \text{ wektor przemieszczeń} \quad (1.2)$$

$$\mathbf{f} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \in B, \text{ wektor sił objętościowych} \quad (1.3)$$

$$\mathbf{t}^* = \begin{Bmatrix} t_1^* \\ t_2^* \\ t_3^* \end{Bmatrix} \in \partial B_f, \text{ wektor zadanych obciążeń powierzchniowych} \quad (1.4)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \in B, \text{ wektor małych odkształceń, } \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.5)$$

$$\mathbf{D}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix}, \text{ operator różniczkujący} \quad (1.6)$$

Występująca we wzorze (1.1) wielkość  $\delta\mathbf{u}$  oznacza wirtualne przemieszczenia definiowane przez operację pochodnej kierunkowej

$$\delta[\mathbf{u}; \delta\mathbf{u}] = \frac{d}{d\eta} (\mathbf{u} + \eta\delta\mathbf{u}) \Big|_{\eta=0} = \delta\mathbf{u} \equiv \mathbf{w} \quad (1.7)$$

natomiast

$$\mathbf{E} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

jest macierzą konstytutywną dla sprężystego ciała jednorodnego izotropowego.

Do interpolacji zmiennych we wzorze (1.1) wykorzystuje się interpolację Lagrange'a klasy  $C^0$ . Interpolację tą przeprowadza się w tzw. elemencie macierzystym  $\pi_{(e)}$ , zob. Rys. 1 zdefiniowanym w dziedzinie  $[-1,1] \times [-1,1] \times [-1,1]$ .

Wielomian Lagrange'a definiowany jest wzorem

$$L_p^m(\xi) = \prod_{\substack{q \neq p \\ q=1}}^m \frac{\xi - \xi_{(q)}}{\xi_{(p)} - \xi_{(q)}}, \quad \xi \in [-1,1] \quad (1.9)$$

W zagadnieniach dwu i trójwymiarowych interpolacji Lagrange'a dokonuje się przy pomocy wielomianów  $L_a(\xi)$ , które powstają z iloczynów wielomianów (1.9) tj.

$$L_a(\xi) = L_r^{m_1}(\xi^1) L_s^{m_2}(\xi^2) L_t^{m_3}(\xi^3) \quad (1.10)$$

Wielomiany (1.10) spełniają zależności

$$L_a(\xi_b) = \delta_{ab}, \quad \sum_{a=1}^N L_a(\xi) = 1, \quad \forall \xi \in \pi_{(e)} \quad (1.11)$$

Wykorzystanie (1.10) pozwala na budowę tzw. macierzy funkcji kształtu węzła elementu

$$\mathbf{L}_a(\xi) = \begin{bmatrix} L_a(\xi) & 0 & 0 \\ 0 & L_a(\xi) & 0 \\ 0 & 0 & L_a(\xi) \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

oraz całego elementu

$$\mathbf{L}_{(e)}(\xi) = [\mathbf{L}_1(\xi) | \mathbf{L}_2(\xi) | \dots | \mathbf{L}_N(\xi)] \quad (1.13)$$

Szczególnie popularne ze względu, między innymi, na niskie koszty obliczeń i prostotę sformułowania, są tzw. elementy niskiego rzędu. Pod pojęciem tym rozumie się elementy skończone, które charakteryzuje niski rząd funkcji kształtu w postaci liniowych funkcji interpolacyjnych. Jako przykłady można tu podać płaski 4-węzłowy element w płaskim stanie naprężenia,

$$L_i(\xi) = \frac{1}{4}(1 + \xi_i^1 \xi^1)(1 + \xi_i^2 \xi^2) \quad (1.14)$$

czy 8-węzłowy element objętościowy

$$L_i(\xi) = \frac{1}{8}(1 + \xi_i^1 \xi^1)(1 + \xi_i^2 \xi^2)(1 + \xi_i^3 \xi^3) \quad (1.15)$$

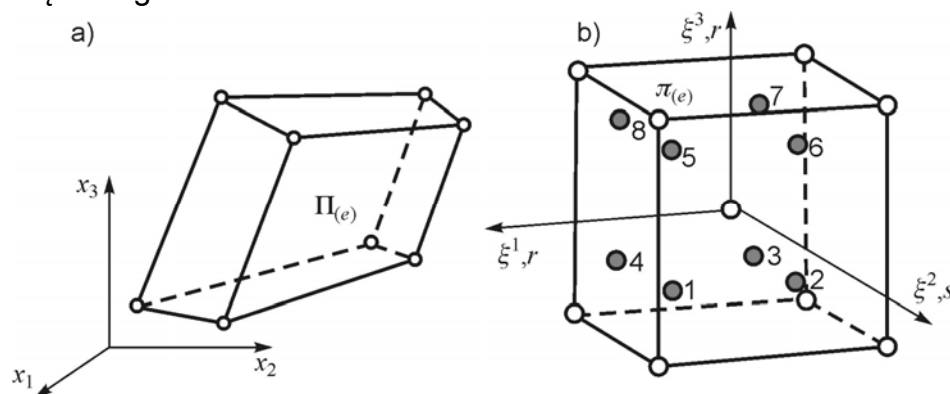
Stosowanie takich elementów z tzw. całkowaniem pełnym może powodować pojawienie się istotnej wady, tzn. elementy te doznają (dalej te trzy określenia będą używane zamiennie) przeszywnienia, zakleszczenia lub blokady. Należy zaznaczyć, że efekt ten pojawia się tylko w rozwiązaniach MES. Nie występuje on na poziomie rozważań analitycznych. Objawia się on dużym błędem rozwiązań, polegającym na znacznym zaniżeniu (lub nawet praktycznym zaniku)



wartości przemieszczeń. Okazuje się, że błąd ten jest niewrażliwy na zagęszczanie siatki podziału na elementy skończone

### Sposoby uniknięcia efektu blokady

Pewne sposoby uniknięcia efektu blokady są związane z doбором rzędu całkowania numerycznego macierzy elementowych. Powszechnie stosuje się całkowanie numeryczne, polegające na zamianie całki w sensie ścisłym na sumę wartości funkcji (mnożonych przez pewne współczynniki, tzw. wagi), obliczanych w pewnych określonych punktach. Jedną z metod całkowania jest tzw. kwadratura Gaussa–Legendre’a, znana ze swej dokładności (zob. np. RALSTON I RABINOWITZ [2001]). Przy podejściu takim powstaje pytanie o dobór liczby punktów (tzw. rząd kwadratury), w których obliczana ma być wartość funkcji, tak by zminimalizować błąd przejścia między całką w sensie ścisłym, a całką obliczaną numerycznie i zapewnić zbieżność rozwiązania. W literaturze przedmiotu (zob. np. ZIENKIEWICZ I TAYLOR [2002]), przyjmuje się, że w przypadku Lagrange’owskich elementów skończonych rząd ten powinien być równy  $n$  dla jednowymiarowych elementów  $n$  – węzłowych,  $n \times n$  dla czworobocznych elementów powierzchniowych o  $n \times n$  – węzłach, oraz  $n \times n \times n$  dla elementów objętościowych o  $n \times n \times n$  węzłach, zob. Rys. 1 Takie całkowanie znane jest jako całkowanie pełne (ang. full integration, FI). Mimo że pozwala ono na obliczenie dokładnej wartości funkcji podcałkowej, powoduje opisany wcześniej efekt blokady. Stąd, stosuje się opisane poniżej zabiegi, celem których jest ominięcie tego efektu.



Rys. 1. Skończony element objętościowy, a) w przestrzeni fizycznej, b) element macierzowy, zaznaczone węzły (jasne punkty) oraz punkty całkowania numerycznego (ciemne punkty)

Całkowanie zredukowane (ang. *reduced integration, URI*) jest najprostszą i najstarszą techniką usuwającą wpływ efektu blokady na rozwiązania. Technika ta została przedstawiona w pracy ZIENKIEWICZ, TAYLOR I TOO [1971]. Jej ideą jest zastosowanie niższego, niżby to wynikało z warunku otrzymania rozwiązania dokładnego przy zastosowaniu pełnego całkowania, rzędu całkowania numerycznego. W wyniku tego zabiegu odpowiedzialne za efekt blokady składowe wielomianów wyższego rzędu są eliminowane. Niestety, stosowanie całkowania zredukowanego wprowadza pasożytnicze formy deformacji, tzw.

postaci pasożytnicze albo zero-energetyczne (*ang. spurious zero-energy modes*). Odpowiadają one wektorom własnym macierzy sztywności związanym z dodatkowymi, nie uzasadnionymi fizycznie, zerowymi wartościami własnymi ale nie z zerowymi odkształceniami<sup>1</sup>. Kontrola tychże form pasożytniczych wymaga dodatkowych technik stabilizowania i kontroli kinematyki elementu. W programie Abaqus elementy skończone, w których stosowane jest ten typ całkowania oznaczane są literą R. W zagadnieniach dynamiki kiedy stosowany jest jawny schemat całkowania w czasie instrukcja do programu Abaqus zaleca kontrolę energii związanej z usuwaniem postaci zero-energetycznych (ALLAE). Wartość tej energii powinna być zanedbywalnie mała w porównaniu z całkowitą energią badanego układu.

ZASTOSOWANIE WIELOPOLOWYCH ZASAD WARIACYJNYCH. Techniki te wywodzą się z zasady wirtualnych przemieszczeń, ale z wielopolewych zasad wariacyjnych. Przykładowo, metoda założonych naprężeń (*ang. assumed stress method*), omawiana w pracy PIAN I SUMIHARA [1984], bazuje na zasadzie wariacyjnej Hellignera–Reissnera. Tutaj niezależnymi polami są przemieszczenia i naprężenia. Pole przemieszczeń podlega standardowej dla MES interpolacji. Pole naprężeń jest interpolowane tylko w obrębie elementu, przy pomocy założonych funkcji kształtu, dobór których decyduje o efektywności tego podejścia. Dodatkowym polem podlegającym interpolacji może być ciśnienie. W programie Abaqus elementy, w których stosuje się interpolację wartości ciśnienia oznaczane są literą H. Instrukcja zaleca stosowanie tych elementów do analizy zagadnień dotyczących materiałów nieściśliwych.

METODA NIEZGODNYCH POSTACI (SFORMUŁOWANIE WZBOGACONE). Podejście to (*ang. incompatible modes (enhanced formulation)*), sformułowane dla 4-węzłowego elementu izoparametrycznego, zostało zaproponowane w pracy TAYLOR, BERESFORD I WILSON [1976]. Ideą jest dodanie do istniejącego pola przemieszczeń dwóch postaci deformacji opisujących efekt zginania w płaszczyźnie elementu. Te dodatkowe postaci obowiązują tylko w obrębie danego elementu, wobec czego parametry je opisujące mogą być statycznie kondensowane na poziomie elementu nie powiększając tym samym końcowego rozmiaru zadania. W programie Abaqus elementy z dodatkowymi postaciami oznaczane są literą I. Zaleca się ich używanie w symulacjach, gdzie ważne jest odwzorowanie stanu zgięciowego.

## **2.2. Uwzględnienie nieliniowości oddziaływania między częściami modelu**

Program Abaqus pozwala na uwzględnienie w analizie nieliniowości fizycznych (na przykład pękanie, płynięcie plastyczne), geometrycznych (uwzględnienie

---

<sup>1</sup> W odróżnieniu od postaci opisujących ruch sztywny przy zerowych odkształceniach

dużych przemieszczeń) i związanych ze zmianą warunków brzegowych (kontakt). Nieliniowości te mogą być uwzględniane w analizie w różnych kombinacjach.

Pierwsze z wymienionych wyżej efektów nieliniowe uwzględnia się poprzez zastosowanie odpowiedniego prawa materiałowego. W większości przypadków prawa materiałowe dostępne są w symulacjach typu standard i explicit. Pewne zaś dostępne są wyłącznie w jednym module obliczeniowym, na przykład modelowanie zniszczenia warstw kohezyjnych z zastosowaniem konwencjonalnych praw materiałowych.

Uwzględnienie nieliniowości geometrycznej odbywa się poprzez ustawienie odpowiedniej opcji w kroku obliczeniowym z grupy „general”. Nie dotyczy to analiz typu „linear perturbation”, gdzie z założenia przeprowadzane są obliczenia liniowe.

### **2.3. Oddziaływania między częściami modelu**

Efekty nieliniowe związane ze zmianą warunków brzegowych w trakcie analizy opisywane są przy pomocy stosownych warunków kontaktu. W odniesieniu do zagadnień mechanicznych kontakt może być określony jako „general” lub „surface to surface”. Pierwsza z opcji pozwala na analizę zjawisk, gdzie nie jest możliwe określenie powierzchni, które wejdą w kontakt w trakcie analizy, na przykład modelowanie katastrof budowlanych. Stosowanie drugiej opcji wymaga określenia powierzchni kontaktu i jest mniej czasochłonna niż pierwsza w której algorytm poszukuje węzłów kontaktu.

Niezależnie od przyjętej jednej z opcji opisanych powyżej, do opisanego kontaktu mechanicznego wymagane jest określenie własności kontaktu „interaction property”. W opcji tej definiuje się typ oddziaływania na kierunku normalnym do powierzchni kontaktu oraz na kierunku stycznym do tej powierzchni. Możliwe jest, między innymi, zdefiniowanie kontaktu bez tarcia, kontaktu bez poślizgu, kontaktu z zadaniem współczynnikiem tarcia, a także kontaktu kohezyjnego z zadaniem kryterium zniszczenia i prawem ewolucji zniszczenia.

Oprócz kontaktu, modelowanie wzajemnych oddziaływań między składowymi modelami może być opisane przy pomocy więzi „constraints”. Jedną z nich jest opcja „tie” która wiąże ze sobą stopnie swobody węzłów siatek elementów określonych w różnych częściach modelu.

Kolejną techniką służącą do modelowania połączeń między częściami modelu jest zastosowanie elementów kohezyjnych. Elementy te mogą być wykorzystane z wybranymi prawami materiałowymi „conventional material models” oraz z prawami materiałowymi typu „traction-separation”.

### 2.3. Symulacja szczepności międzywarstwowej w analizach obliczeniowych

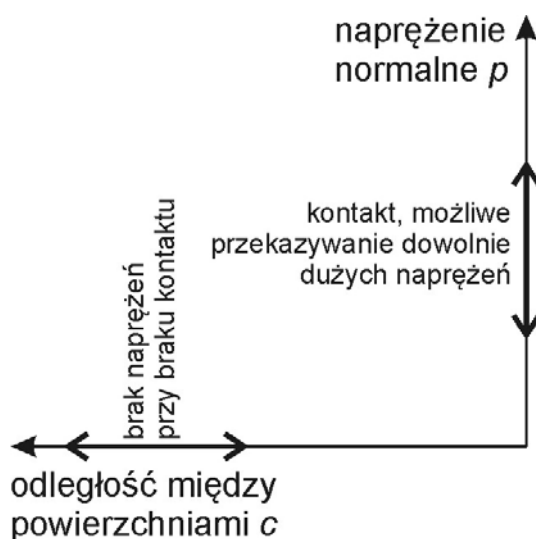
Szczepność międzywarstwową w analizach obliczeniowych kontrolowano odpowiednio do zastosowanego oprogramowania.

#### ABAQUS

Modele te opisane są w rozdziale 35.1 Mechanical contact properties Abaqus Analysis Manual. W ramach badań wykorzystano wybrane opcje, krótko scharakteryzowane poniżej.

#### Modelowanie kontaktu w kierunku normalnym

W ramach badań do symulacji oddziaływania na kierunku normalnym do powierzchni kontaktu stosowano model „hard contact”, opisany w rozdziale 35.1.2 Contact pressure-overclosure relationships Abaqus Analysis Manual. Podejście to minimalizuje penetrację powierzchni „slave” w powierzchnię „master”. Zależność między naprężeniem kontaktu  $p$ , a odległością  $c$  między powierzchniami kontaktowymi przedstawia rys. 2.1.



Rys. 2.2. Schemat zastosowanej zależności naprężenie normalne-odległość między powierzchniami kontaktu w modelu „hard contact”

W ramach omawianej opcji istnieje możliwość wymuszania, by powierzchnie kontaktowe nie doznawały separacji po wejściu w kontakt. Służy do tego opcja „allow separation after contact”, którą wykorzystywano w tych modelach uwzględniających brak odrywania warstw nawierzchni od siebie.

Oprócz opcji „hard contact” możliwe jest wykorzystywanie modeli zależności  $p$ - $c$  o „zmiękczonej” (ang. „softened”) charakterystyce. Model ten dopuszcza pewną wartości przenikania powierzchni kontaktowych i może być wprowadzony przykładowo na jeden z wymienionych sposobów: zależność liniowa  $p$  od wartości penetracji, zależność wykładnicza czy zależność zadana tabularycznie w postaci par punktów  $(p_i, c_i)$ . Stosowanie podejścia „zmiękczonego” jest fizycznie uzasadnione, kiedy jedna z warstw kontaktowych utworzona jest z materiału miękkiego umożliwiającemu częściową penetrację. Może być także przydatne w przypadku problemów numerycznych związanych ze spełnieniem warunków kontaktu. Należy mieć na uwadze, że stosowanie „miękkiego” kontaktu niesie pewne ograniczenia w analizie dynamicznej.

#### Modelowanie kontaktu w kierunku stycznym

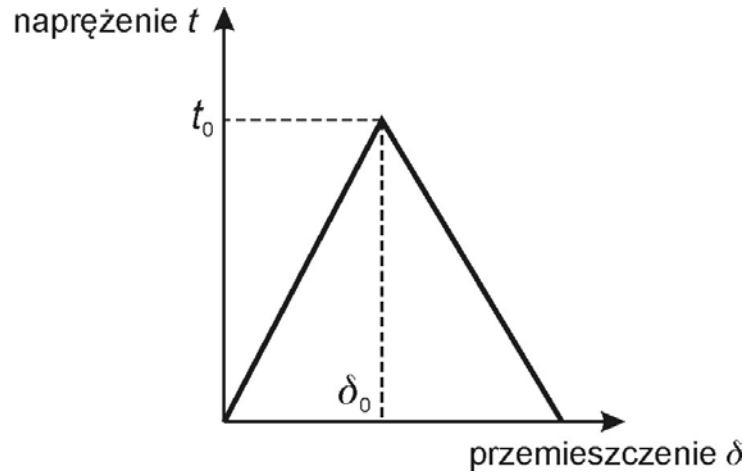
Z pośród opcji modelowania kontaktu w kierunku stycznym dostępnych w programie Abaqus wykorzystano model tarcia Coulomba. W najbardziej ogólnym podejściu program dopuszcza określenie współczynnika tarcia  $\mu$  jako funkcji prędkości poślizgu  $\gamma$ , naprężenia normalnego, temperatury oraz dodatkowych zmiennych, określanych przez użytkownika. Program pozwala na uwzględnienie znanego empirycznie faktu, że współczynnik tarcia dynamicznego  $\mu_k$  jest niższy niż współczynnik tarcia statycznego  $\mu_s$ . Zmienność współczynnika tarcia może być opisana w postaci zależności  $\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp^{-d\gamma}$ , gdzie  $d$  jest współczynnikiem zaniku, definiowanym przez użytkownika. Można także wprowadzić dane otrzymane z eksperymentu. W badaniach własnych przyjmowano współczynnik tarcia statycznego  $\mu_s$ , dla zerowej prędkości poślizgu.

Program Abaqus/Standard uwzględnia nieliniowości wynikające z kontaktu przy pomocy metody funkcji kary („penalty”) lub przy pomocy metody mnożników Lagrange’a („Lagrange multiplier”), zob. na przykład Wriggers [2002].

#### Modelowanie kontaktu o charakterze kohezyjnym

Metoda ta opisana jest w rozdziale 35.1.10 Surface-based cohesive behavior Abaqus Analysis Manual. Jest ona uogólnieniem podejścia bazującego na elementach kohezyjnych z zastosowaniem prawa materiałowego „traction-separation”,

Rys. 2.3.



Rys. 2.3. Schemat zależności "traction-separation" w modelu kontaktu kohezyjnego

W podejściu tym możliwe jest modelowanie zniszczenia warstwy kohezyjnej o zerowej grubości, przy czym do momentu zniszczenia zakłada się, że warstwa kohezyjna pracuje sprężysto. W ogólnym przypadku w fazie sprężystej model konstytutywny warstwy kontaktowej opisany jest równaniem

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{t} = \mathbf{K}\boldsymbol{\delta}$$

gdzie  $t_n$  jest składową normalną wektora naprężenia,  $t_s$  i  $t_t$  są składowymi stycznymi, macierz 3x3 zawiera współczynniki sztywności, a wielkości  $\delta$  są przesunięciami odpowiadającymi składowym wektora  $\mathbf{t}$ . Szczególnym przypadkiem (wykorzystanym w niniejszym opracowaniu) powyższego zachowania jest „Uncoupled traction-separation behavior”, w którym przyjmuje się wyłącznie sztywności stojące na głównej diagonalu macierzy  $\mathbf{K}$ . W prowadzonych analizach współczynniki te przyjęto z badania Leutnera.

Jako kryterium zniszczenia przyjęto liniowe kryterium maksymalnego stosunku naprężenia

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1, \quad \langle s \rangle = \begin{cases} s, & s > 0 \\ 0, & s \leq 0 \end{cases}$$

gdzie wartości z indeksem 0 oznaczają maksymalne wartości naprężeń kontaktu.

BISAR – program wykorzystywany do obliczeń sprawdzających Odpowiedzialny za to jest współczynnik „AK” (*standard shear spring compliance*), charakteryzujący nieskończenie ciekłą warstwę wewnętrzną, której wytrzymałość definiowana jest jako stosunek względnego poziomego przesunięcia warstw do naprężeń, działających na ich granicy, co zostało przedstawione w instrukcji programu.

$$AK = \frac{\text{względne poziome przesunięcie warstw}}{\text{naprężenia na granicy warstw}} \quad (4.1)$$

Matematycznie zależność ta została zapisana za pomocą parametru „ $\alpha$ ” i posiada następującą postać:

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1+\nu}{E} \cdot a} \quad (4.2)$$

gdzie:

a – promień obciążenia, [m]

E – moduł sprężystości warstwy wyżej leżącej, [Pa]

$\nu$  - współczynnik Poissona danej warstwy, [-]

$\alpha$  - współczynnik tarcia, o zakresie  $0 \leq \alpha \leq 1$

Wartość  $\alpha = 0$  odpowiada całkowitej szczepności,  $\alpha = 1$  odpowiada pełnemu poślizgowi.

Dodatkowo, program posiada możliwość wyboru innego współczynnika , a mianowicie ”*reduced shear spring compliance*” ALK . Jest on wyrażony poprzez zależność :

$$ALK = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot a \quad (4.3)$$

Fizyczne znaczenie powyższego współczynnika wyrażono z uwzględnieniem modułu sprężystości i współczynnika AK zgodnie z:

$$AK = ALK \cdot \frac{1+\nu}{E} \quad (4.4)$$

By wprowadzić do programu odpowiednią wartość współczynnika tarcia  $\alpha$  korzysta się z wymienionych wyżej współczynników AK lub ALK. Niestety procentowe wyrażenie szczepności międzywarstwowej przy pomocy powyższych modułów (AK i ALK) nie jest jednoznaczne ponieważ, jak podaje instrukcja do programu Bisarc pojęcia te nie są liniowo zależne od stopnia powiązania warstw.

Detale kalibracji współczynników AK i ALK przedstawiono w pracy [6].

### **3. MODELOWANIE SCZEPNOŚCI MIĘDZYWARSTWOWEJ W PROGRAMIE ABAQUS Z WYKORZYSTANIEM PARAMETRÓW MIERZONYCH W LABORATORIUM**

Do obliczeń mechanistycznych z zastosowaniem programu Abaqus wykorzystano jeden z superkomputerów Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej. Zadania obliczeniowe wysyłano do komputera Galera, który dzięki wysokiej mocy obliczeniowej wyniki zwracał po upływie 5-7 godzin. W obliczeniach wykorzystywano 16 procesorów Intela z 1334 procesorów superkomputera, co istotnie wpływało na szybkość obliczeń. Tego typu obliczenia dla jednego zadania obliczeniowego na standardowym komputerze stacjonarnym lub przenośnym, wyposażonym od 2 do 4 procesorów trwały od 22 do 27 godzin.

#### **3.1. Model badania Leutnera**

##### **3.1.1. Model badania Leutnera, modelowanie 2D**

Przeprowadzono symulację MES badania Leutnera. Zadanie modelowano jako płaskie. Przyjęto następujące dane geometryczne:

- szerokość próbki 0,15 m,
- grubość 0,05 m, zob. rys. 3.1.

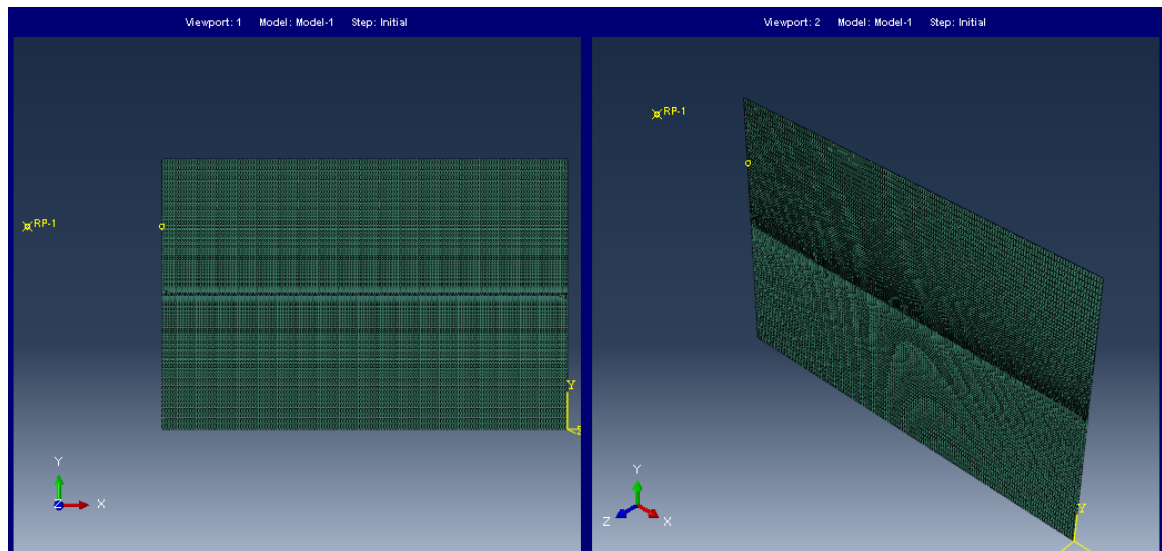
Dla mieszanki mineralno-asfaltowej przyjęto dane materiałowe:

- $E=10000$  MPa,  $\nu=0,3$ .

Przyjęto 150 elementów wzdłuż szerokości próbki oraz 50 elementów wzdłuż wysokości. Całkowita liczba węzłów siatki wynosi 15704, całkowita liczba elementów skończonych równa jest 15150 w tym 15000 liniowych elementów 4-węzłowych CPS4I oraz 150 liniowych kohezyjnych elementów 4-węzłowych COH2D4.

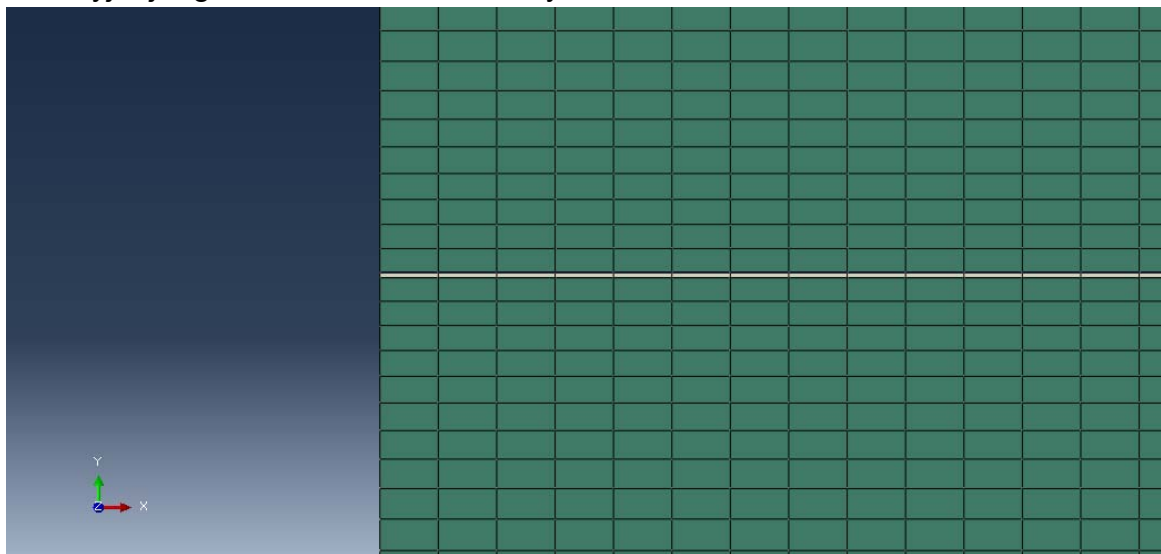
Obciążenie realizowano poprzez zadanie stałej prędkości 0,000833 m/s przemieszczenia punktu referencyjnego RP-1. W zadaniu pominięto wpływ sił bezwładności. Symulacje prowadzono do osiągnięcia przemieszczenia poziomego punktu RP-1 równego 0,004 m.





Rys. 3.1. Test Leutnera 2D, geometria zadania

Połączenie między warstwą górną i dolną przyjęto jako wykonane z warstwy kohezyjnej o grubości 0,0001m, zob. rys. 4.2.



Rys. 4.2. Test Leutnera 2D, widok na warstwę kohezyjną (jasny kolor)

Dla warstwy tej założono prawo materiałowe typu „traction” z następującymi stałymi materiałowymi:

- sztywność normalna 6570 MPa/m (sztywność styczna x10),
- sztywności styczne 657 MPa/m (1,15 MPa/1,75 mm),
- nominalne naprężenie normalne 11,5 MPa (nominalne naprężenia styczne x10),
- nominalne naprężenia styczne 1,15 MPa,
- przemieszczenie przy zniszczeniu 0,002 m.

Oslabienie modelowano jako liniowe, a kryterium zniszczenia przyjęto jako przekroczenie naprężeń stycznych „MAXS”.

Dane do modelu szczepności z warstwą kohezyjną wykorzystano z badań laboratoryjnych na podstawie pracy [6].

Rys. 3.3 przedstawia mapę naprężeń stycznych w momencie osiągnięcia wartości granicznej,

Rys. 3.4 przedstawia odpowiadającą mapę przemieszczeń poziomych, a

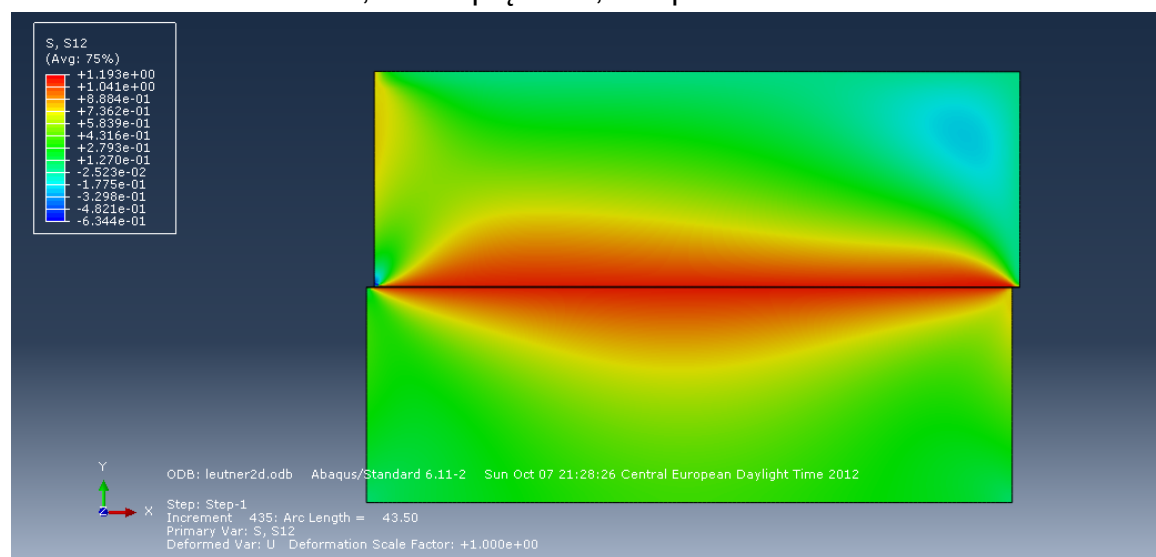
Rys. 3.5 obrazuje rozkład skalarnego parametru degradacji warstwy kohezyjnej. Parametr ten jest równy 0 dla materiału nieuszkodzonego oraz 1 dla pełnej degradacji. Kolejne rysunki przedstawiają odpowiednio przemieszczenia dla przemieszczenia poziomego 4 mm (

Rys. 3.6), rozkład parametru degradacji dla przemieszczenia poziomego 4 mm (

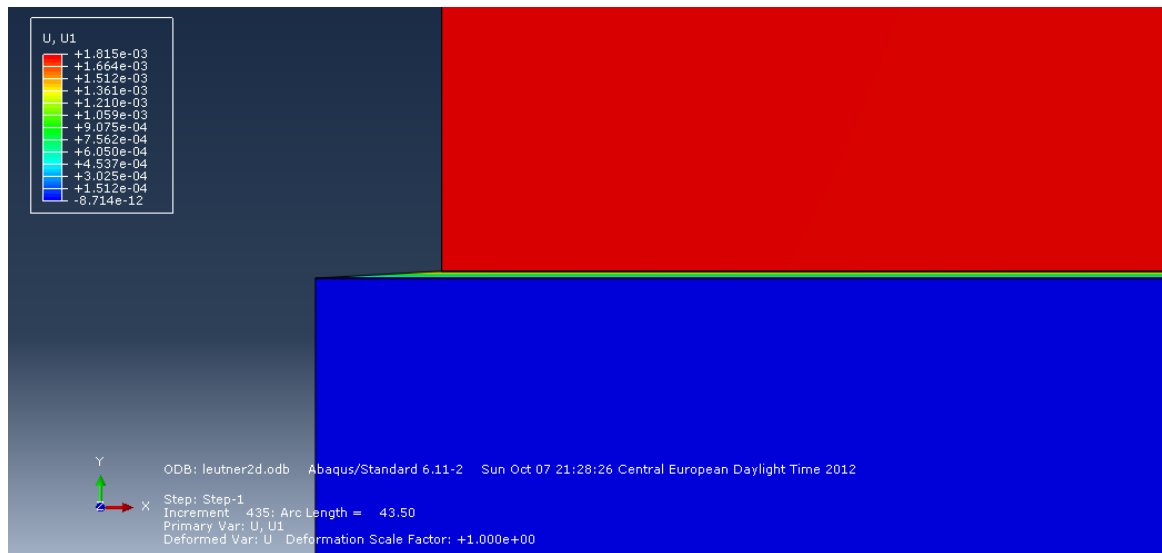
Rys. 3.7) oraz zależność między siłą poziomą w punkcie RP-1 a przemieszczeniem poziomym tego punktu.

Na wydrukach z programu Abaqus pojawiają się następujące oznaczenia:

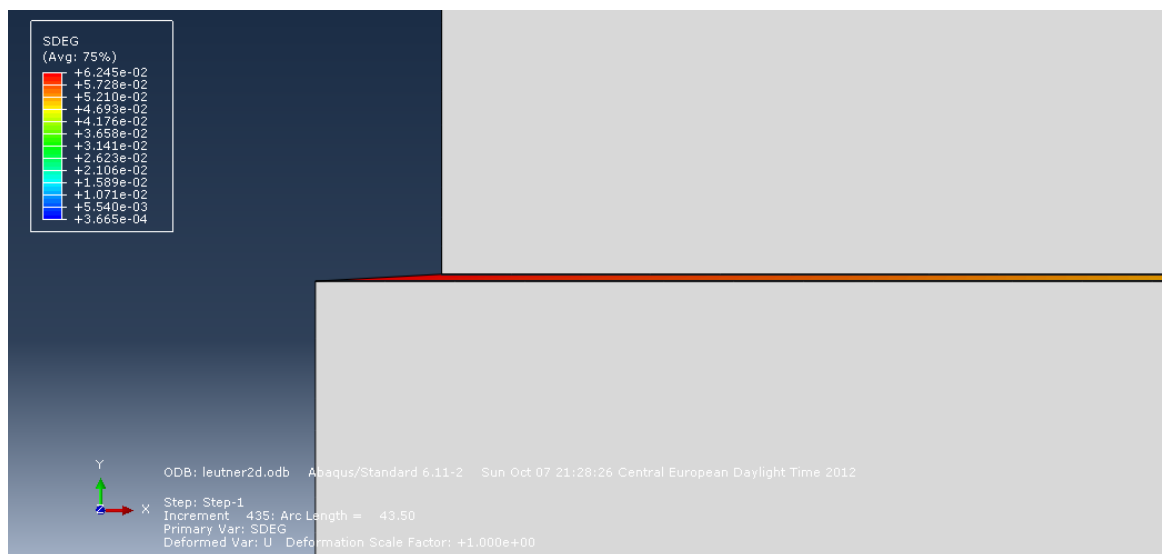
LE lub E – odkształcenia, S – naprężenia, U – przemieszczenia.



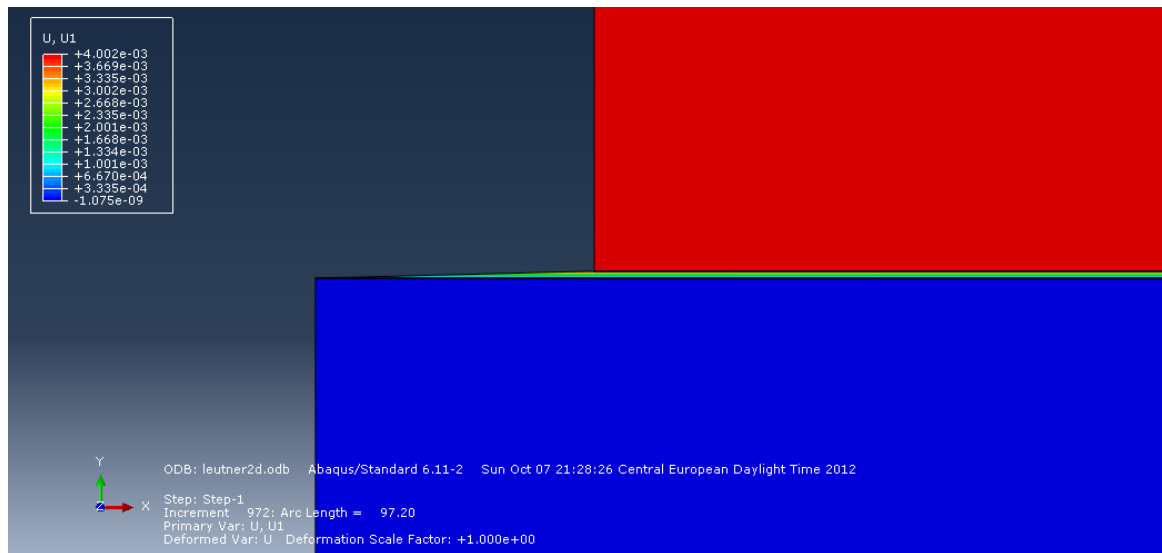
Rys. 3.3. Test Leutnera 2D, rozkład naprężeń stycznych w momencie osiągnięcia ich wartości maksymalnych



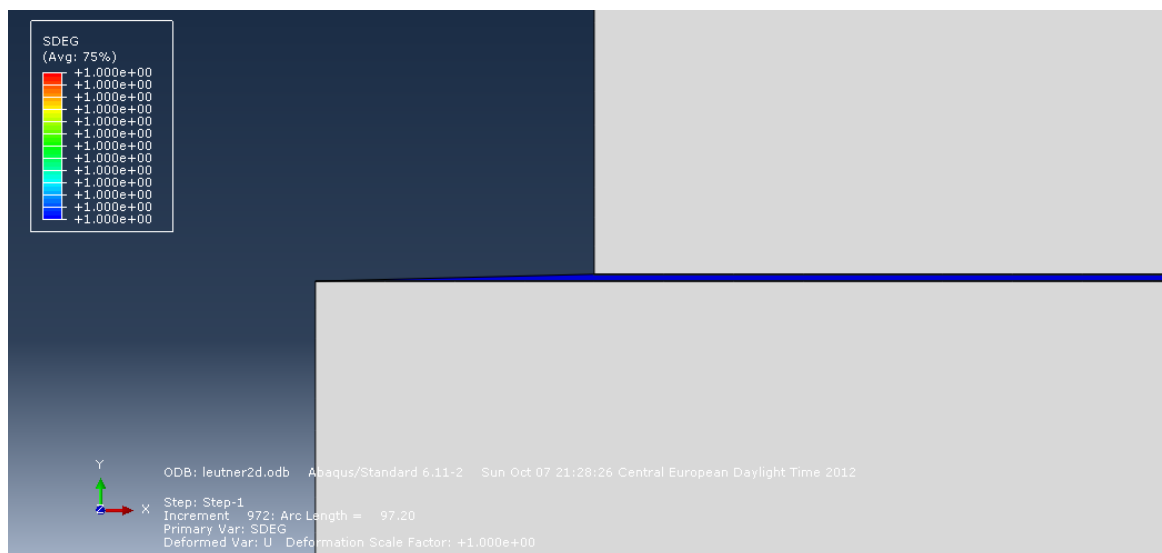
Rys. 3.4. Test Leutnera 2D, rozkład przemieszczeń poziomych w momencie osiągnięcia maksymalnych naprężeń stycznych



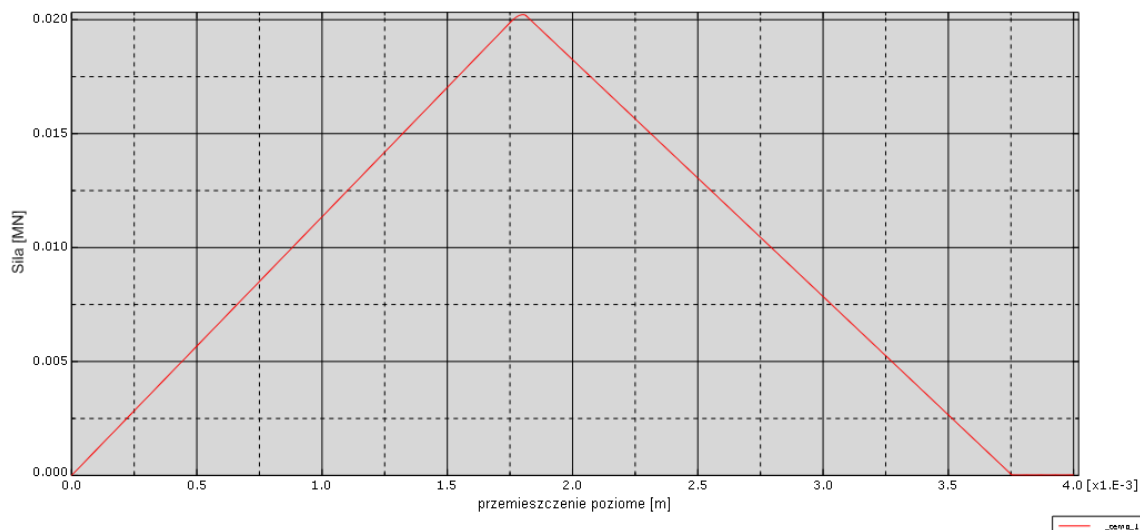
Rys. 3.5. Test Leutnera 2D, skalarny parametr degradacji warstwy kohezyjnej



Rys. 3.6. Test Leutnera 2D, mapa przemieszczeń poziomych dla przemieszczenia poziomego 4 mm



Rys. 3.7. Test Leutnera 2D, rozkład skalarnego parametru degradacji dla przemieszczenia poziomego 4mm

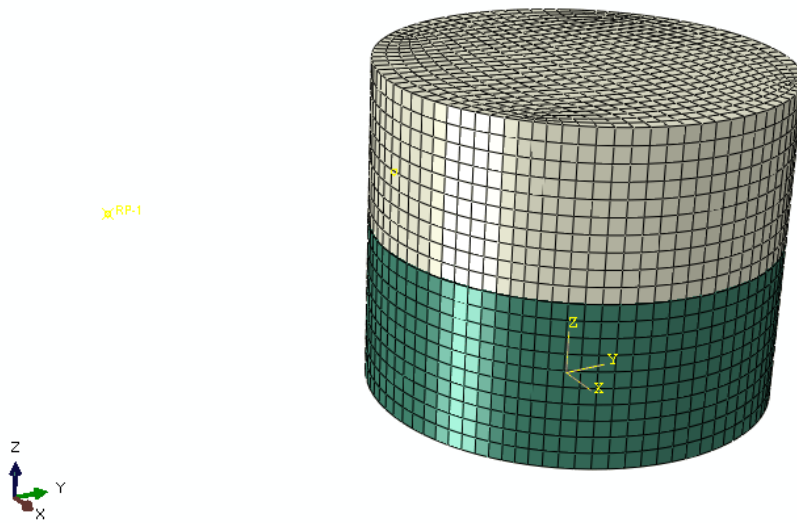


Rys. 3.8. Test Leutnera 2D, krzywa siła pozioma w punkcie RP-1 względem przemieszczenia poziomego

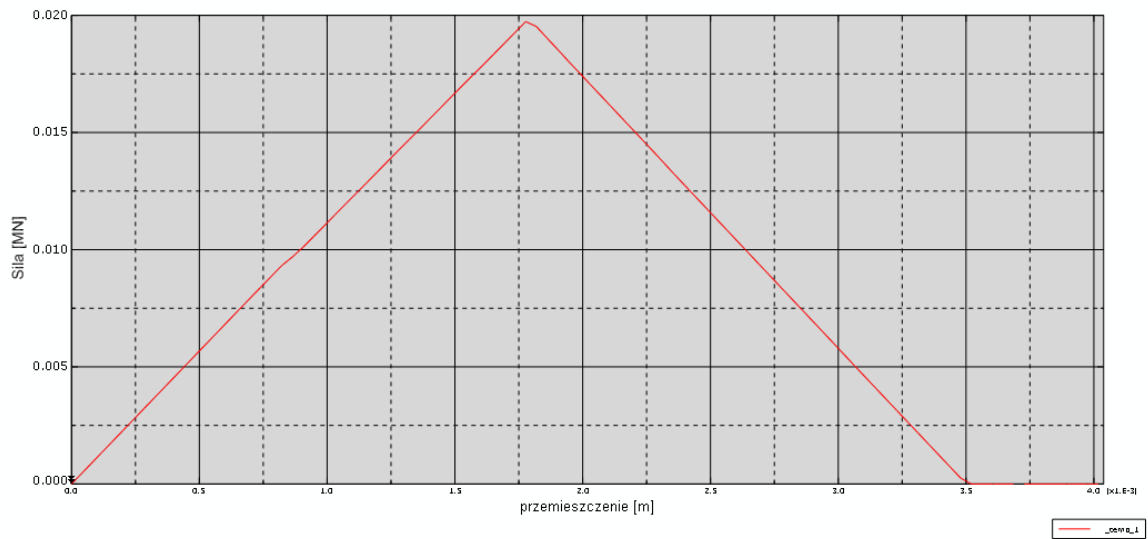
### 3.1.2. Model Leutnera modelowanie 3D

W kolejnym etapie analizy przeprowadzono symulację testu Leutnera jako zadania trójwymiarowego, zob. **Rys. 3.9**. Średnicę walców przyjęto jako 0,15 m, a ich wysokość 0,06 m. Dane materiałowe przyjęto jak poprzednio.

W dyskretyzacji każdego z walców wykorzystano 7020 elementów objętościowych C3D8I. Oddziaływanie między walcami, modelowano przy pomocy kontaktu z opcjami „cohesive behavior” oraz „damage”, dla których przyjęto dokładnie te same wartości i opcje co w przypadku dwuwymiarowym. Uzyskaną zależność siły do przemieszczenia w płaszczyźnie kontaktu przedstawia **Rys. 3.10**.



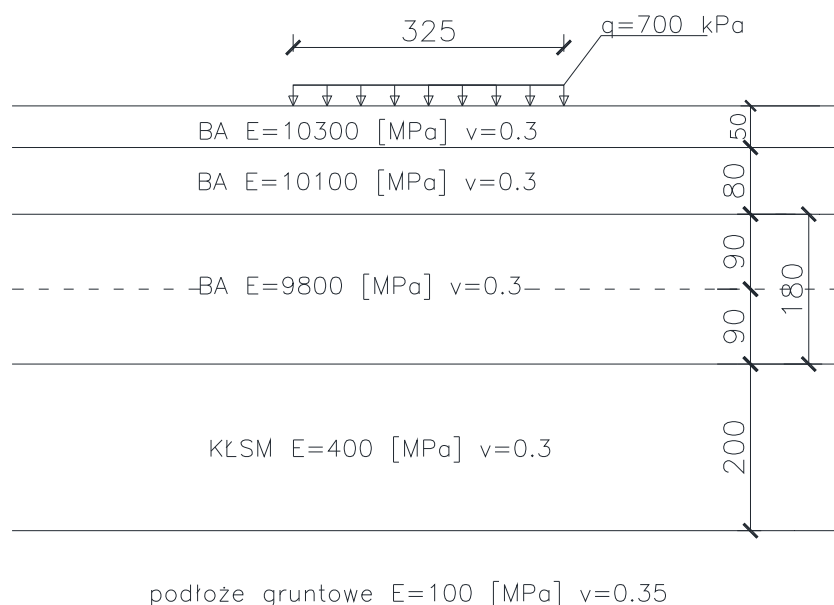
Rys. 3.9. Test Leutnera 3D, geometria zadania



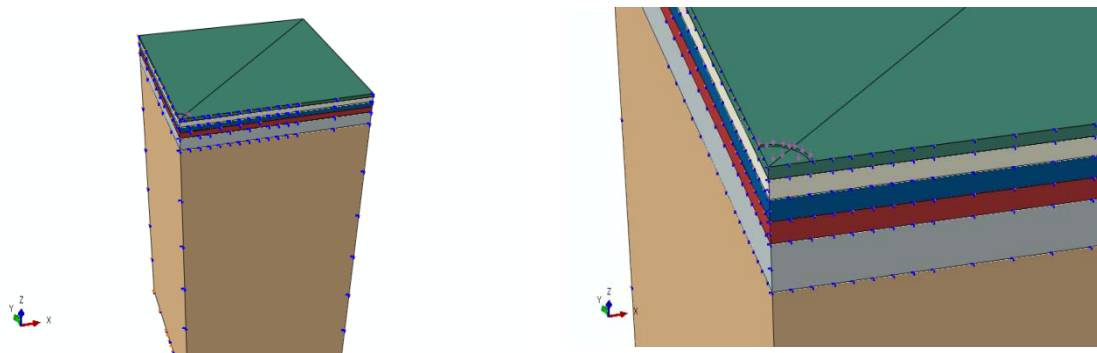
Rys. 3.10. Test Leutnera 3D, krzywa siła pozioma w punkcie RP-1 względem przemieszczenia poziomego

### 3.2. Modelowanie kontaktu międzywarstwowego poprzez powiązanie płaszczyzn

Do analizy przyjęto model układu nawierzchni, którego przekrój przedstawia **Rys. 3.11**. W trójwymiarowym modelu MES wykorzystano podwójną symetrię zadania. Przyjęty schemat obliczeniowy przedstawia **Rys. 3.12**



Rys. 3.11. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni KR6 (grubości warstw podano w [mm])

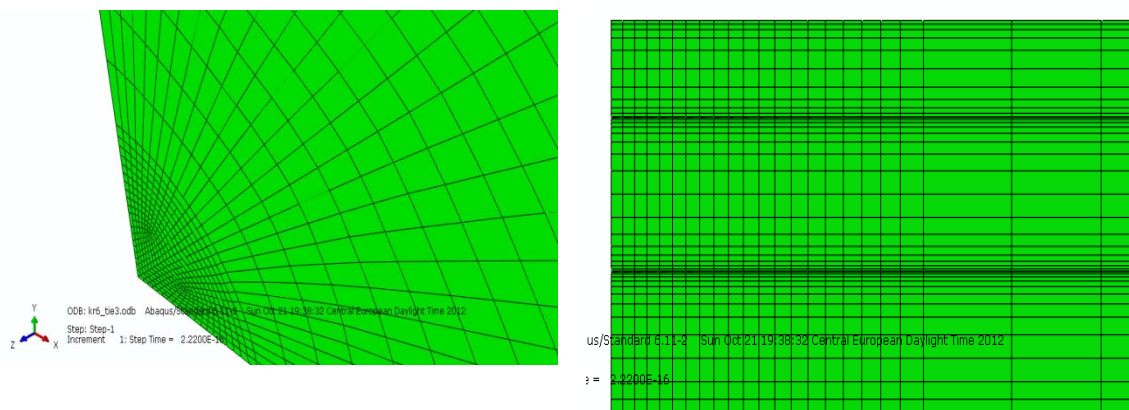


Rys. 3.12. Model MES konstrukcji nawierzchni KR6

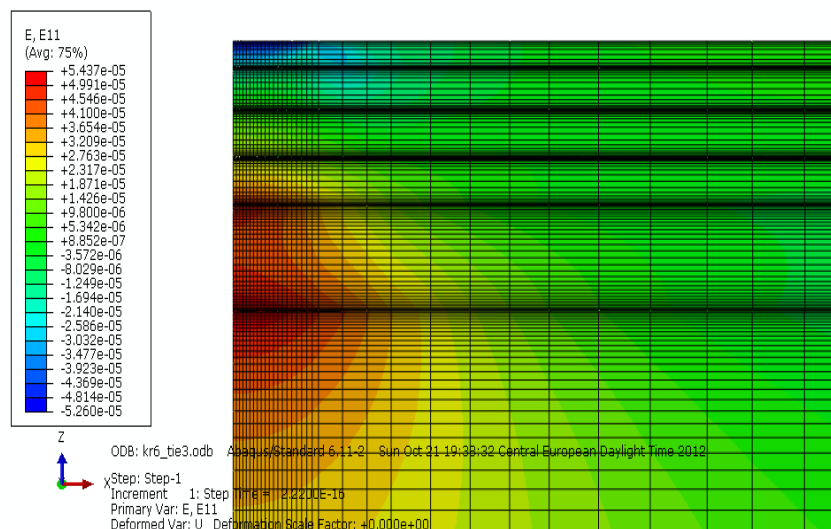
Przed przystąpieniem do zasadniczej analizy przeprowadzono walidację modelu MES pod kątem doboru gęstości siatki podziału i miąższości warstwy podłoża. Wykorzystując funkcję „tie” łączenia płaszczyzn pomiędzy kolejnymi warstwami nawierzchni przeprowadzono analizę numeryczną symulując pełną szczepność między warstwami modelu. Obliczenia przeprowadzono jako geometrycznie

liniowe wykorzystując metodę rozwiązania „linear perturbation, static”. Przy taki założeniu program Abaqus zapisuje do pliku wartości tensora małych odkształceń, E.

Ostatecznie do dyskretyzacji przyjęto siatkę zbudowaną z 270757 węzłów i 248424 elementów C3D8I, którą wykorzystywano we wszystkich dalszych symulacjach. Szczegóły przyjętej dyskretyzacji przedstawia Rys. 3.13, a wybrane wyniki przedstawiono na Rys. 3.14 i na Rys. 3.15

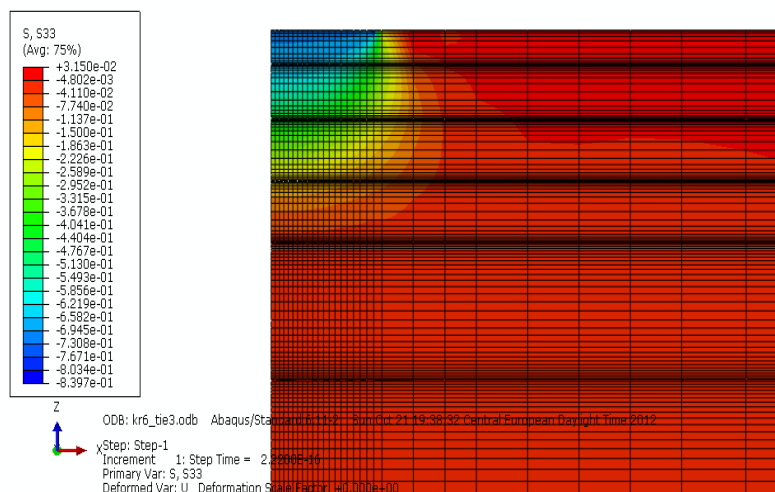


Rys. 3.13. Model MES konstrukcji nawierzchni KR6, szczegóły siatki



Rys. 3.14. Model MES konstrukcji nawierzchni KR6, odkształcenia E11 (odkształcenia poziome)





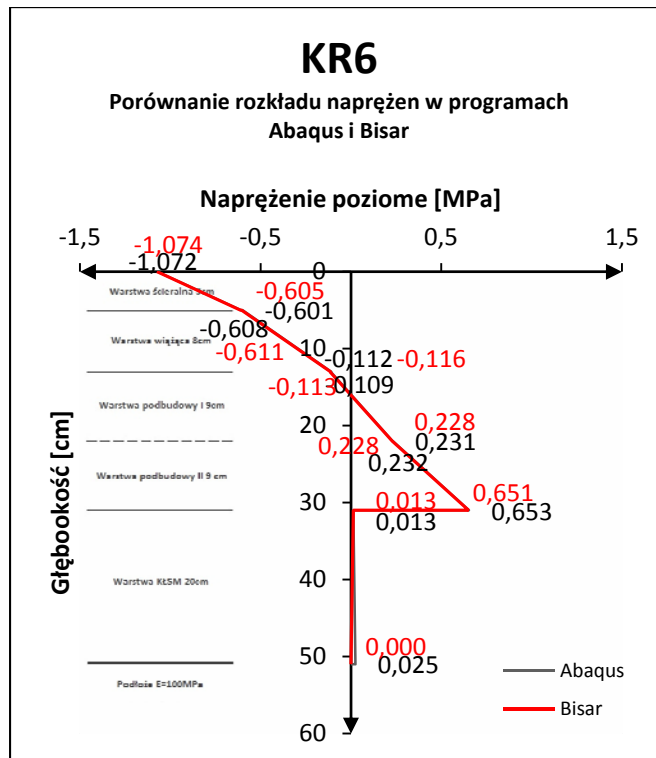
Rys. 3.15. Model MES konstrukcji nawierzchni KR6, naprężenia S33 (naprężenia pionowe)

Otrzymane wyniki odkształceń z analizy MES porównano z rozwiązaniami z programu Bisar, zakładając pełną szczepność międzywarstwową. Uzyskano dobrą zgodność rozwiązań (tablica 3.1 oraz rys. 3.16).

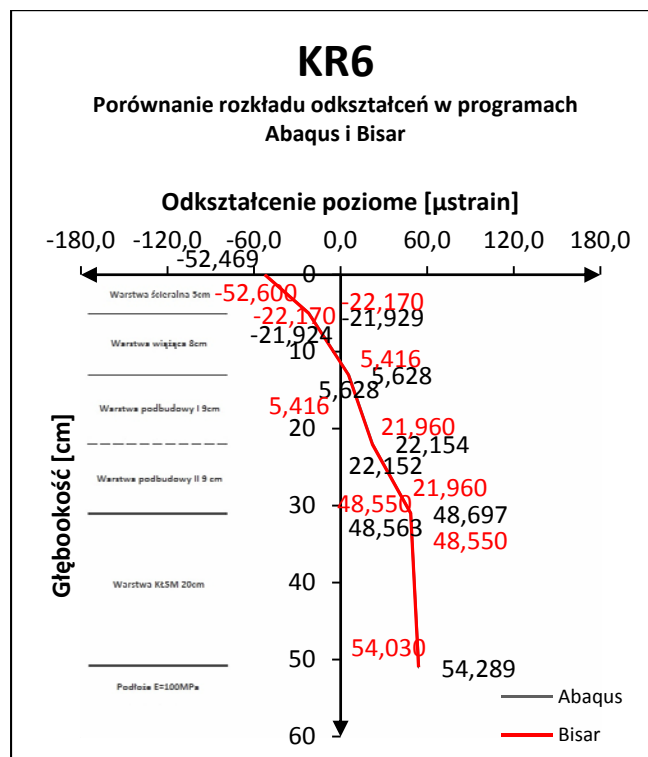
Tablica 3.1. Porównanie wyników analizy konstrukcji KR6 z programu Bisar i Abaqus podczas modelowania pełnej szczepności międzywarstwowej

| KR6   |                |                |        |
|---|----------------|----------------|--------|
| Parametr  | Bisar          | Abaqus         | Błąd   |
| Naprężenie pionowe na powierzchni warstwy ścieralnej $\sigma_z$ [MPa]                               | 0,7            | 0,7            | 0,0%   |
| Ugięcie pod osią obciążenia $U_z$ [ $\mu\text{m}$ ]   | 230,0          | 231,0          | 0,4%   |
| Odkształcenie poziome na spodzie warstwy wiążącej BA2 $\epsilon_2$ dół [ $\mu\text{strain}$ ]       | 5,41           | 5,63           | 4,0%   |
| Odkształcenie poziome pomiędzy warstwami podbudowy BA3 $\epsilon_3$ góra-dół [ $\mu\text{strain}$ ] | 21,96          | 22,15          | 0,9%   |
| Odkształcenie poziome na spodzie warstwy podbudowy BA3 $\epsilon_3$ dół [ $\mu\text{strain}$ ]      | 48,60          | 48,56          | -0,1%  |
| Trwałość warstwy wiążącej BA2 [ilość osi]   | 34 382 667 862 | 30 195 688 462 | -12,2% |
| Trwałość górnej warstwy podbudowy BA3 [ilość osi standardowych]                                     | 341 963 501    | 332 213 549    | -2,9%  |
| Trwałość warstwy podbudowy BA3 [ilość osi standardowych]  | 13 713 261     | 13 747 479     | 0,2%   |

Do obliczeń trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni w tym przypadku i każdym innym w raporcie wykorzystano kryteria zmęczeniowe warstw asfaltowych Instytutu Asfaltowego opisane dokładnie w pracy [8].



Rys. 3.15. Porównanie rozkładu naprężeń poziomych na głębokości konstrukcji nawierzchni KR6 w programach Abaqus i Bisar dla przypadku pełnej szczepności



Rys. 3.16. Porównanie rozkładu odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji nawierzchni KR6 w programach Abaqus i Bisar dla przypadku pełnej szczepności

### 3.3. Modelowanie kontaktu międzywarstwowego z zastosowaniem pełnego poślizgu

Wykorzystując przygotowaną wcześniej siatkę MES przeprowadzono analizę deformacji nawierzchni KR6 zakładając poślizg między warstwą wiążącą (BA2) i warstwą podbudowy (BA3). Pozostałe warstwy połączone zostały funkcją „tie”, modelując pełną szepność. Poślizg modelowano przy pomocy interakcji „surface-to-surface contact” z własnościami „interaction property” „tangential behavior, frictionless”, „normal behavior” „hard contact, allow separation after contact”.

Obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem geometrycznej nieliniowości wykorzystując metodę rozwiązania „static general”. Takie przyjęcie, wraz z wykorzystywanymi elementami skończonymi powoduje, że program Abaqus domyślnie zapisuje jako wynik odkształcenia logarytmiczne LE (*Abaqus Analysis User's Manual, 4.2.1 Abaqus/Standard output variable identifiers LE, All logarithmic strain components. For geometrically nonlinear analysis using element formulations that support finite strains, LE is the default strain measure for output to the output database*).

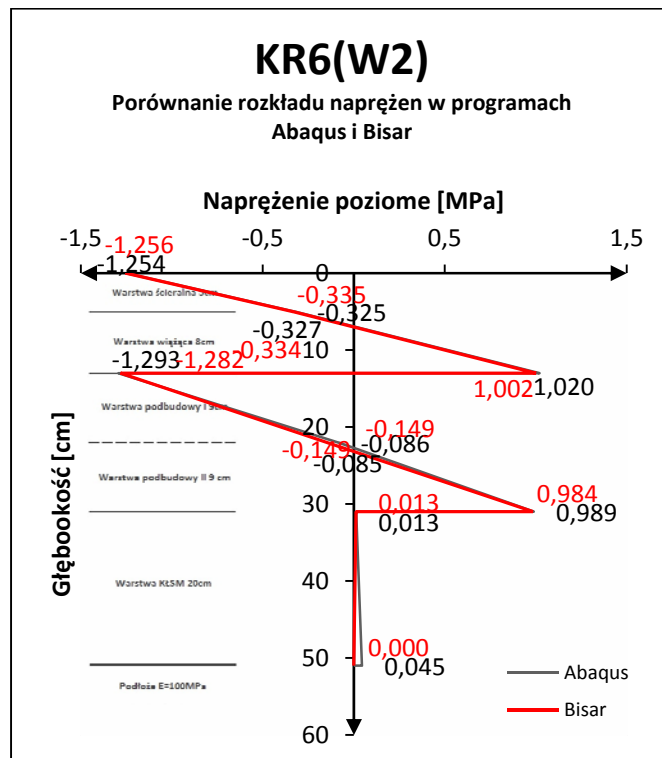
Otrzymane wyniki odkształceń i naprężeń z analizy MES porównano z rozwiązaniami z programu Bisar, zakładając pełny poślizg międzywarstwowo pomiędzy warstwą wiążącą i warstwą podbudowy (obliczenia wariant 2) oraz pełny poślizg międzywarstwowo pomiędzy warstwami podbudowy asfaltowej (wariant 8). Uzyskano dobrą zgodność rozwiązań (tablice 3.2 i 3.3 oraz na rys. 3.18 – 3.21).

Tablica 3.2. Porównanie wyników analizy konstrukcji KR6W2 (wariant 2 – brak szepności pomiędzy warstwą wiążącą i warstwą podbudowy) z programu Bisar i Abaqus podczas modelowania braku szepności (poślizgu)

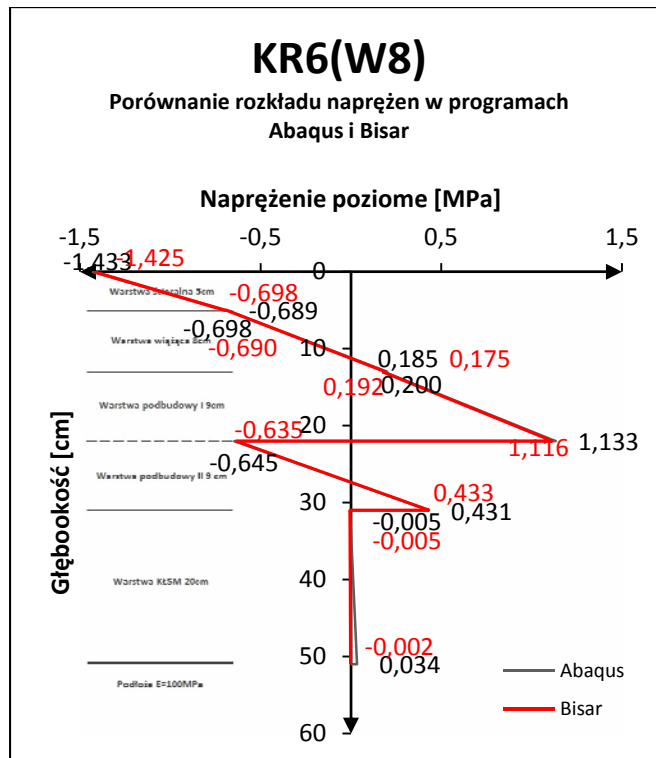
| KR6W2   |           |           |       |
|---|-----------|-----------|-------|
| Parametr  | Bisar     | Abaqus    | Błąd  |
| Naprężenie pionowe na powierzchni warstwy ścieralnej $\sigma_z$ [MPa]                         | 0,7       | 0,7       | 0,0%  |
| Ugięcie pod osią obciążenia $U_z$ [ $\mu\text{m}$ ]   | 326,0     | 326,6     | 0,2%  |
| Odształcenie poziome na spodzie warstwy wiążącej BA2 $\epsilon_2$ dół [ $\mu\text{strain}$ ]  | 84,40     | 85,61     | 1,4%  |
| Odształcenie poziome na spodzie warstwy podbudowy BA3 $\epsilon_3$ dół [ $\mu\text{strain}$ ] | 73,90     | 74,28     | 0,5%  |
| Trwałość warstwy wiążącej BA2 [ilość osi standardowych]                                       | 4 070 978 | 3 884 341 | -4,6% |
| Trwałość warstwy podbudowy BA3 [ilość osi standardowych]                                      | 3 452 644 | 3 394 869 | -1,7% |

Tablica 3.3. Porównanie wyników analizy konstrukcji KR6W8 (wariant 8 – brak szczepności pomiędzy warstwami podbudowy, układanej dwuwarstwowo) z programu Bisar i Abaqus podczas modelowania braku szczepności (poślizgu)

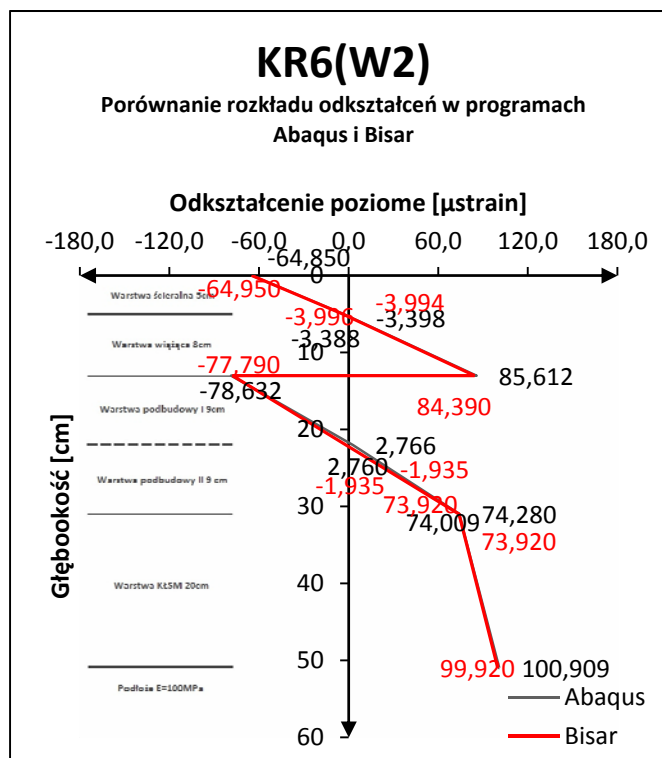
| KR6W8   |            |            |       |
|---|------------|------------|-------|
| Parametr  | Bisar      | Abaqus     | Błąd  |
| Napężenie pionowe na wierzchu warstwy ścieralnej $\sigma_z$ dół [Mpa]                             | 0,7        | 0,7        | 0,0%  |
| Ugięcie pod osią obciążenia $U_z$ [ $\mu\text{m}$ ]   | 230,0      | 231,0      | 0,4%  |
| Odształcenie poziome pomiędzy warstwami podbudowy $\epsilon_3$ dół [ $\mu\text{strain}$ ]         | 85,29      | 86,55      | 1,5%  |
| Odształcenie poziome na spodzie warstwy podbudowy BA3 $\epsilon_3$ dół dół [ $\mu\text{strain}$ ] | 33,30      | 33,22      | -0,2% |
| Trwałość górnej warstwy podbudowy BA3 [ilość osi]   | 3 932 838  | 3 748 225  | -4,7% |
| Trwałość dolnej warstwy podbudowy BA3 [ilość osi]   | 47 587 922 | 47 954 189 | 0,8%  |



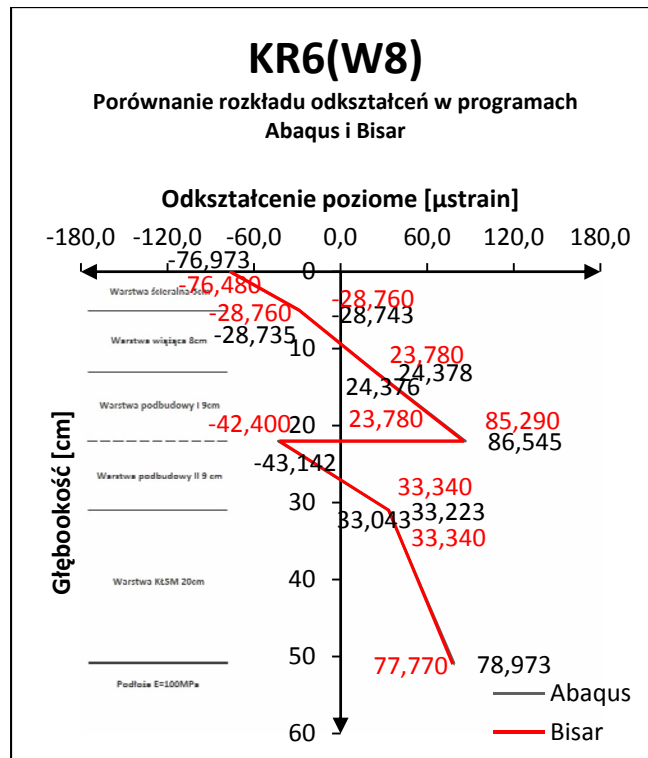
Rys. 3.18. Porównanie naprężeń poziomych na głębokości konstrukcji nawierzchni uzyskanych z programów Abaqus i Bisar dla przypadku pełnego poślizgu KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i warstwą podbudowy)



Rys. 3.19. Porównanie naprężeń poziomych na głębokości konstrukcji nawierzchni uzyskanych z programów Abaqus i Bisar dla przypadku pełnego poślizgu KR6W8 (wariant 8 – brak szczepności pomiędzy warstwą podbudowy i warstwą podbudowy)



Rys. 3.20. Porównanie odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji nawierzchni uzyskanych z programów Abaqus i Bisar dla przypadku pełnego poślizgu KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i warstwą podbudowy)

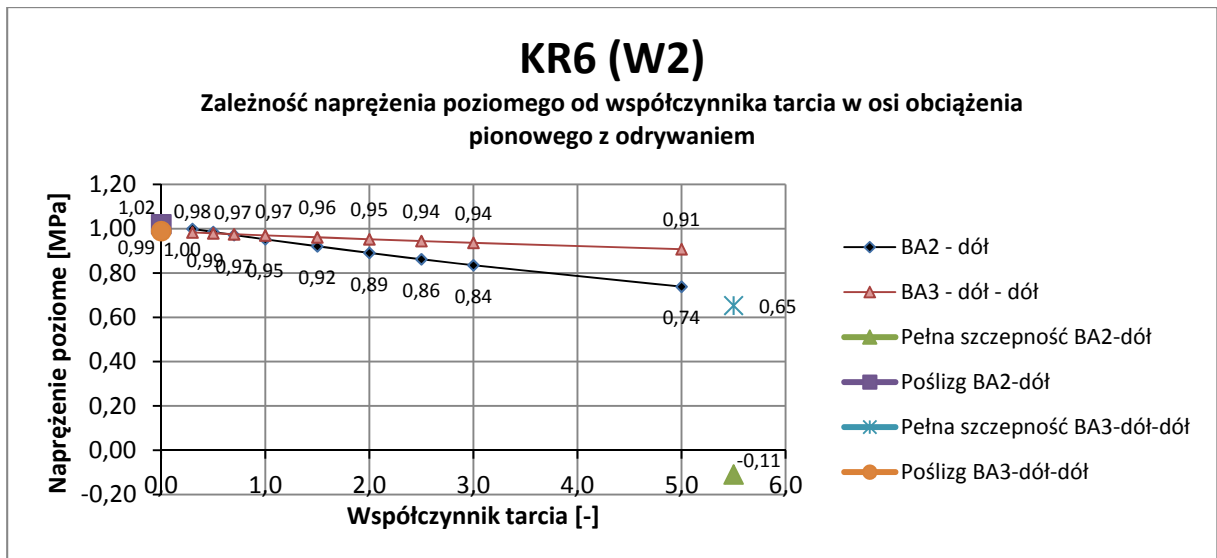


Rys. 3.21. Porównanie odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji nawierzchni uzyskanych z programów Abaqus i Bisar dla przypadku pełnego poślizgu KR6W8 (wariant 8 – brak szczepności pomiędzy warstwą podbudowy i warstwą podbudowy)

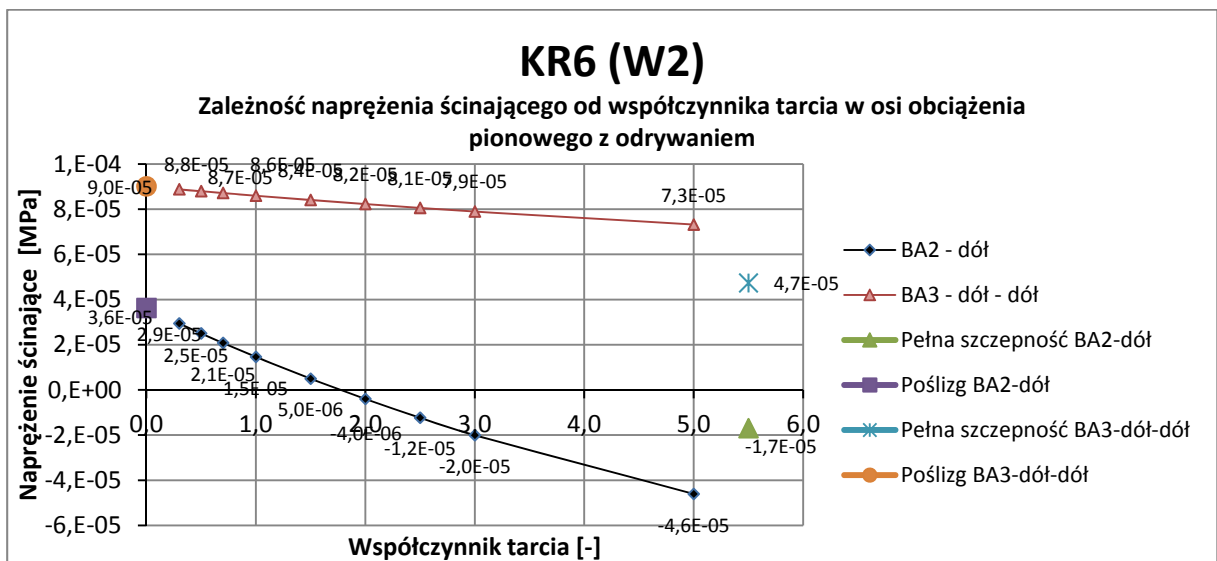
### 3.4. Modelowanie kontaktu międzywarstwowego z zastosowaniem tarcia

Korzystając z modelu opisanego w poprzednim punkcie przeprowadzono analizę deformacji nawierzchni przy założeniu istnienia tarcia na styku warstwy wiążącej (BA2) i warstwy podbudowy (BA3). Założono, że brak jest szczepności międzywarstwowej, warstwy spoczywają jedna na drugiej. Tarcie to modelowano przy pomocy interakcji „surface-to-surface contact” z własnościami „interaction property” „tangential behavior, friction formulation penalty, friction coefficient”, „normal behavior” „hard contact, allow separation after contact”. Początkowo rozpatrzono dwie wartości współczynnika tarcia 0.5 i 0.7. W dalszej analizie przeanalizowano dokładnie w zakresie od 0 do 5 wpływ zmiany współczynnika tarcia na rozkład naprężeń i odkształceń w konstrukcji. Podobnie jak w modelu z poślizgiem przeprowadzono analizę geometrycznie nieliniową.

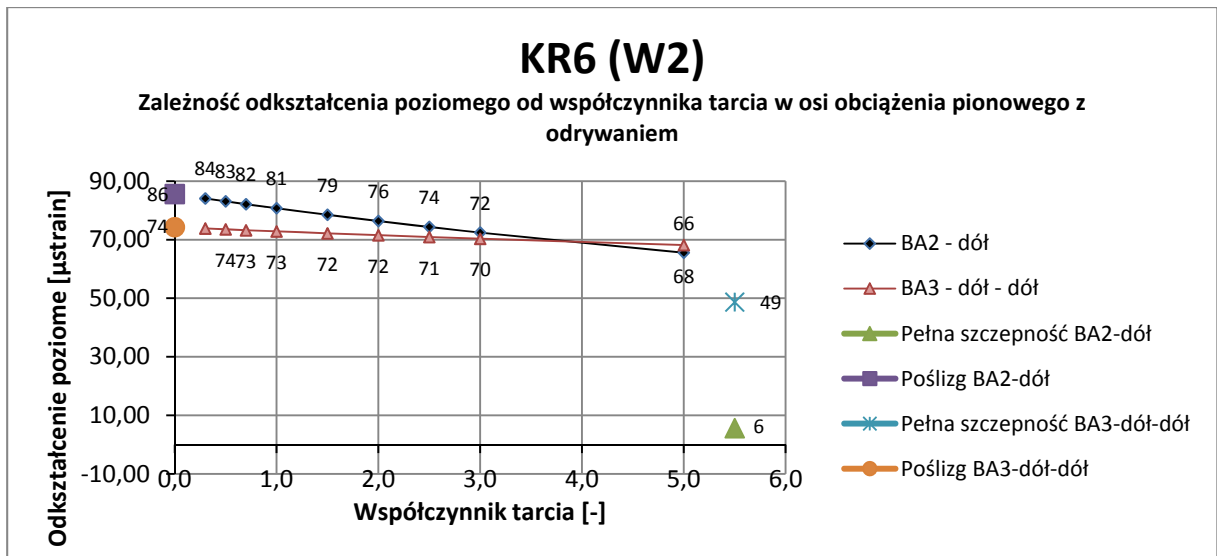
Wpływ wartości współczynnika tarcia pomiędzy warstwą wiążącą i podbudową (KR6W2) przedstawiono na rys. 3.32 – 3.37 oraz pomiędzy warstwą podbudowy i podbudowy (KR6W8) przedstawiono na rys. 3.38-3.40.



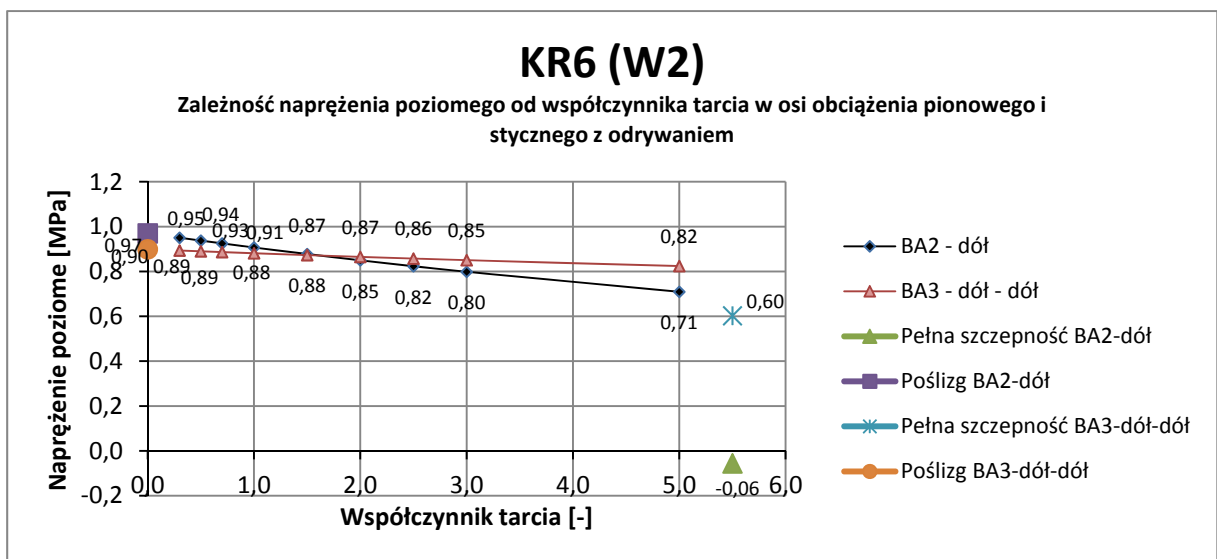
Rys. 3.32. Wpływ wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwą podbudowy a warstwą wiążącą (KR6W2) na naprężenia poziome, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe



Rys. 3.33. Wpływ zmiany wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwą podbudowy a warstwą wiążącą (KR6W2) na naprężenia ścinające, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe

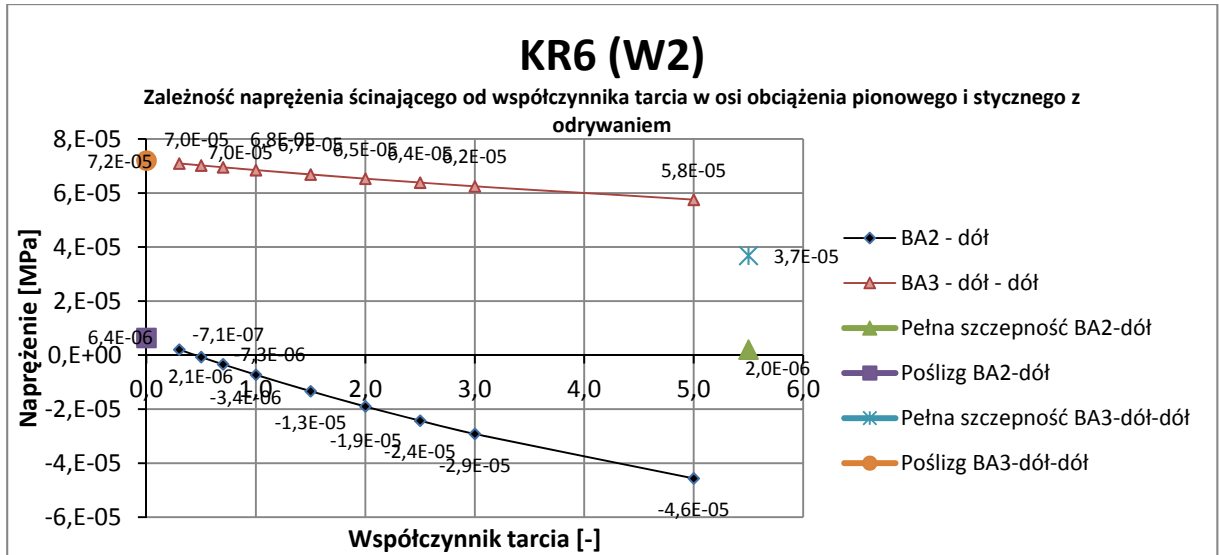


Rys. 3.34. Wpływ zmiany wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwą podbudowy a warstwą wiążącą (KR6W2) na odkształcenia poziome, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe

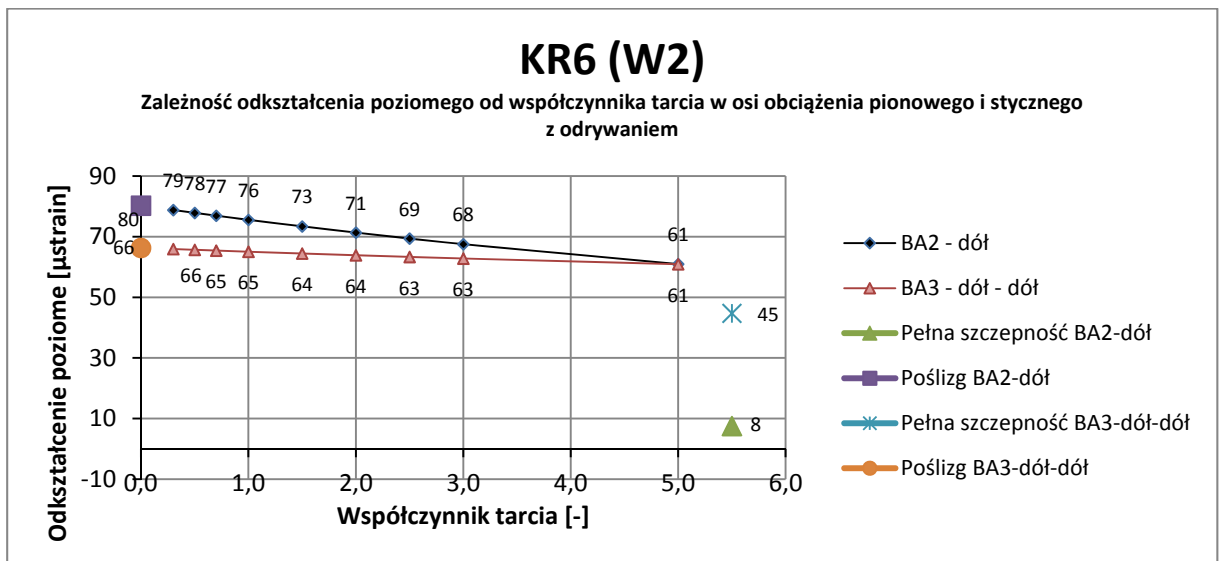


Rys. 3.35. Wpływ zmiany wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwą podbudowy a warstwą wiążącą (KR6W2) na odkształcenia poziome, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe i styczne

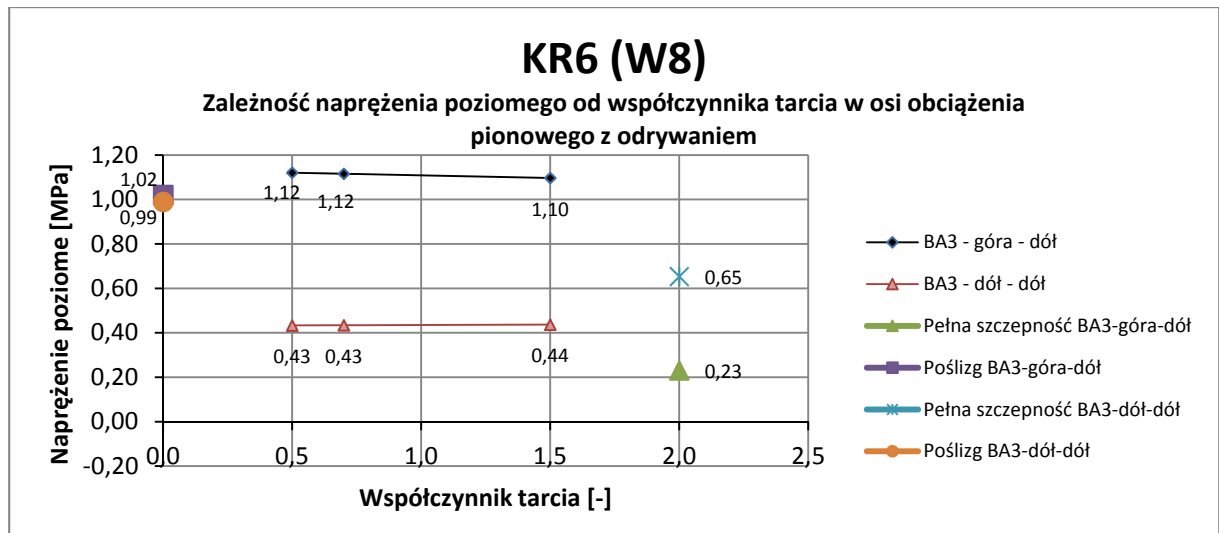




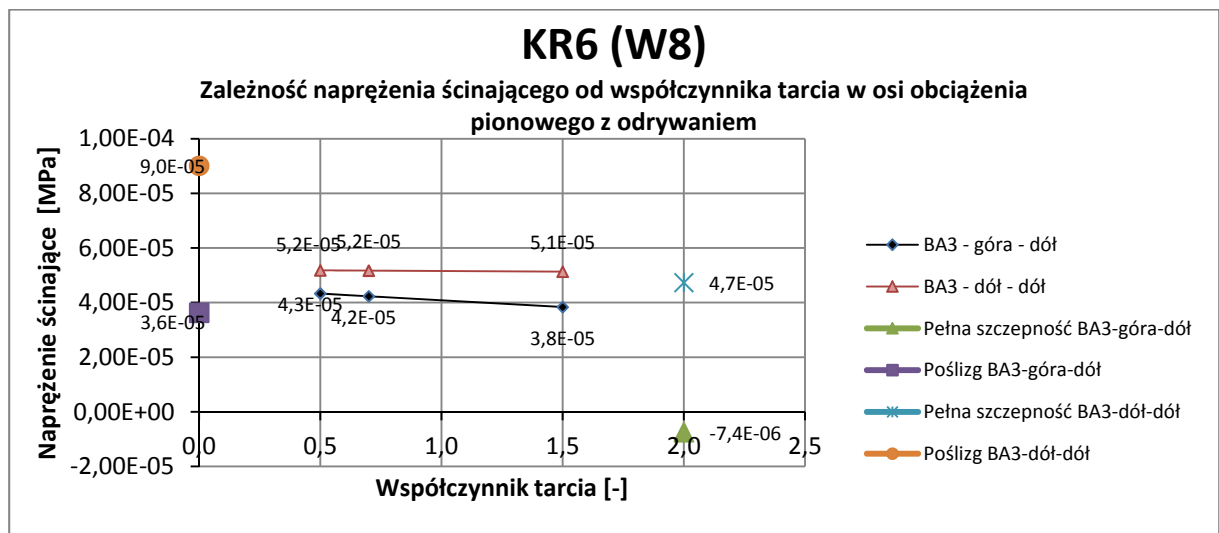
Rys. 3.36. Wpływ zmiany wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwą podbudowy a warstwą wiążącą (KR6W2) na naprężenia styczne, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe i styczne



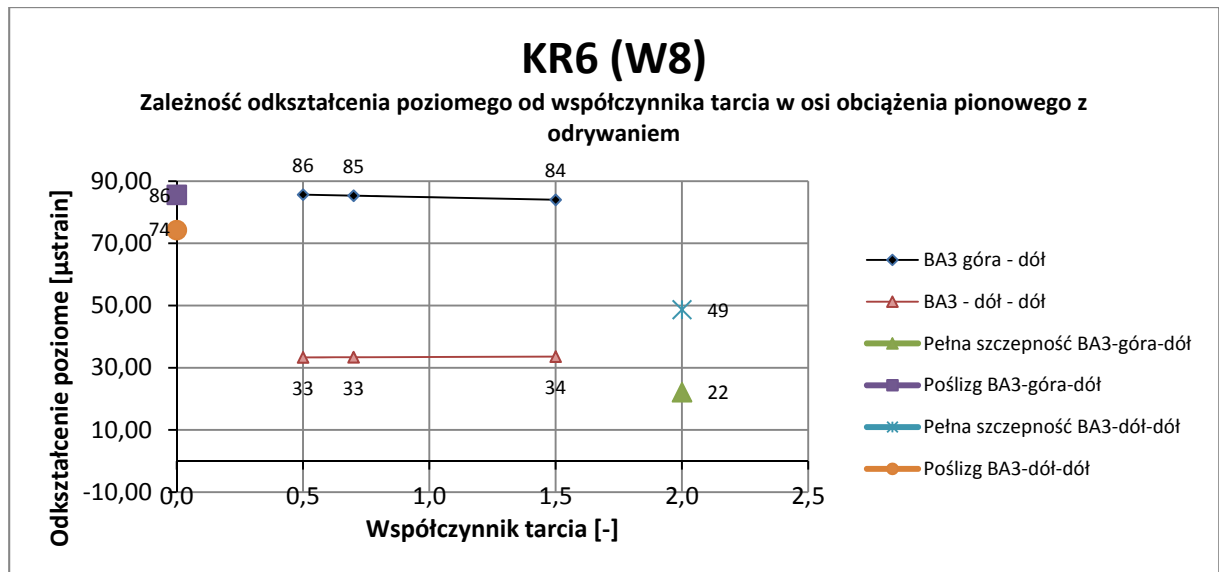
Rys. 3.37. Wpływ zmiany wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwą podbudowy a warstwą wiążącą (KR6W2) na odkształcenia poziome, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe i styczne



Rys. 3.38. Wpływ zmiany wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwami podbudowy na naprężenia poziome, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe



Rys. 3.39. Wpływ zmiany wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwami podbudowy (KR6W8) na naprężenia ścinające, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe



Rys. 3.40. Wpływ zmiany wielkości współczynnika tarcia pomiędzy warstwami podbudowy (KR6W8) na odkształcenia poziome, punkt pomiaru w osi obciążenia, obciążenie pionowe

### 3.5. Model zespolony (tarcie i kontakt kohezyjny)

Na podstawie pracy Romanoschi [10, 11] przeprowadzono analizę deformacji nawierzchni KR6 zakładając na styku warstwy wiążącej BA2 i warstwy podbudowy BA3 model łączący w sobie kontakt z opcjami „cohesive behavior” i „damage” oraz tarcie. Wykorzystano w ten sposób możliwości programu Abaqus opisane w *Abaqus Analysis User's Manual*, 35.1.10 *Surface-based cohesive behavior, Interaction of traction-separation behavior with compressive and friction behavior*.

Model ten pozwala na analizę dwufazowego zachowania styku dwóch warstw. W fazie pierwszej styk dwóch warstw pracuje sprężysto, wykorzystując sztywności (sztywność ścinania  $\tau/s$  z badania Leutnera) określone dla modelu kohezyjnego, a w fazie drugiej, po inicjacji zniszczenia aktywuje się model tarcia pomiędzy powierzchniami.

W analizie przyjęto następujące własności warstwy kohezyjnej:

- sztywność normalna 657 i 3285 MPa/m (sztywność styczna x10),
  - sztywności styczne 65,7 i 328,5 MPa/m,
  - nominalne naprężenie normalne 1,15 i 5 MPa (naprężenia styczne x10),
  - nominalne naprężenia styczne 0,115 i 0,5 MPa,
  - przemieszczenie przy zniszczeniu 0,002 m oraz 0,0002 m
- oraz współczynnik tarcia równy 0,5.

Model oznaczono odpowiednio X4 i X3 ze względu na sztywności i naprężenia oraz N i brak ze względu na przemieszczenia.

Wyniki obliczeń mechanistycznych z programu Abaqus z zastosowaniem modelu zespolonego przedstawiono w tablicach 3.4 i 3.5 dla wariantu KR6W2, w tablicy 3.6 dla wariantu KR6W8 oraz na rys. od 3.41 do 3.51.

Tablica 3.4. Zestawienie wyników obliczeń konstrukcji KR6 przy modelowaniu metodą Romanoschi (wariant W2) – obciążenie pionowe

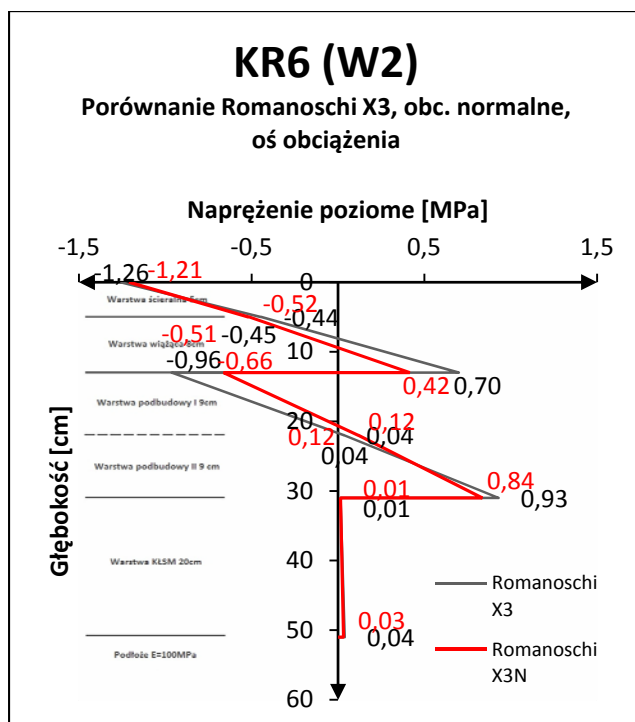
| <b>KR6 (W2)</b>                                   | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N |
|---|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Odształcenie BA2 $\epsilon_2$ dół [ $\mu$ strain] | 63,0          | 43,0            | 76,4          | 63,0            |
| Odształcenie BA3 $\epsilon_3$ dół [ $\mu$ strain] | 69,6          | 62,5            | 73,2          | 69,6            |
| Naprężenie ścinające $\tau_{2xy}$ dół [MPa]       | 1,165E-04     | 2,392E-04       | -1,169E-04    | 1,165E-04       |
| Trwałość BA2 [osi standardowych]                  | 10 637 779    | 37 434 175      | 5 638 568     | 10 637 779      |
| Trwałość BA3 [osi standardowych]                  | 4 210 301     | 5 996 312       | 3 557 966     | 4 210 301       |

Tablica 3.5. Zestawienie wyników obliczeń konstrukcji KR6 przy modelowaniu tarcia pomiędzy warstwą wiążącą i podbudową (wariant W2) – obciążenie pionowe i styczne

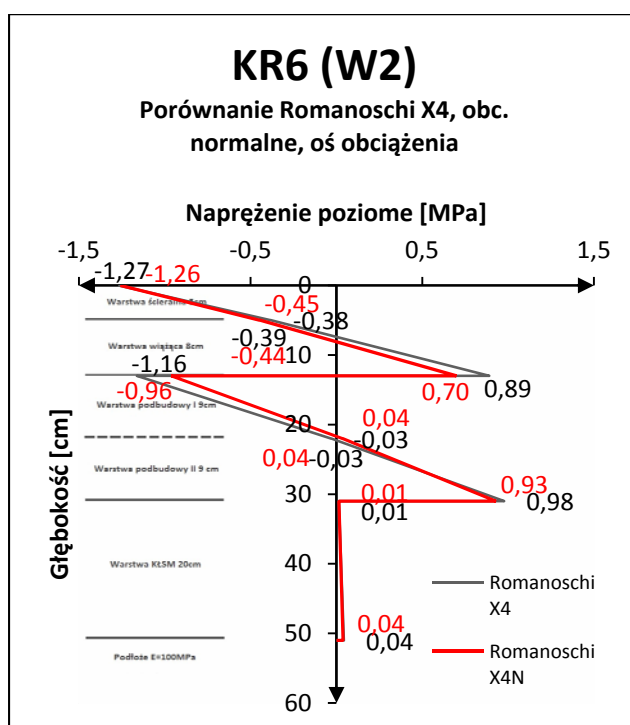
| <b>KR6 (W2)</b>                                   | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N | Romanoschi X4 (odrywanie) |
|---|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------------------|
| Odształcenie BA2 $\epsilon_2$ dół [ $\mu$ strain] | 57,7          | 38,3            | 71,0          | 57,7            | 71,0                      |
| Odształcenie BA3 $\epsilon_3$ dół [ $\mu$ strain] | 62,2          | 55,9            | 65,5          | 62,2            | 65,5                      |
| Naprężenie ścinające $\tau_{2xy}$ dół [MPa]       | 2,925E-05     | 1,800E-04       | 2,925E-05     | 7,789E-05       | 2,925E-05                 |
| Trwałość BA2 [osi standardowych]                  | 14 228 686    | 54 823 454      | 7 182 416     | 14 228 686      | 7 182 416                 |
| Trwałość BA3 [osi standardowych]                  | 6 090 719     | 8 655 424       | 5 140 034     | 6 090 719       | 5 140 034                 |

Tablica 3.6. Zestawienie wyników obliczeń konstrukcji KR6 przy modelowaniu metodą Romanoschi (wariant W8) – obciążenie pionowe

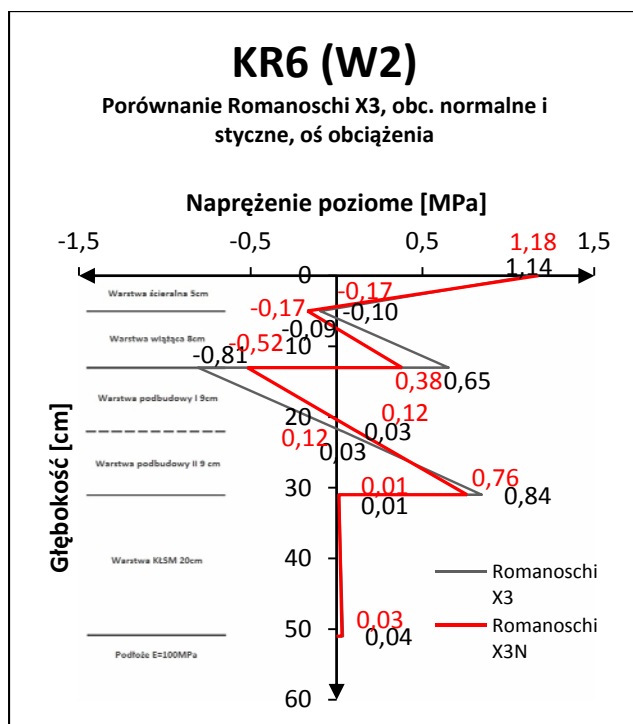
| <b>KR6 (W8)</b>   | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 z odrywaniem | Romanoschi X4 N |
|---|---------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| Odształcenie BA3 $\epsilon_{31}$ góra dół [ $\mu$ strain] | 66,7          | 50,3            | 78,2                       | 18,3            |
| Odształcenie BA3 $\epsilon_{32}$ dół dół [ $\mu$ strain]  | 42,1          | 46,1            | 36,6                       | 37,8            |
| Trwałość BA31 [osi standardowych]                         | 8 825 174     | 4,61E-05        | 5 230 415                  | 8 825 187       |
| Trwałość BA32 [osi standardowych]                         | 21 958 456    | 16 372 884      | 31 238 586                 | 21 958 468      |



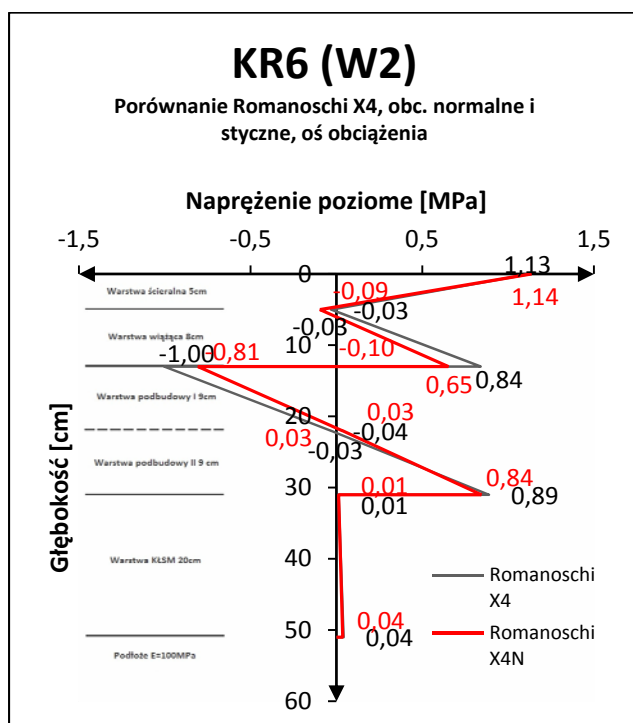
Rys. 3.41. Porównanie rozkładu naprężeń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W2) Romanoschi X3 i Romanoschi X3N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe



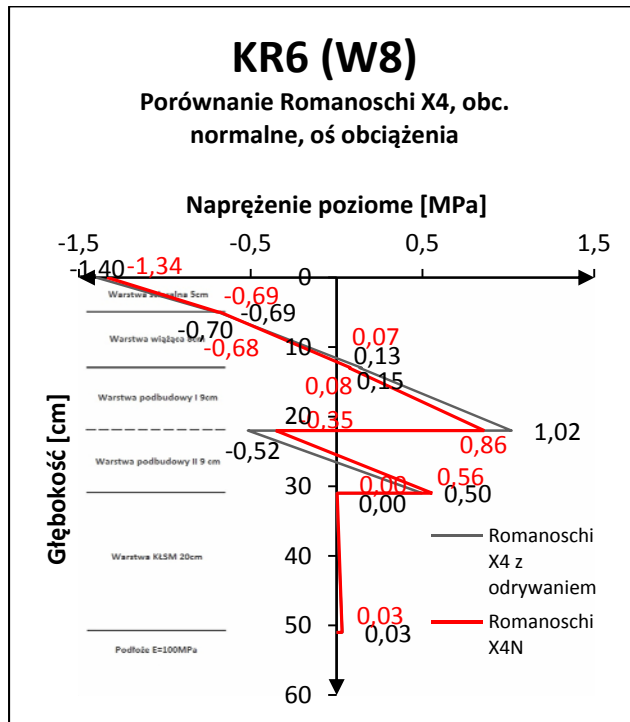
Rys. 3.42. Porównanie rozkładu naprężeń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W2) Romanoschi X4 i Romanoschi X4N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe



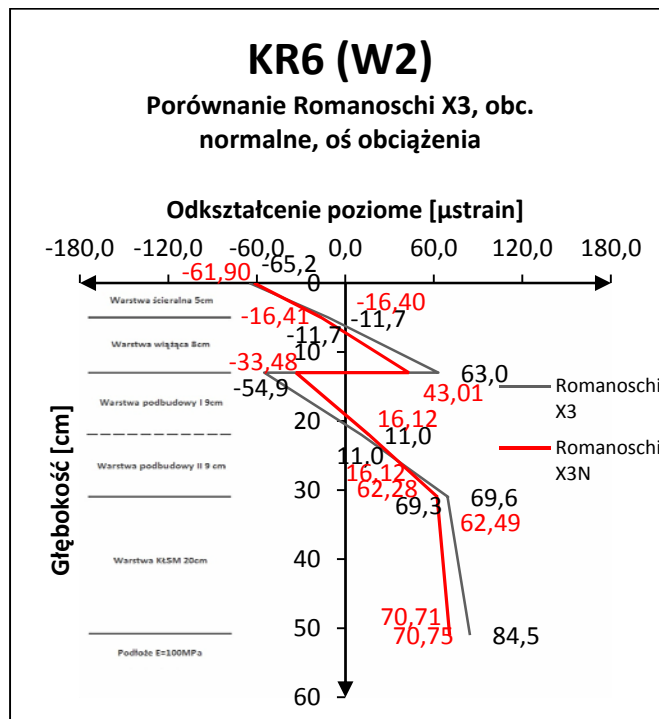
Rys. 3.43. Porównanie rozkładu naprężeń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W2) Romanoschi X3 i Romanoschi X3N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe i styczne



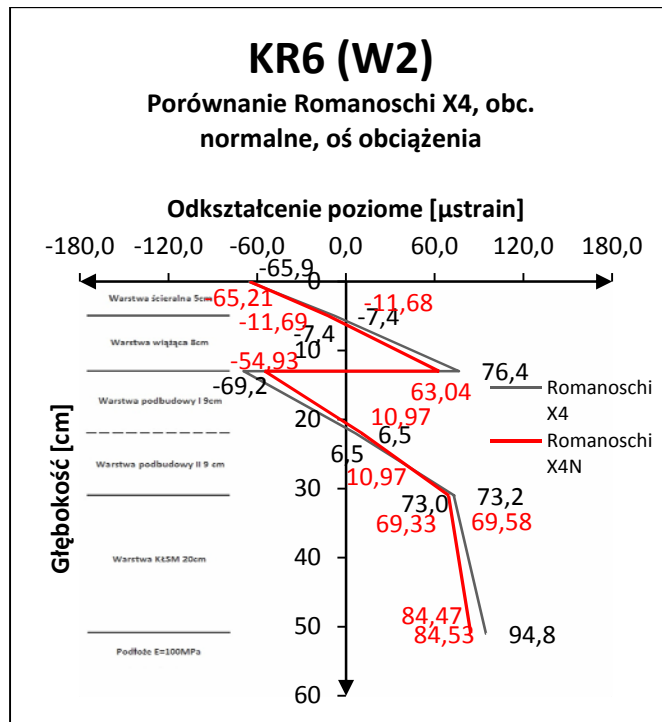
Rys. 3.44. Porównanie rozkładu naprężeń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W2) Romanoschi X4 i Romanoschi X4N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe i styczne



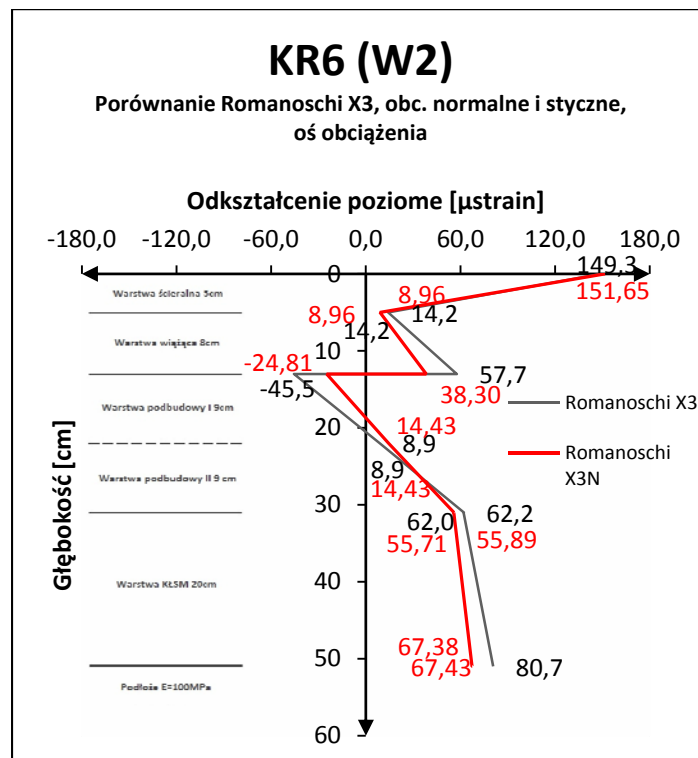
Rys. 3.45. Porównanie rozkładu naprężeń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W8) Romanoschi X4 z odrywaniem i Romanoschi X4N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe



Rys. 3.46. Porównanie rozkładu odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W2) Romanoschi X3 i Romanoschi X3N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe

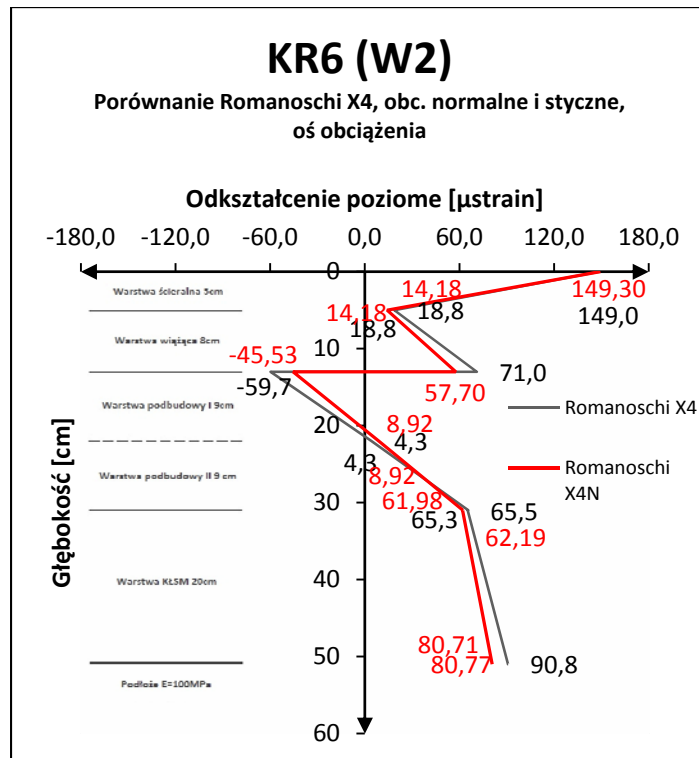


Rys. 3.47. Porównanie rozkładu odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W2) Romanoschi X4 i Romanoschi X4N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe

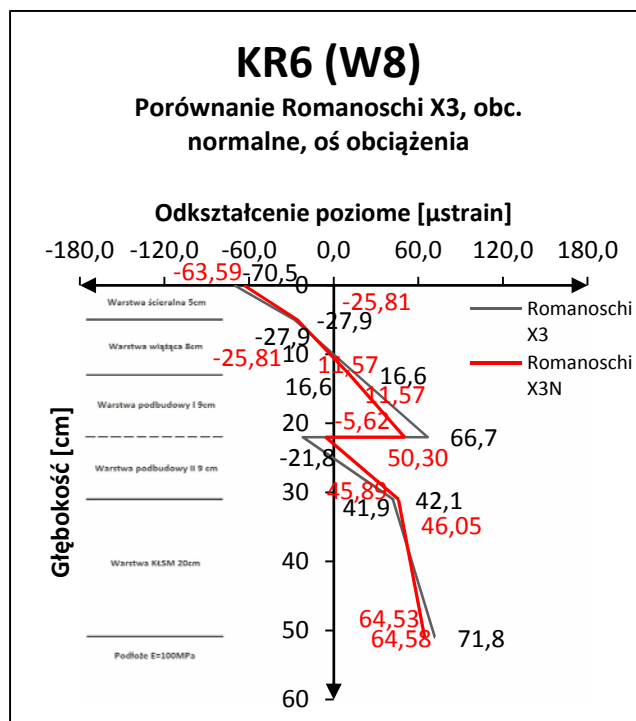


Rys. 3.48. Porównanie rozkładu odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W2) Romanoschi X3 i Romanoschi X3N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe i styczne

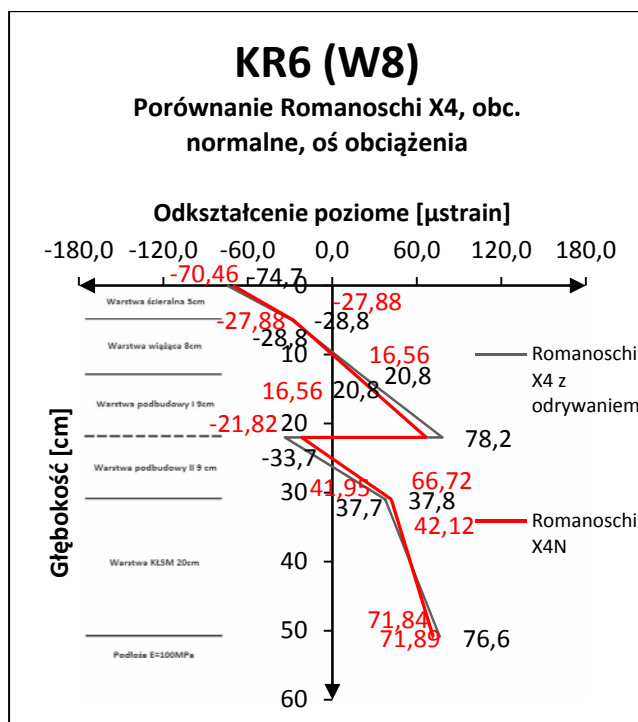




Rys. 3.49. Porównanie rozkładu odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W2) Romanoschi X4 i Romanoschi X4N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe i styczne



Rys. 3.50. Porównanie rozkładu odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W8) Romanoschi X3 i Romanoschi X3N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe



Rys. 3.51. Porównanie rozkładu odkształceń poziomych na głębokości konstrukcji dla przypadków KR6(W8) Romanoschi X4 i Romanoschi X4N, punkt pomiarowy w osi obciążenia, obciążenie pionowe

### 3.6. Wskazanie modelu do dalszych analiz

W tablicach 3.7 i 3.8 oraz na rys. 3.51 i 3.53 zestawiono wyniki obliczeń konstrukcji nawierzchni KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i podbudową), natomiast w tablicach 3.9 i 3.10 oraz na rys. 3.52 i 3.54 zestawiono wyniki obliczeń konstrukcji nawierzchni KR6W8 (wariant 8 – brak szczepności pomiędzy warstwami podbudowy asfaltowej).

Na rysunkach 3.55 i 3.56 zestawiono naprężenia i odkształcenia konstrukcji nawierzchni KR6W2 występujące w osi krawędzi obciążenia.

Na podstawie wykonanych zestawień do dalszych analiz wybrano model zespolony, stworzony na podstawie prac Romanoschiego.

Model ten pozwala na analizę dwufazowego zachowania się styku dwóch warstw. W fazie pierwszej styk dwóch warstw pracuje sprężysto, wykorzystując sztywności (sztywność ścinania  $\tau/s$  z badania Leutnera) określone dla modelu kohezyjnego, a w fazie drugiej, po inicjacji zniszczenia aktywuje się model tarcia pomiędzy powierzchniami.

Tablica 3.51. Zestawienie naprężeń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i podbudowy)

| KR6 (W2), OBCIĄŻENIE PIONOWE |                               |                  |                     |                                 |               |                 |               |                 |
|------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Głębokość [cm]               | Naprężenia                    | Pełna szczepność | poślizg (odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N |
| 0                            | $\sigma_{x1}$ góra [MPa]      | -1,07            | -1,25               | -1,24                           | -1,26         | -1,21           | -1,27         | -1,26           |
| 5                            | $\sigma_{x1}$ dół [MPa]       | -0,61            | -0,33               | -0,33                           | -0,45         | -0,52           | -0,39         | -0,45           |
| 5                            | $\sigma_{x2}$ góra [MPa]      | -0,60            | -0,32               | -0,33                           | -0,44         | -0,51           | -0,38         | -0,44           |
| 13                           | $\sigma_{x2}$ dół [MPa]       | -0,11            | 1,02                | 0,99                            | 0,70          | 0,42            | 0,89          | 0,70            |
| 13                           | $\sigma_{x3}$ góra góra [MPa] | -0,11            | -1,29               | -1,26                           | -0,96         | -0,66           | -1,16         | -0,96           |
| 22                           | $\sigma_{x3}$ góra dół [MPa]  | 0,23             | -0,09               | -0,11                           | 0,04          | 0,12            | -0,03         | 0,04            |
| 22                           | $\sigma_{x3}$ dół góra [MPa]  | 0,23             | -0,08               | -0,08                           | 0,04          | 0,12            | -0,03         | 0,04            |
| 31                           | $\sigma_{x3}$ dół dół [MPa]   | 0,65             | 0,99                | 0,98                            | 0,93          | 0,84            | 0,98          | 0,93            |
| 31                           | KŁSM góra [MPa]               | 0,01             | 0,01                | 0,01                            | 0,01          | 0,01            | 0,01          | 0,01            |
| 51                           | KŁSM dół [MPa]                | 0,02             | 0,05                | 0,05                            | 0,04          | 0,03            | 0,04          | 0,04            |
| 51                           | Podłoże góra [MPa]            | 0,00             | 0,00                | 0,00                            | 0,00          | 0,00            | 0,00          | 0,00            |

Tablica 3.52. Zestawienie odkształceń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i podbudowy)

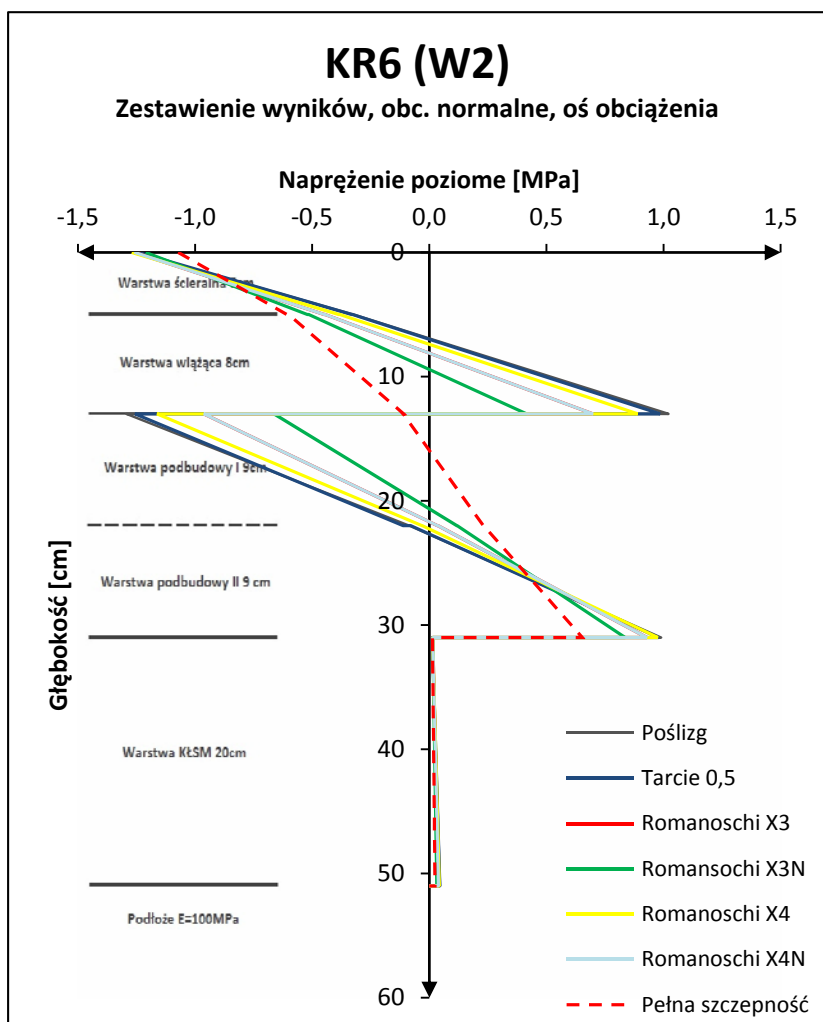
| KR6 (W2), OBCIĄŻENIE PIONOWE |  |                  |                     |                                 |               |                 |               |                 |
|------------------------------|--|------------------|---------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Głębokość [cm]               | Odształcenia                                 | pełna szczepność | poślizg (odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N |
| 0                            | $\varepsilon_{x1}$ góra [ $\mu$ strain]      | -52,47           | -64,85              | -64,21                          | -65,21        | -61,90          | -65,93        | -65,21          |
| 5                            | $\varepsilon_{x1}$ dół [ $\mu$ strain]       | -21,92           | -3,39               | -3,61                           | -11,68        | -16,40          | -7,39         | -11,68          |
| 5                            | $\varepsilon_{x2}$ góra [ $\mu$ strain]      | -21,93           | -3,40               | -3,61                           | -11,69        | -16,41          | -7,40         | -11,69          |
| 13                           | $\varepsilon_{x2}$ dół [ $\mu$ strain]       | 5,63             | 85,61               | 83,13                           | 63,04         | 43,01           | 76,45         | 63,04           |
| 13                           | $\varepsilon_{x3}$ góra góra [ $\mu$ strain] | 5,63             | -78,63              | -76,09                          | -54,93        | -33,48          | -69,23        | -54,93          |
| 22                           | $\varepsilon_{x3}$ góra dół [ $\mu$ strain]  | 22,15            | 2,77                | 0,98                            | 10,97         | 16,12           | 6,54          | 10,97           |
| 22                           | $\varepsilon_{x3}$ dół góra [ $\mu$ strain]  | 22,15            | 2,76                | 2,97                            | 10,97         | 16,12           | 6,54          | 10,97           |
| 31                           | $\varepsilon_{x3}$ dół dół [ $\mu$ strain]   | 48,70            | 74,28               | 73,54                           | 69,58         | 62,49           | 73,23         | 69,58           |
| 31                           | KŁSM góra [ $\mu$ strain]                    | 48,56            | 74,01               | 73,28                           | 69,33         | 62,28           | 72,97         | 69,33           |
| 51                           | KŁSM dół [ $\mu$ strain]                     | 54,29            | 100,91              | 100,30                          | 84,47         | 70,71           | 94,77         | 84,47           |
| 51                           | Podłoże góra [ $\mu$ strain]                 | 54,34            | 100,98              | 100,37                          | 84,53         | 70,75           | 94,83         | 84,53           |

Tablica 3.53. Zestawienie naprężeń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W8 (wariant 8 – brak szczepności pomiędzy warstwą podbudowy i podbudowy asfaltowej)

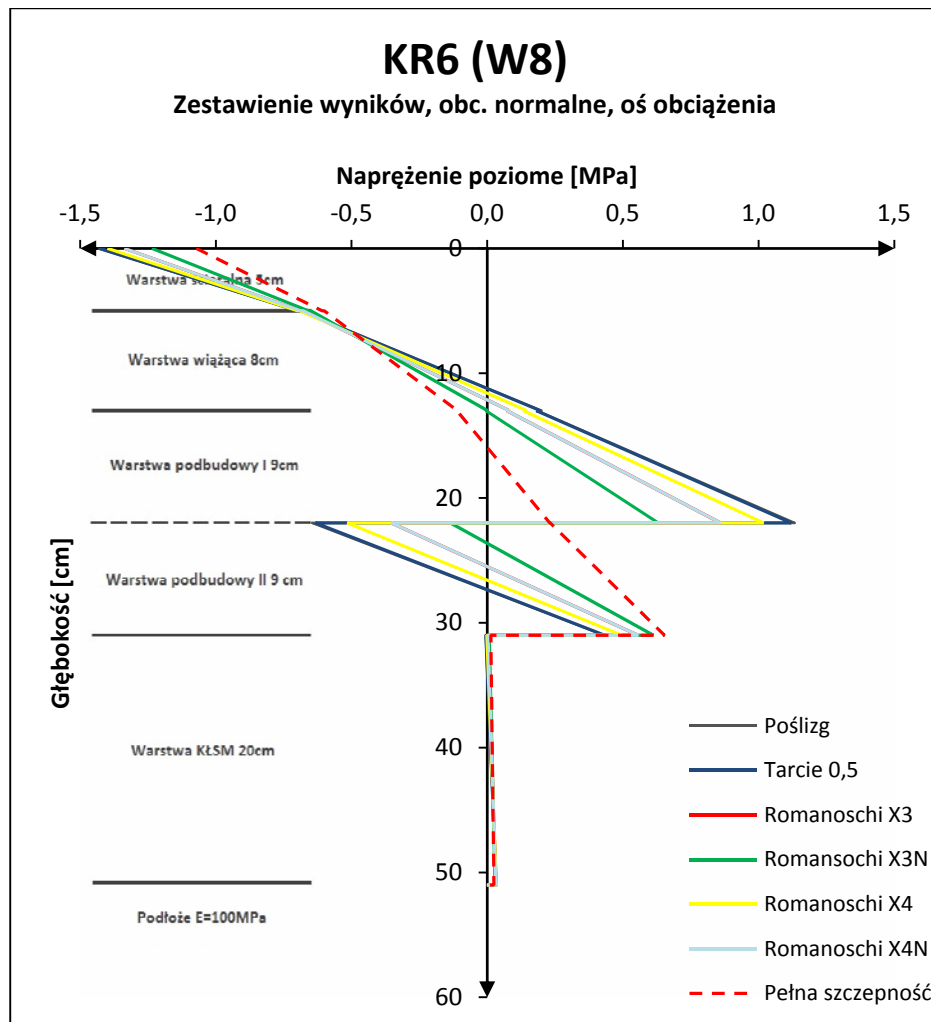
| KR6W8, OBCIĄŻENIE PIONOWE |                               |                  |                     |                                 |               |                 |               |                 |
|---------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Głębokość [cm]            | Naprężenia                    | Pełna szczepność | poślizg (odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N |
| 0                         | $\sigma_{x1}$ góra [MPa]      | -1,07            | -1,43               | -1,43                           | -1,34         | -1,24           | -1,40         | -1,34           |
| 5                         | $\sigma_{x1}$ dół [MPa]       | -0,61            | -0,70               | -0,70                           | -0,69         | -0,66           | -0,70         | -0,69           |
| 5                         | $\sigma_{x2}$ góra [MPa]      | -0,60            | -0,69               | -0,69                           | -0,68         | -0,65           | -0,69         | -0,68           |
| 13                        | $\sigma_{x2}$ dół [MPa]       | -0,11            | 0,20                | 0,20                            | 0,08          | 0,00            | 0,15          | 0,08            |
| 13                        | $\sigma_{x3}$ góra góra [MPa] | -0,11            | 0,18                | 0,18                            | 0,07          | 0,00            | 0,13          | 0,07            |
| 22                        | $\sigma_{x3}$ góra dół [MPa]  | 0,23             | 1,13                | 1,12                            | 0,86          | 0,63            | 1,02          | 0,86            |
| 22                        | $\sigma_{x3}$ dół góra [MPa]  | 0,23             | -0,64               | -0,63                           | -0,35         | -0,14           | -0,52         | -0,35           |
| 31                        | $\sigma_{x3}$ dół dół [MPa]   | 0,65             | 0,43                | 0,43                            | 0,56          | 0,61            | 0,50          | 0,56            |
| 31                        | KŁSM góra [MPa]               | 0,01             | -0,01               | -0,01                           | 0,00          | 0,01            | 0,00          | 0,00            |
| 51                        | KŁSM dół [MPa]                | 0,02             | 0,03                | 0,03                            | 0,03          | 0,03            | 0,03          | 0,03            |
| 51                        | Podłoże góra [MPa]            | 0,00             | 0,00                | 0,00                            | 0,00          | 0,00            | 0,00          | 0,00            |

Tablica 3.53. Zestawienie odkształceń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W8 (wariant 8 – brak szczepności pomiędzy warstwą podbudowy i podbudowy asfaltowej)

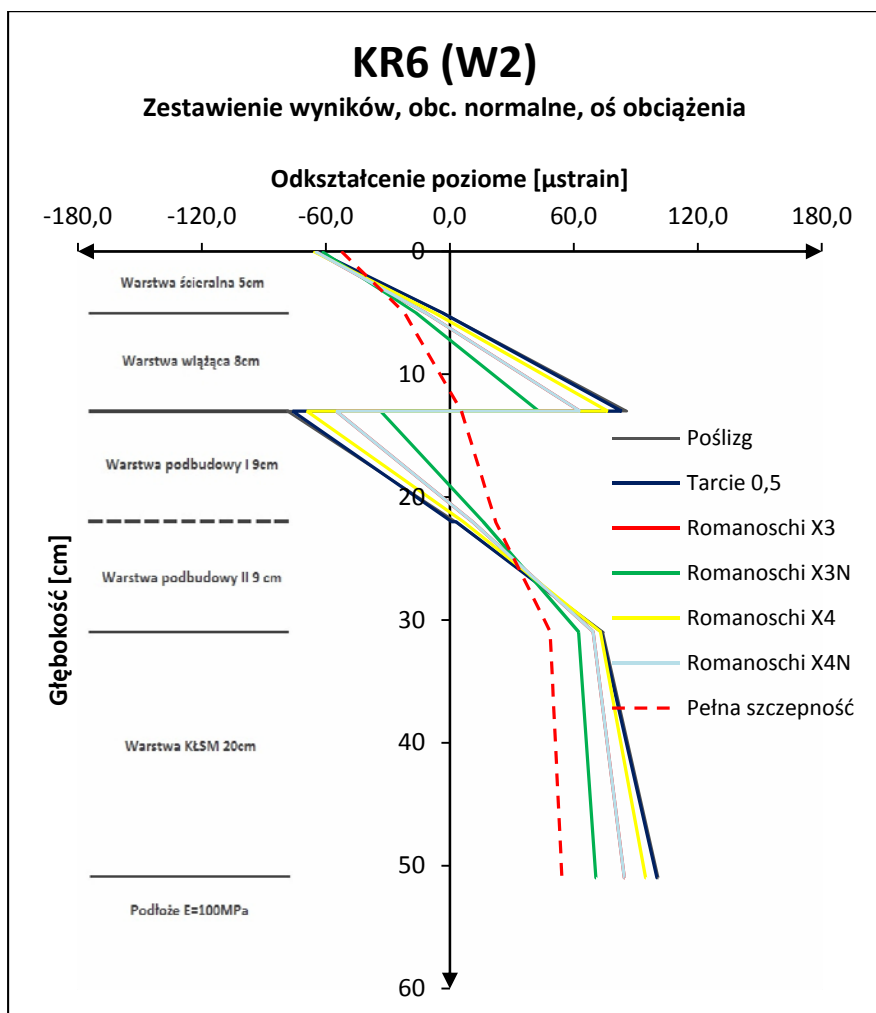
| KR6W8, OBCIĄŻENIE PIONOWE |  |                  |                     |                                 |               |                 |               |                 |
|---------------------------|--|------------------|---------------------|---------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Głębokość [cm]            | Odształcenia                                 | pełna szczepność | poślizg (odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N |
| 0                         | $\varepsilon_{x1}$ góra [ $\mu$ strain]      | -52,47           | -76,97              | -76,67                          | -70,46        | -63,59          | -74,74        | -70,46          |
| 5                         | $\varepsilon_{x1}$ dół [ $\mu$ strain]       | -21,92           | -28,74              | -28,65                          | -27,88        | -25,81          | -28,79        | -27,88          |
| 5                         | $\varepsilon_{x2}$ góra [ $\mu$ strain]      | -21,93           | -28,74              | -28,65                          | -27,88        | -25,81          | -28,80        | -27,88          |
| 13                        | $\varepsilon_{x2}$ dół [ $\mu$ strain]       | 5,63             | 24,38               | 24,18                           | 16,56         | 11,57           | 20,75         | 16,56           |
| 13                        | $\varepsilon_{x3}$ góra góra [ $\mu$ strain] | 5,63             | 24,38               | 24,17                           | 16,56         | 11,57           | 20,75         | 16,56           |
| 22                        | $\varepsilon_{x3}$ góra dół [ $\mu$ strain]  | 22,15            | 86,55               | 85,68                           | 66,72         | 50,30           | 78,21         | 66,72           |
| 22                        | $\varepsilon_{x3}$ dół góra [ $\mu$ strain]  | 22,15            | -43,14              | -42,25                          | -21,82        | -5,62           | -33,71        | -21,82          |
| 31                        | $\varepsilon_{x3}$ dół dół [ $\mu$ strain]   | 48,70            | 33,22               | 33,36                           | 42,12         | 46,05           | 37,84         | 42,12           |
| 31                        | KŁSM góra [ $\mu$ strain]                    | 48,56            | 33,04               | 33,18                           | 41,95         | 45,89           | 37,67         | 41,95           |
| 51                        | KŁSM dół [ $\mu$ strain]                     | 54,29            | 78,97               | 78,68                           | 71,84         | 64,53           | 76,59         | 71,84           |
| 51                        | Podłoże góra [ $\mu$ strain]                 | 54,34            | 79,05               | 78,76                           | 71,89         | 64,58           | 76,66         | 71,89           |



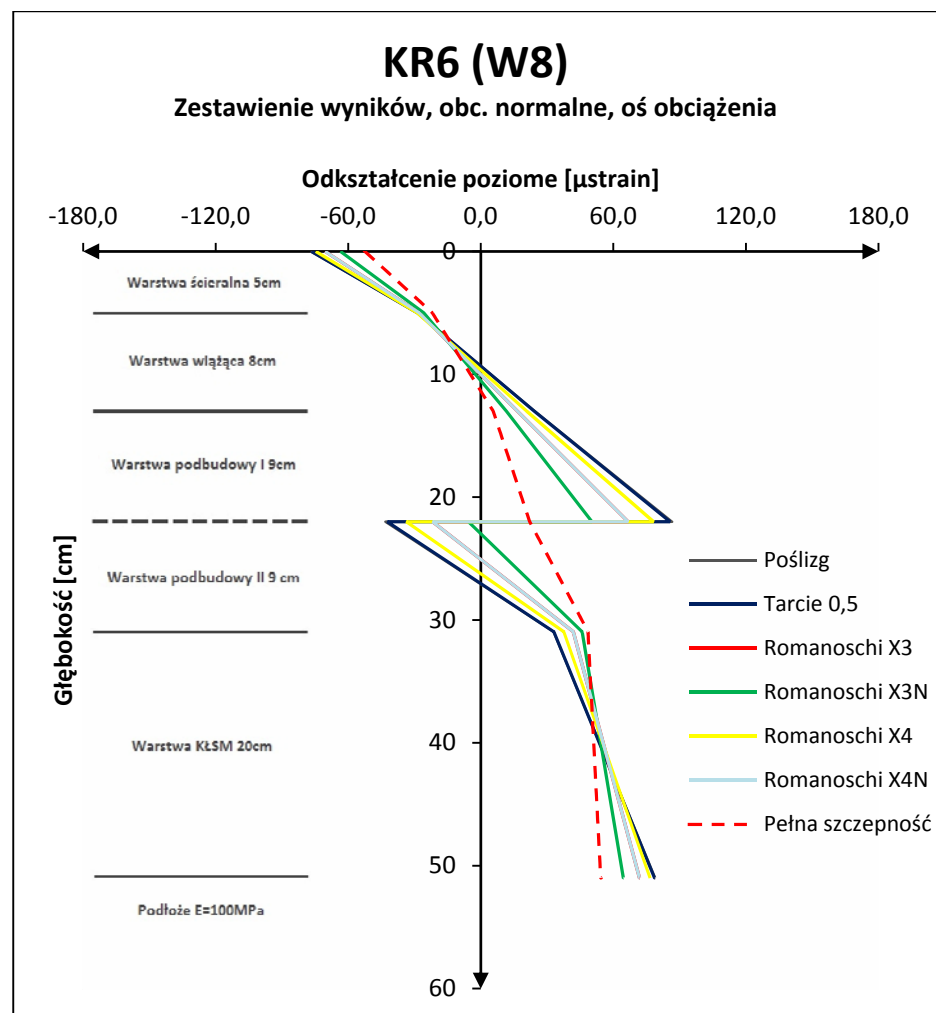
Rys. 3.51. Zestawienie naprężeń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i podbudowy)



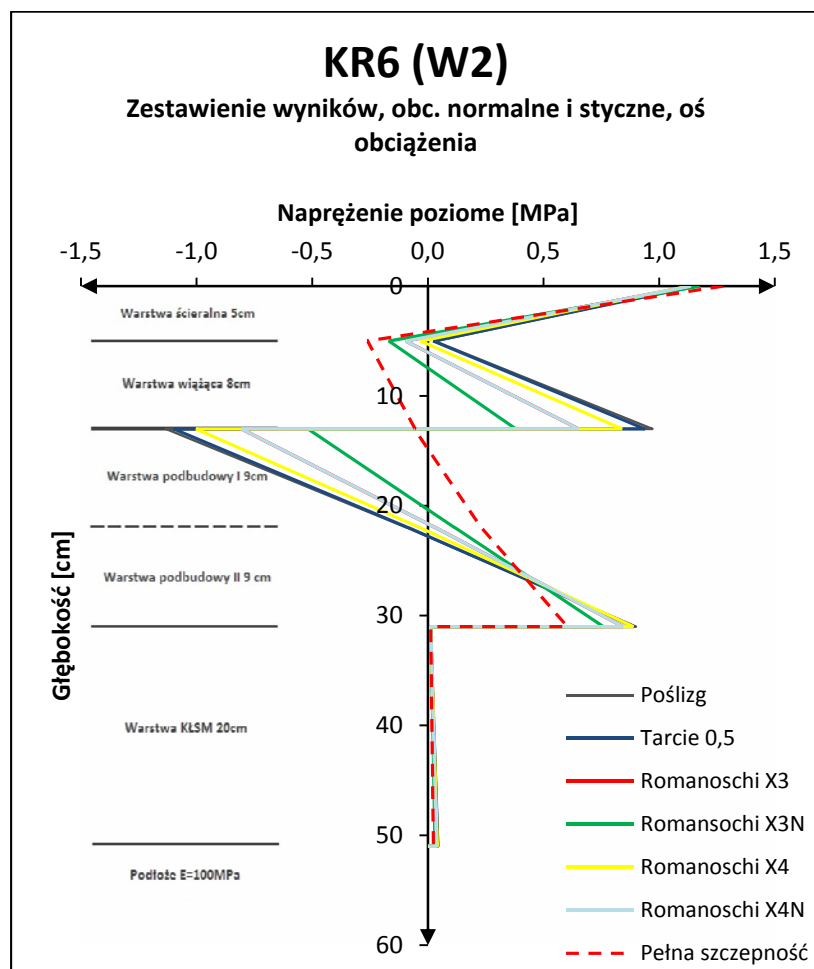
Rys. 3.52. Zestawienie naprężeń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W8 (wariant 8 – brak szczepności pomiędzy warstwą podbudowy i podbudowy asfaltowej)



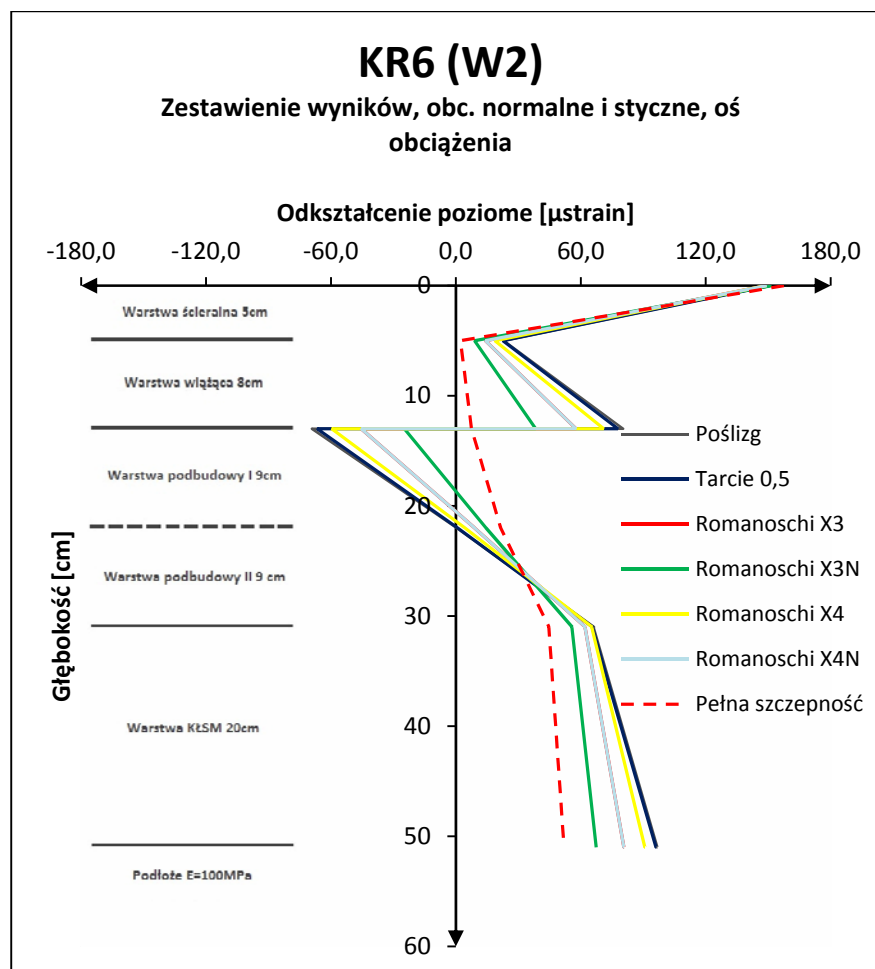
Rys. 3.53. Zestawienie odkształceń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i podbudowy)



Rys. 3.54. Zestawienie odkształceń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W8 (wariant 8 – brak szczepności pomiędzy warstwą podbudowy i podbudowy asfaltowej)



Rys. 3.55. Zestawienie naprężeń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i podbudowy) od obciążeń pionowych i poziomych



Rys. 3.56. Zestawienie odkształceń poziomych w poszczególnych warstwach nawierzchni KR6W2 (wariant 2 – brak szczepności pomiędzy warstwą wiążącą i podbudowy) od obciążeń pionowych i poziomych

## **4. KALIBRACJA MODELU OBLICZENIOWEGO Z PARAMETRAMI MIERZONYMI W TERENIE**

### **4.1. Wprowadzenie**

W ramach przeprowadzonej na zlecenie GDDKiA pracy badawczej z 2006 r. [6] wykonano odcinek doświadczalny, gdzie w warunkach rzeczywistych symulowano różne poziomy szczepności międzywarstwowej w warstwach asfaltowych przebudowywanej drogi. Następnie przeprowadzono pomiary szczepności międzywarstwowej i jej wpływu na zachowanie się konstrukcji nawierzchni poprzez pomiary ugięć nawierzchni.

Dla symulacji różnej szczepności międzywarstwowej w terenie, a właściwie dla wyznaczenia wpływu różnej szczepności na zachowanie się konstrukcji przygotowano kilka rodzajów warstw szepnych. Wykonano warstwy, które stosowane są standardowo w wykonawstwie, zachowując panujące reżimy wykonawcze oraz stosując różne ilości skropienia międzywarstwowego. Przygotowano też sekcję, gdzie na dwóch z nich nie wykonano standardowego skropienia międzywarstwowego, a na innych zakłócono (celowo ograniczono) szczepność międzywarstwową.

Uzyskane wyniki ugięć, a nawet czas ugięć nawierzchni odcinka doświadczalnego pomierzone urządzeniem FWD porównywano z ugięciami (czasami ugięć) uzyskanymi z obliczeń mechanistycznych modelu konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego przy zastosowaniu metody elementów skończonych MES. Porównywanie wyników ugięć ma szczególne znaczenie przy konstrukcjach nawierzchni z osłabioną lub brakiem szczepności międzywarstwowej, co można lepiej symulować i kontrolować w metodzie MES niż przy zastosowaniu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Właśnie na odcinku doświadczalnym stworzono sekcje konstrukcji nawierzchni, gdzie kontrolowano szczepność międzywarstwową na poziomie warstwy wiążącej i podbudowy. Uzyskane zgodności z porównania czas ugięć pozwolą na wypracowanie właściwego modelu nawierzchni w metodzie MES, a przy jego pomocy precyzyjniej prognozować zachowanie się konstrukcji nawierzchni z osłabioną szczepnością międzywarstwową warstw asfaltowych.

### **4.2. Odcinek doświadczalny**

Odcinek doświadczalny zlokalizowano w ciągu przebudowywanej drogi lokalnej w Pszczółkach, łączącej kopalnię odkrywkową kruszyw naturalnych z drogą gminną krzyżującą się z drogą krajową DK 1. Całkowita długość drogi wynosiła 1350 m, natomiast długość odcinka doświadczalnego do badań szczepności 140 m.



Szerokość jezdni wynosiła 7 m. Przebudowa polegała na przygotowaniu podłoża poprzez wyprofilowanie i wbudowanie warstwy wyrównawczej z destruktu betonowego i ceglanego o grubości od 0 do 35 cm. Na tak przygotowane podłoże wbudowano 3 warstwy z betonu asfaltowego: 12 cm warstwy podbudowy BA 0/25, 8 cm warstwy wiążącej BA 0/20 i 6 cm warstwy ścieralnej BA 0/16.

Przy wykonywaniu skropienia międzywarstwowego, jako warstwę szepną zastosowano emulsję zwykłą szybko rozpadową K1-65, produkowaną na bazie asfaltu 160/220.

Dla uzyskania efektu całkowitego braku szepności międzywarstwowej wykonano warstwę, która gwarantowała poślizg międzywarstwowi. Osiągnięto to dzięki wprowadzeniu niezwiązanej, niezagęszczonej cienkiej warstwy:

- z pyłów mineralnych, pochodzących z systemu odpylania wytwórni mieszanek bitumicznych (WMB) oraz
- alternatywnie z zaczynu gliniastego.

#### **4.2.1. Warstwy szepne**

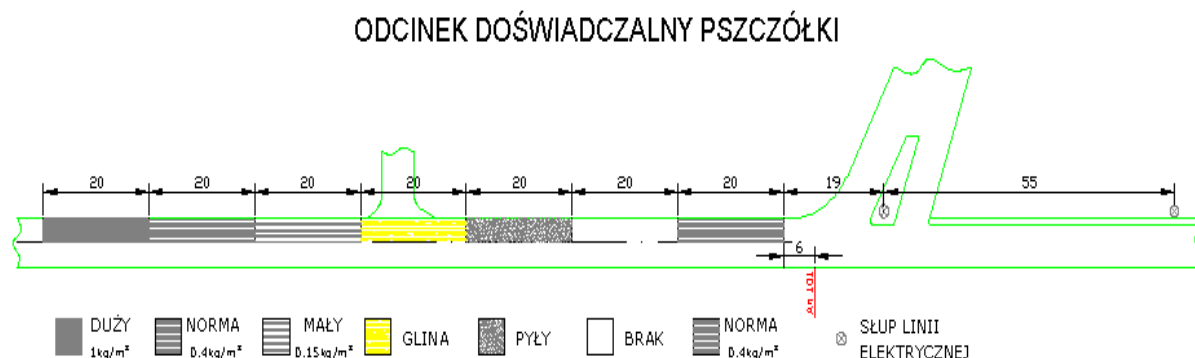
Na odcinku doświadczalnym wykonano następujące warianty połączenia warstwy podbudowy asfaltowej z warstwą wiążącą z betonu asfaltowego:

1. skropienie emulsją zwykłą szybko rozpadową K1, w ilości skropienia 0,4 kg/m<sup>2</sup>,
2. brak skropienia emulsją,
3. warstwa posypki suchymi pyłami z instalacji odpylania wytwórni mieszanek bitumicznych (WMB), w ilości około 1,4 kg/m<sup>2</sup> (grubość od 3 do 5 mm),
4. warstwa półpłynnego zaczynu gliniastego (zawiesina gliny w wodzie), w ilości około 0,7 kg/m<sup>2</sup> (grubość około 3 mm),
5. skropienie emulsją zwykłą szybko rozpadową K1, ale w zmniejszonej ilości skropienia 0,15 kg/m<sup>2</sup>,
6. skropienie emulsją zwykłą szybko rozpadową K1, powtórnie w ilości 0,4 kg/m<sup>2</sup>,
7. skropienie emulsją zwykłą szybko rozpadową K1, ale w zwyżonej ilości skropienia 0,9 kg/m<sup>2</sup>.

Do wykonania skropienia międzywarstwowego zastosowano automatyczną skropiarkę z możliwością dokładnej regulacji ilości aplikowanej emulsji. Skropienie z emulsji wykonywano bezpośrednio przed wjazdem rozkładarki mieszanek mineralno-asfaltowych. Emulsja asfaltowa nie zdążyła ulec całkowitemu rozpadowi.

Pyły i zaczyn gliniasty został rozprowadzony ręcznie na warstwie podbudowy z betonu asfaltowego przy pomocy rakli gumowych, także bezpośrednio przed wbudowaniem warstwy wiążącej.

Rozmieszczenie poszczególnych sekcji o różnych warstwach szepnych pomiędzy warstwą podbudowy bitumicznej, a warstwą wiążącą przedstawiono na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1. Szkic podziału odcinka doświadczalnego na sekcje z różnym rodzajem warstwy szepnej pomiędzy warstwą podbudowy a warstwą wiążącą.

#### 4.2.2. Badania szepności międzywarstwowej próbek wyciętych z nawierzchni odcinka doświadczalnego wg metody Leutnera

Po okresie prawie dwóch miesięcy od oddania nawierzchni odcinka doświadczalnego do eksploatacji wykonano po 2 odwierty o średnicy 150 mm na każdej z 7 sekcji. W Laboratorium Drogowym Politechniki Gdańskiej odwiercone próbki poddano badaniu szepności międzywarstwowej pomiędzy warstwą podbudowy i warstwy wiążącej wg metody Leutnera. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy 4.1.

Tablica 4.1. Wyniki badań szepności wg Leutnera pomiędzy warstwą wiążącą a podbudową. Próbki odwiercone z nawierzchni odcinka doświadczalnego. Temperatura badania 20°C.

| Nr próbki | Rodzaj skropienia                | Średnica [mm] | Siła ścinająca [kN] | Średnia siła ścinająca [kN]         | Droga ścicia [mm] | Średnia droga ścinająca [mm] | Naprężenie ścinające [MPa] | Średnie naprężenie ścinające [MPa] | Sztywność ścinania [kN/mm] | Średnia sztywność ścinania [kN/mm] |
|-----------|----------------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1/1       | normalny                         | 150           | 12,6                | 15,0                                | 2,0               | 2,1                          | 0,71                       | 0,8                                | 6,3                        | 7,0                                |
| 1/2       | (0,4 kg/m <sup>2</sup> )         | 150           | 17,4                |                                     | 2,3               |                              | 0,98                       |                                    | 7,7                        |                                    |
| 2/1       | brak                             | 150           | 21,8                | 23,3                                | 2,8               | 3,1                          | 1,23                       | 1,3                                | 7,9                        | 7,5                                |
| 2/2       |                                  | 150           | 24,8                |                                     | 3,5               |                              | 1,40                       |                                    | 7,1                        |                                    |
| 3         | pyły                             | 150           | 0                   | brak szepności już podczas odwiertu |                   |                              |                            |                                    |                            |                                    |
| 4         | glina                            | 150           | 0                   |                                     |                   |                              |                            |                                    |                            |                                    |
| 5/1       | mały                             | 150           | 13,1                | 12,1                                | 2,0               | 2,0                          | 0,74                       | 0,7                                | 6,6                        | 6,0                                |
| 5/2       | (0,15 kg/m <sup>2</sup> )        | 150           | 11                  |                                     | 2,0               |                              | 0,62                       |                                    | 5,5                        |                                    |
| 6/1       | normalny                         | 150           | 11,1                | 10,7                                | 1,9               | 1,8                          | 0,63                       | 0,6                                | 5,9                        | 5,9                                |
| 6/2       | (0,4 kg/m <sup>2</sup> )         | 150           | 10,2                |                                     | 1,8               |                              | 0,58                       |                                    | 5,8                        |                                    |
| 7/1       | duży<br>(0,9 kg/m <sup>2</sup> ) | 150           | 9,2                 | 10,9                                | 1,5               | 2,1                          | 0,52                       | 0,6                                | 6,1                        | 5,5                                |
| 7/2       |                                  | 150           | 11,4                |                                     | 1,8               |                              | 0,65                       |                                    | 6,5                        |                                    |
| 7/3       |                                  | 150           | 12,1                |                                     | 3,0               |                              | 0,68                       |                                    | 4,0                        |                                    |

Największą szepność międzywarstwową osiągnięto w sekcji braku jakiegokolwiek skropienia. Miękki asfalt (160/220) z emulsji w warstwie szepnej powodował osłabienia szepności, podczas gdy twardszy asfalt (35/50) zastosowany w mieszankach warstwy wiążącej i podbudowy, występujący jako otoczka na stykających się ziarnach powodował silne sklejenie warstw.

### **4.3. Badanie ugięć urządzeniem FWD**

Na odcinku doświadczalnym wykonano badania nośności ugięciomierzem dynamicznym FWD. Pomiarów wykonano w odległości 1 m od krawędzi jezdni, co 2 m w kierunku podłużnym. Na każdej sekcji o długości 20 m wykonano po 10 pomiarów. Temperatura powietrza wynosiła 17°C, a temperatura nawierzchni 14°C.

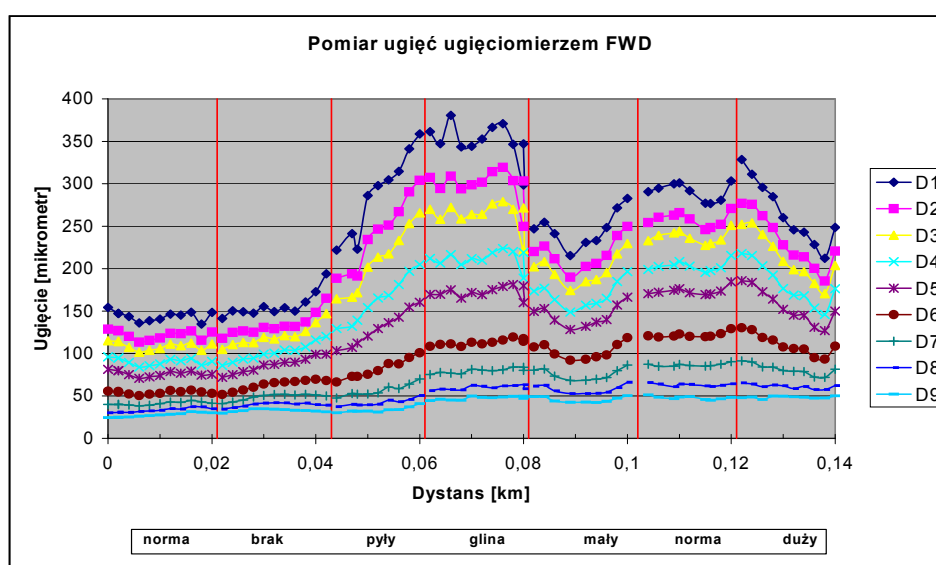
Nawierzchnię obciążano płytą o średnicy 30 cm, wywołując nacisk 800 kPa. Ugięcia rejestrowało 9 geofonów rozmieszczonych w następujących odległościach od środka płyty obciążającej: D1 – 0 mm, D2 – 210 mm, D3 – 300 mm, D4 – 455 mm, D5 – 600 mm, D6 – 900 mm, D7 – 1200 mm, D8 – 1500 mm, D9 – 1800 mm.

#### **4.3.1. Wyniki badań FWD**

Ugięcia nawierzchni (patrz rys. 4.2) mierzone bezpośrednio pod płytą i oznaczone krzywą D1, pokazują gwałtowny wzrost ugięć po przejściu na sekcje III i IV. Na tych sekcjach pomiędzy warstwą podbudowy, a warstwą wiążącą zamiast skropienia międzywarstwowego z emulsji asfaltowej zastosowano warstwę z pyłów (s. III) i warstwę zaczynu gliniastego (s. IV). Jednocześnie można zaobserwować wzrost ugięć od sekcji IV, mierzonych także przez ostatni geofon D9, odpowiadający za stan podłoża gruntowego. Oznacza to, że podłoże pod warstwami asfaltowymi ze względu na różną grubość warstwy profilowej z gruzu betonowego i ceglanego nie jest jednorodne i charakteryzuje się zmienną nośnością na długości odcinka doświadczalnego. Pomierzone na podstawie odwiertów grubości pakietu warstw asfaltowych wynoszą odpowiednio na poszczególnych 7 sekcjach: 215, 210, 210, 205, 200, 205 i 205 mm. Dokładne wyniki grubości warstw asfaltowych podano w tablicy 4.2.

Tablica 4.2. Zestawienie grubości warstw asfaltowych pomierzonych z odwiertów

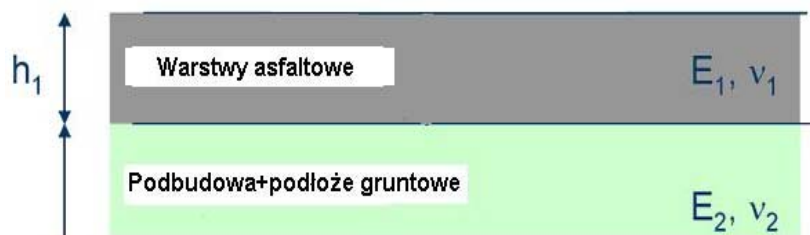
| Sekcja | Grubość warstw asfaltowych [mm] |         |           |            |
|--------|---------------------------------|---------|-----------|------------|
|        | Ścieralna                       | Wiążąca | Podbudowa | Sumaryczna |
| I      | 70                              | 60      | 85        | 215        |
| II     | 65                              | 55      | 90        | 210        |
| III    | 65                              | 55      | 90        | 210        |
| IV     | 65                              | 60      | 80        | 205        |
| V      | 60                              | 60      | 80        | 200        |
| VI     | 60                              | 60      | 85        | 205        |
| VII    | 65                              | 60      | 80        | 205        |



Rysunek 4.2. Wyniki ugięć z wszystkich geofonów

#### 4.3.2. Obliczenia odwrotne

Moduły sprężystości, istniejących warstw asfaltowych, podbudowy i podłoża gruntowego (razem), określono metodą obliczeń odwrotnych przy pomocy programu ELMOD 5 na podstawie analizy wyników ugięć sprężystych zmierzonych urządzeniem FWD oraz grubości poszczególnych warstw istniejącej konstrukcji nawierzchni (określonych w odwiertach). Jako model konstrukcji nawierzchni w obliczeniach odwrotnych przyjęto 2-warstwową półprzestrzeń sprężystą, (patrz rys.4.3). Założono pełną szczepność międzywarstwową pomiędzy warstwami podbudowy i asfaltowymi, jak i w samym pakiecie warstw asfaltowych.



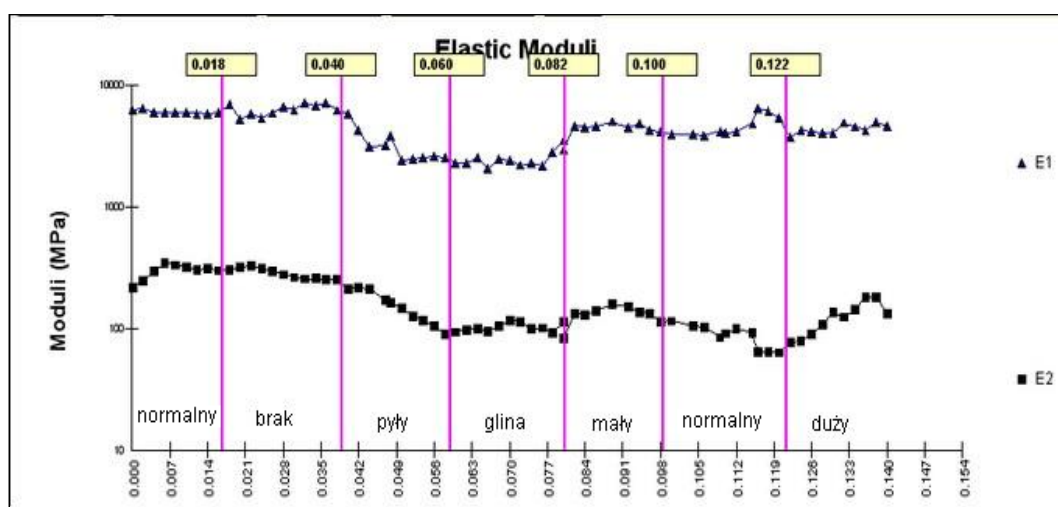
Rysunek 4.3. Model nawierzchni przyjęty do obliczeń odwrotnych

Wyniki obliczeń odwrotnych wskazują na niejednorodność podłoża (patrz tab.4.2). Wynika to z wpływu zmiennej grubości warstwy profilowej z gruzu betonowego i ceglanego, czego nie udało się uniknąć na tym odcinku.

Otrzymano także różną sztywność pakietu warstw asfaltowych na długości relatywnie krótkiego odcinka doświadczalnego. Jest to wynik odmiennego założenia szczepności w obliczeniach odwrotnych w stosunku do warunków rzeczywistych występujących pomiędzy podbudową bitumiczną, a warstwą wiążącą. W obliczeniach odwrotnych założono pełną szczepność międzywarstwową w pakiecie warstw asfaltowych, sprowadzając rzeczywiste 3 warstwy asfaltowe (podbudowa bitumiczna, warstwa wiążąca, warstwa ścieralna) – wbudowywane oddzielnie i przy różnym związaniu międzywarstwowym – do jednej warstwy. Na sekcji III i IV celowo ograniczono (zmniejszono) szczepność międzywarstwową niemal do całkowitego braku przez wprowadzenie luźnej warstwy z pyłów mineralnych i zaczynu gliniastego.

Dla każdej z sekcji o różnych poziomach szczepności przeprowadzono analizę modułów, mając do dyspozycji na sekcję 10 modułów (patrz rys. 4.4):

- E1 – moduł sztywności warstw asfaltowych,
- E2 – moduł sprężystości dla podbudowy i podłoża razem.



Rysunek 4.4. Obliczone wartości modułów z programu ELMOD 5

W czasie wykonywania badań urządzeniem FWD temperatura warstw asfaltowych wynosiła 14°C. Moduły obliczeniowe dla każdej sekcji wyznaczono wg zaleceń COST 336 stosując 85% kwantyl, tzn przy obliczaniu modułów odrzucono 15% najmniejszych wartości. W tablicy 4.2 przedstawiono wyniki analizy modułów dla kwantyla 85%, po zaokrągleniu do pełnej wartości.

Tablica 4.2. Obliczone moduły warstw asfaltowych i podbudowy razem z podłożem gruntowym

| Nr sekcji   | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Moduł sztywności warstwa asfaltowych, 14°C [MPa]                | 8600 | 8200 | 3800 | 3800 | 7700 | 7000 | 7200 |
| Moduł sprężystości podbudowy i podłoża gruntowego (razem) [MPa] | 260  | 250  | 90   | 90   | 115  | 80   | 80   |

Uzyskane wyniki modułów sprężystości z obliczeń odwrotnych, pomierzone grubości warstw konstrukcji oraz parametry obciążenia urządzenia FWD zastosowano w obliczeniach mechanistycznych przy użyciu modelu MES i wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej (punkt 4.6).

#### 4.4. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego do programu Abaqus

W analizach obliczeniowych wykorzystano pomiary na dwóch sekcjach odcinka doświadczalnego: na sekcji I, gdzie była pełna szczepność oraz sekcję III, gdzie była zakłócona szczepność pomiędzy warstwą podbudowy i warstwą wiążącą. Do analizy przyjęto 2 modele układu nawierzchni, których przekroje przedstawiono na Rys. 3.11 W trójwymiarowym modelu MES wykorzystano podwójną symetrię zadania. Przyjęty schemat obliczeniowy MES przedstawia Rys. 3.12 z odpowiednio zmienionymi parametrami dla modelu sekcji I i sekcji III.

Do symulacji dopasowania czasz ugięć nawierzchni odcinka doświadczalnego sekcji I i sekcji III otrzymanych z pomiarów w terenie za pomocą urządzenia FWD oraz uzyskanych z obliczeń modelu nawierzchni metodą MES w programie Abaqus, jak i wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej w programie Bisar zastosowano stałe materiałowe i parametry obciążenia zestawione w tablicach 4.3, 4.4 i rys. 4.5, 4.6, 4.7.

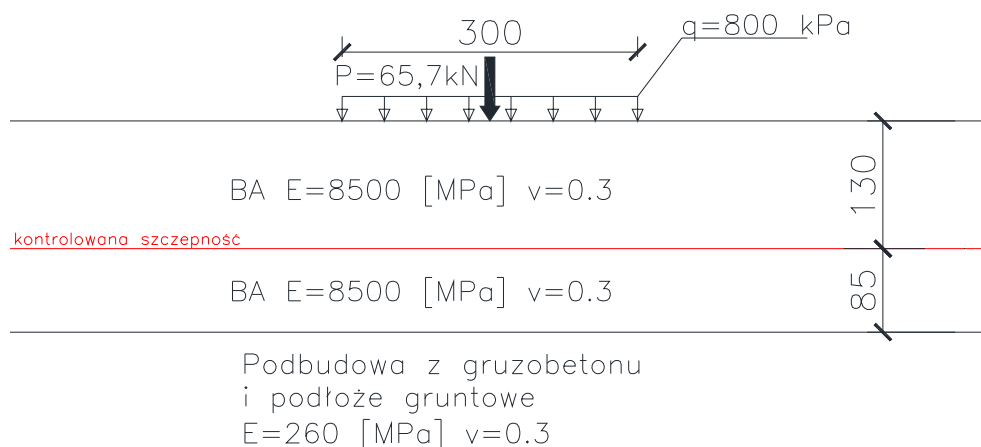
Tablica 4.3. Parametry obciążenia przyjęte do analiz obliczeniowych

| Lp. | Cecha                      | Sekcja I | Sekcja III |
|-----|----------------------------|----------|------------|
| 1.  | Średnica obciążenia [m]    | 0,3      | 0,3        |
| 2.  | Nacisk [kPa]               | 56,7     | 56,7       |
| 3.  | Ciśnienie kontaktowe [kPa] | 800      | 800        |

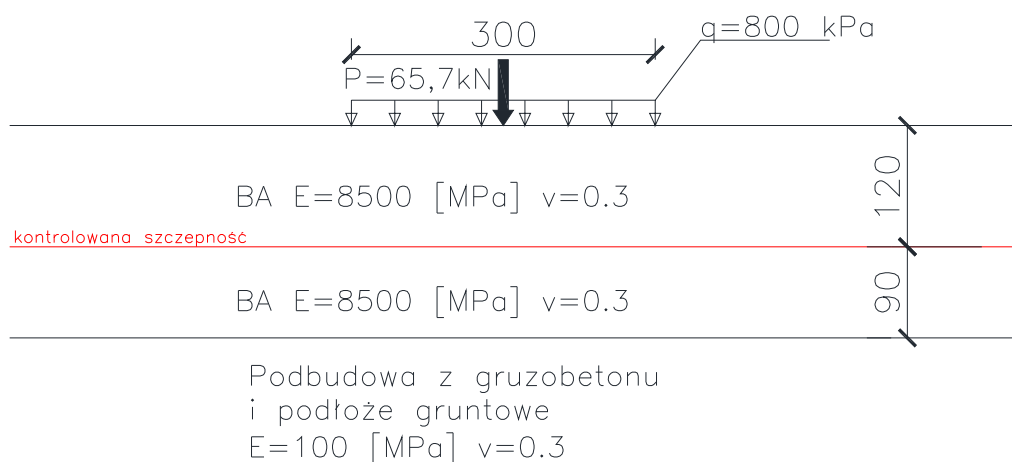
Tablica 4.4. Stałe materiałowe przyjęte do analiz obliczeniowych

| Lp. | Rodzaj warstwy konstrukcji nawierzchni                       | Sekcja I |         |           | Sekcja III |         |           |
|-----|--|----------|---------|-----------|------------|---------|-----------|
|     |  | H [cm]   | E [MPa] | $\nu$ [-] | H [cm]     | E [MPa] | $\nu$ [-] |
| 1.  | Warstwa ścieralna i wiążąca (razem)                          | 13,0     | 8500    | 0,3       | 12,0       | 8500    | 0,3       |
| 2.  | Warstwa podbudowy asfaltowej                                 | 8,5      | 8500    | 0,3       | 9,0        | 8500    | 0,3       |
| 3.  | Warstwa podbudowy z gruzobetonu i podłoża gruntowego (razem) | 400*     | 260     | 0,3       | 400*       | 100     | 0,3       |

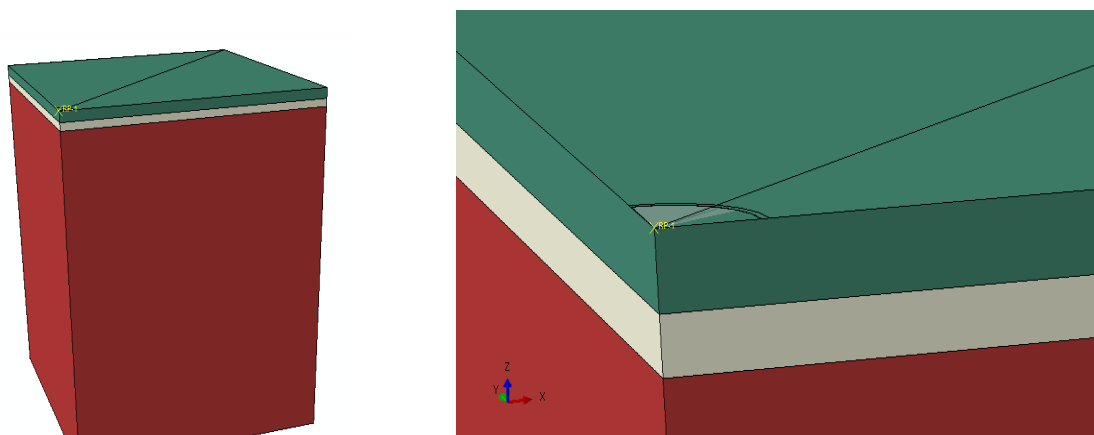
\* - wielkość wykorzystana tylko w modelu MES



Rys. 7. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni sekcji I odcinka doświadczalnego (grubości warstw podano w [mm])



Rys. 4.6. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni sekcji III odcinka doświadczalnego (grubości warstw podano w [mm])



Rys. 8. Model MES konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego

Ostatecznie do dyskretyzacji przyjęto siatkę zbudowaną z 116570 węzłów. Wykorzystano 105602 elementów C3D8I dla modelu nawierzchni oraz 345 czterowęzłowych sztywnych elementów R3D4, którymi modelowano płytę. Tak przygotowaną siatkę wykorzystywano we wszystkich dalszych symulacjach.

Przeprowadzono walidację modelu MES pod kątem doboru gęstości siatki podziału i miąższości warstwy podłoża. Wykorzystując funkcję „tie” łączenia płaszczyzn pomiędzy kolejnymi warstwami nawierzchni przeprowadzono analizę numeryczną symulując pełną szczepność między warstwami modelu. Obliczenia przeprowadzono jako geometrycznie liniowe wykorzystując metodę rozwiązania „linear perturbation, static”. Przy taki założeniu program Abaqus zapisuje do pliku

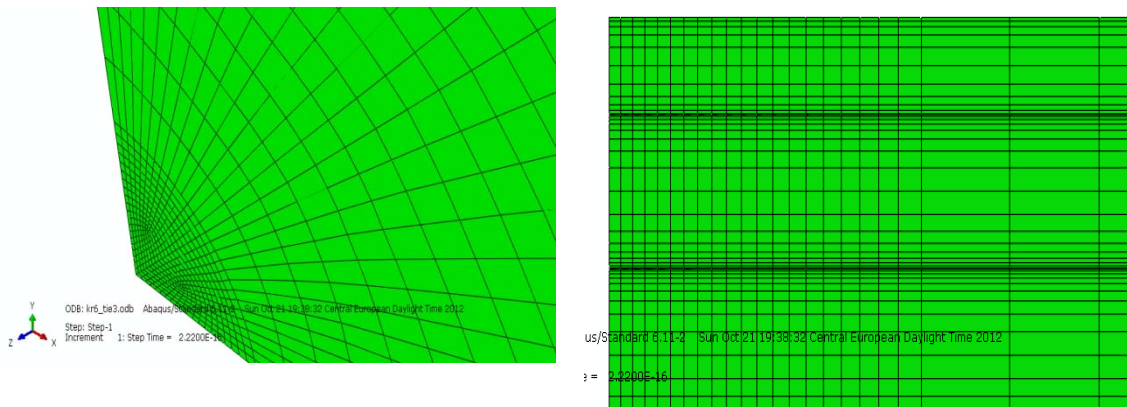


wartości tensora małych odkształceń, E. Otrzymywane wyniki porównywano z rozwiązaniami uzyskanymi z programu, wykorzystującego model półprzestrzeni sprężystej, Bisar z firmy Shell.

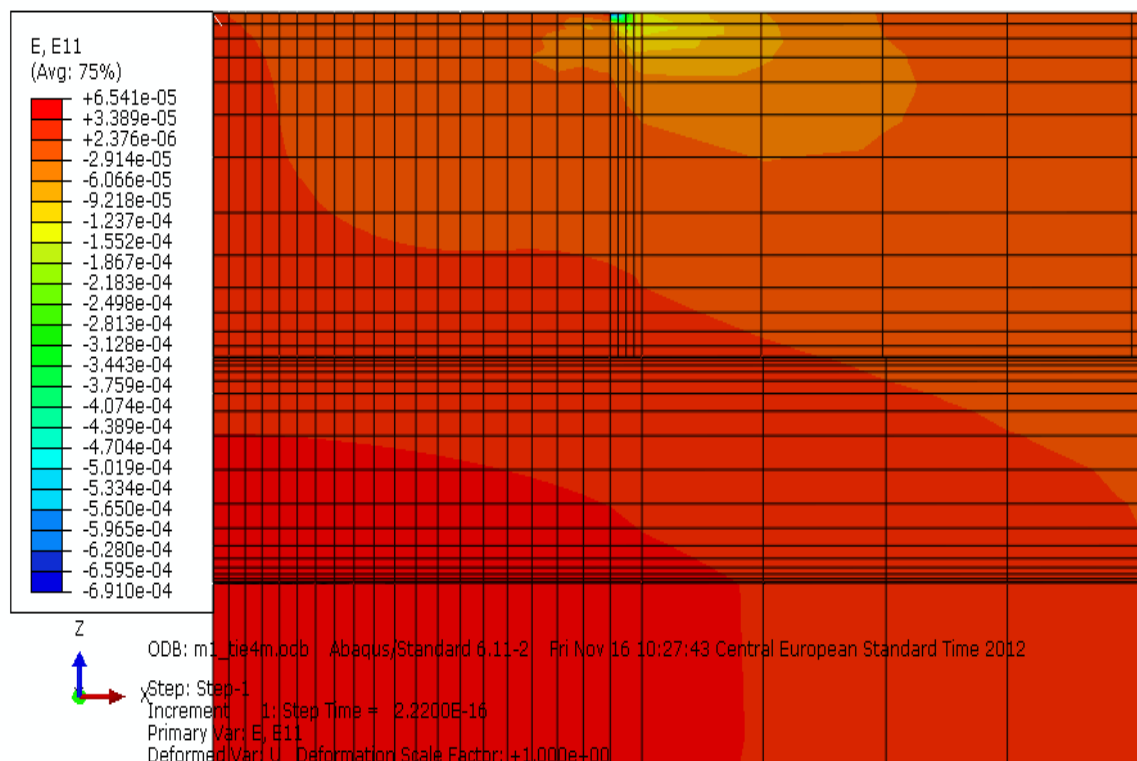
Szczegóły przyjętej dyskretyzacji przedstawia

Rys. 3.134.8, a wybrane wyniki przedstawiono na rys. 4.9 i na

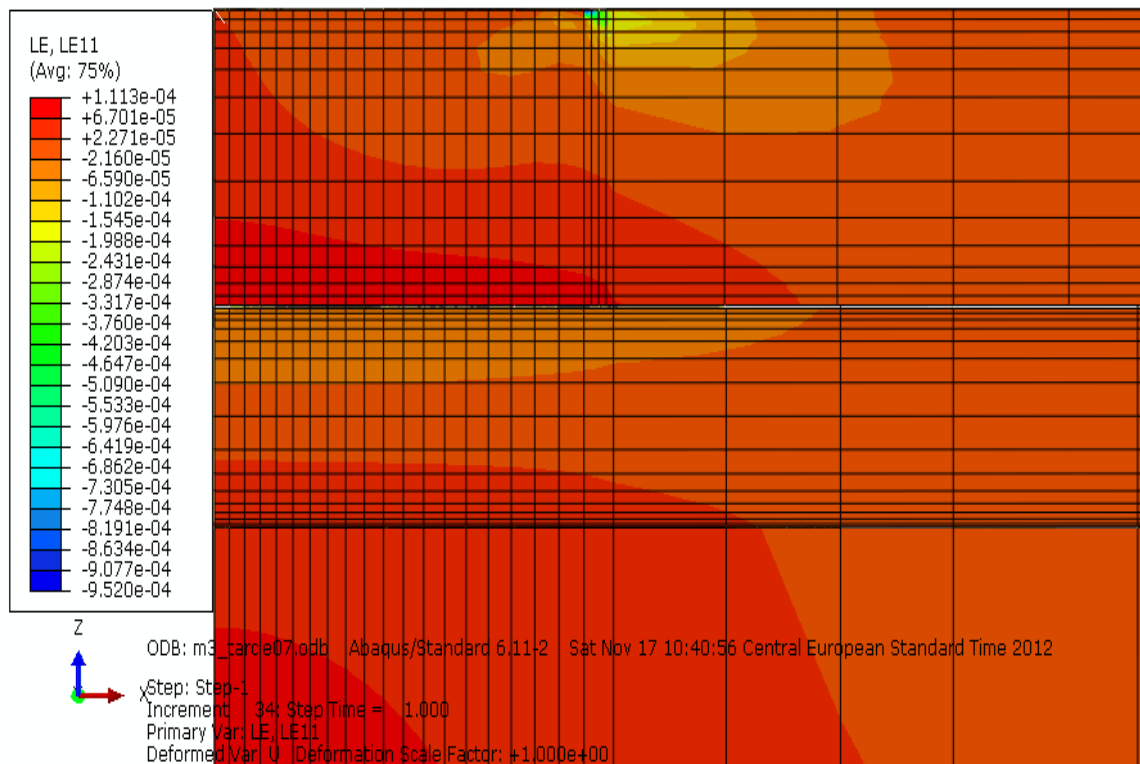
Rys. 3.15.



Rys. 98. Model MES konstrukcji nawierzchni KR6, szczegóły siatki



Rys. 4.910. Model MES konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego, pełna szczepność, sekcja 1, odkształcenia E11 (odkształcenia poziome)



Rys. 4.10. Model MES konstrukcji nawierzchni odcinak doświadczalnego, sekcja 3, odkształcenia LE11 (odkształcenia poziome) przy zastosowaniu modelu kontaktu poprzez tarcie

#### 4.5. Wyniki ugięć nawierzchni obliczonych w MES oraz pomierzonych w terenie na odcinku doświadczalnym

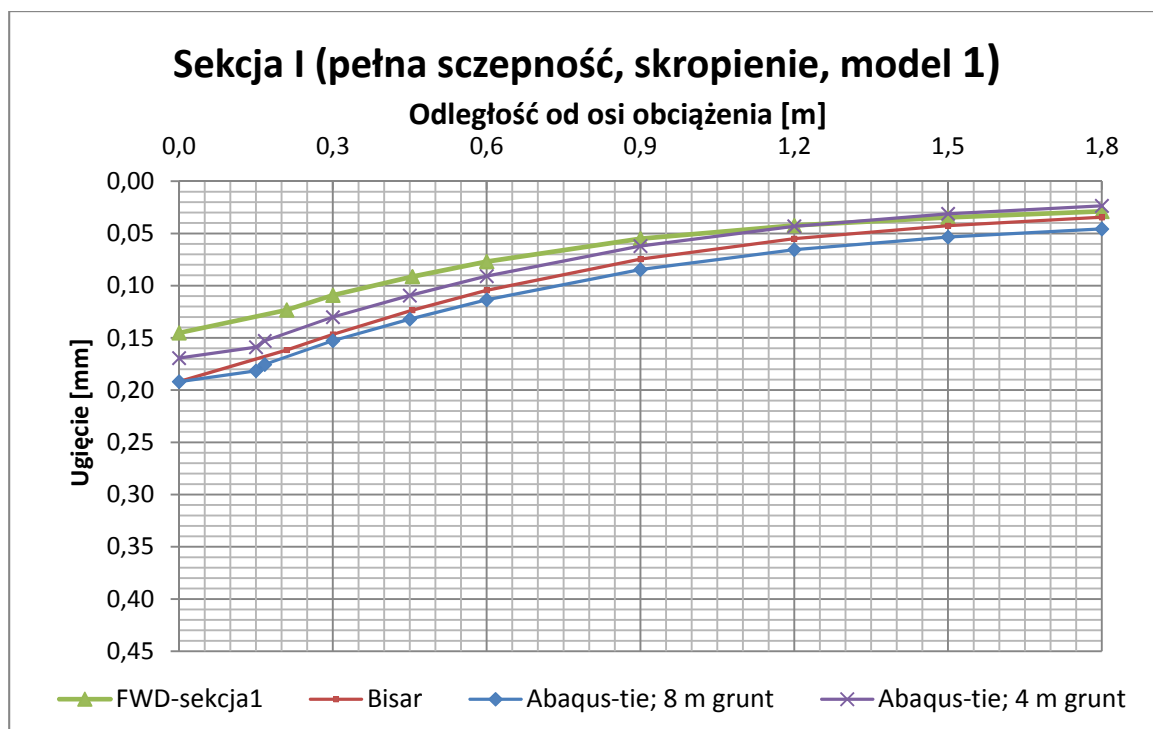
W tablicach 4.5 i 4.6 oraz na rys. 4.11 i 4.12 zestawiono wyniki ugięć (czas ugięć) nawierzchni odcinka doświadczalnego na sekcji I i sekcji III, pomierzonych w terenie i obliczonych metodami mechanistycznymi w Abaqusie i Bisarze.

Tablica 4.11. Zestawienie ugięć nawierzchni odcinka doświadczalnego - sekcja I, obliczonych w Abaqus i Bisar oraz pomierzonych w terenie urządzeniem FWD

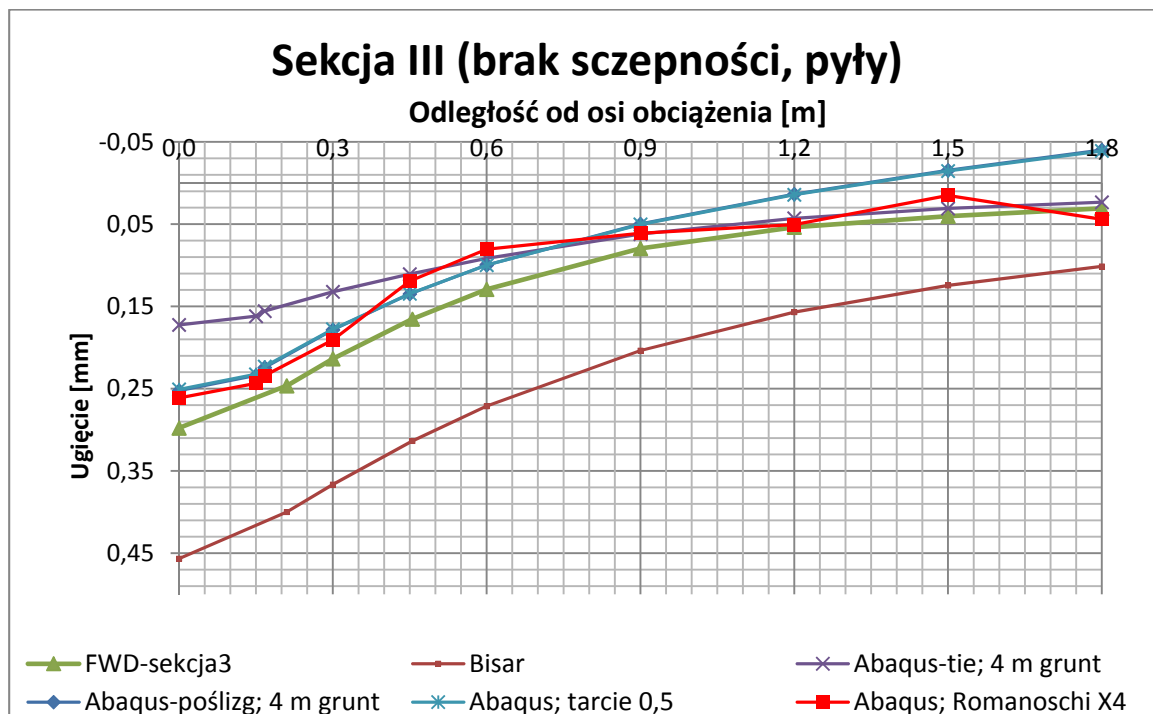
| Odległość od osi obciążenia [m] | Ugięcia [mm]               |                            |                                |                                |                                 |                            |       |       |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------|-------|
|                                 | Abaqus sczepność 4 m grunt | Abaqus sczepność 8 m grunt | Abaqus tarcie 0,7 z odrywaniem | Abaqus tarcie 1,5 z odrywaniem | Abaqus tarcie 0,7 bez odrywania | Romanoschi, X4 7,5 m grunt | Bisar | FWD   |
| 0                               | 0,169                      | 0,192                      | 0,265                          | 0,263                          | 0,264                           | 0,254                      | 0,192 | 0,145 |
| 0,15                            | 0,159                      | 0,182                      | 0,248                          | 0,247                          | 0,247                           | 0,237                      |       |       |
| 0,167                           | 0,153                      | 0,175                      | 0,239                          | 0,238                          | 0,238                           | 0,228                      |       |       |
| 0,21                            |                            |                            |                                |                                |                                 |                            | 0,162 | 0,123 |
| 0,3                             | 0,130                      | 0,153                      | 0,197                          | 0,196                          | 0,196                           | 0,188                      | 0,147 | 0,109 |
| 0,45                            | 0,109                      | 0,132                      | 0,157                          | 0,156                          | 0,156                           | 0,150                      | 0,123 | 0,091 |
| 0,6                             | 0,091                      | 0,113                      | 0,123                          | 0,123                          | 0,124                           | 0,119                      | 0,105 | 0,077 |
| 0,9                             | 0,062                      | 0,085                      | 0,075                          | 0,076                          | 0,083                           | 0,081                      | 0,075 | 0,055 |
| 1,2                             | 0,043                      | 0,066                      | 0,041                          | 0,042                          | 0,062                           | 0,061                      | 0,055 | 0,042 |
| 1,5                             | 0,031                      | 0,053                      | 0,013                          | 0,014                          | 0,050                           | 0,051                      | 0,043 | 0,035 |
| 1,8                             | 0,024                      | 0,046                      | -0,010                         | -0,009                         | 0,044                           | 0,044                      | 0,034 | 0,029 |

Tablica 4.12. Zestawienie ugięć nawierzchni odcinka doświadczalnego - sekcja III, obliczonych w Abaqus i Bisar oraz pomierzonych w terenie urządzeniem FWD

| Odległość od osi obciążenia [m] | Ugięcia [mm]               |                          |                                |                                |                                |       |       |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
|                                 | Abaqus sczepność 4 m grunt | Abaqus poślizg 4 m grunt | Abaqus tarcie 0,5 z odrywaniem | Abaqus tarcie 0,7 z odrywaniem | Abaqus tarcie 1,5 z odrywaniem | Bisar | FWD   |
| 0                               | 0,172                      | 0,252                    | 0,251                          | 0,250                          | 0,248                          | 0,457 | 0,298 |
| 0,15                            | 0,162                      | 0,234                    | 0,233                          | 0,232                          | 0,230                          |       |       |
| 0,167                           | 0,156                      | 0,224                    | 0,223                          | 0,223                          | 0,221                          |       |       |
| 0,21                            |                            |                          |                                |                                |                                | 0,400 | 0,247 |
| 0,3                             | 0,132                      | 0,178                    | 0,178                          | 0,177                          | 0,176                          | 0,367 | 0,214 |
| 0,45                            | 0,111                      | 0,135                    | 0,135                          | 0,134                          | 0,134                          | 0,314 | 0,166 |
| 0,6                             | 0,092                      | 0,100                    | 0,100                          | 0,100                          | 0,100                          | 0,271 | 0,129 |
| 0,9                             | 0,062                      | 0,050                    | 0,050                          | 0,050                          | 0,051                          | 0,204 | 0,080 |
| 1,2                             | 0,043                      | 0,014                    | 0,014                          | 0,014                          | 0,016                          | 0,157 | 0,054 |
| 1,5                             | 0,031                      | -0,015                   | -0,015                         | -0,014                         | -0,013                         | 0,124 | 0,040 |
| 1,8                             | 0,023                      | -0,040                   | -0,039                         | -0,039                         | -0,037                         | 0,101 | 0,031 |



Rysunek 4.5. Zestawienie ugięć nawierzchni odcinka doświadczalnego sekcji I i modelu konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego zastosowanego w Abaqusie i Bisarze



Rysunek 4.6. Zestawienie ugięć nawierzchni odcinka doświadczalnego sekcji III i modelu konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego zastosowanego w Abaqusie i Bisarze

## Literatura

- [1] Ralston A., Rabinowitz P., *A first course in numerical analysis*. Dover Publications, Inc., 2001
- [2] Zienkiewicz O.C. Taylor R. L ., *The Finite Element Method*. Butterworth-Heinemann Oxford, England, 2002
- [3] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Too J.M., Reduced integration technique in general analysis of plates and shells. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **3**, 1971, p.275-290,
- [4] Pian T.H.H., Sumihara K., Rational approach for assumed stress finite elements. *Int. J. Num. Meth. Engng*, **20**, 1984, p.1685-1695
- [5] Taylor R.L., Beresford P.J., Wilson E.L., A non – conforming element for stress analysis. *Int. J. Num. Meth. Engng*, **10**, 1976, p. 1211-1219
- [6] Judycki J., Jaskuła P. i inni, Badania i ocena wpływu szczepności międzywarstwowej na trwałość konstrukcji nawierzchni asfaltowej, Niepublikowany raport z I i II etapu badań na zlecenie GDDKiA, Gdańsk 2005 i 2006.
- [7] COST 336 – Falling Weight Deflectometer, European Commission, Directorate General Transport, CROW 2000.
- [8] Judycki J., Porównanie kryteriów zmęczeniowych do projektowania podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych w aspekcie nowego polskiego katalogu typowych konstrukcji, *Drogownictwo* 1999, nr. 1 i 2.
- [9] Wriggers P.: *Computational contact mechanics*. Wiley, Chichester 2002
- [10] Romanoschi S.A. and Metcalf J.B., Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces, *Transportation Research Record* 1778, 2001, Paper No. 01-2080, p.132-139
- [11] Romanoschi S.A. and Metcalf J.B., Effects of Interface Condition and Horizontal Wheel Loads on the Life of Flexible Pavement Structures, *Transportation Research Record* 1778 \_ 123, 2001, Paper No. 01-2079, p. 123-131

## **Załącznik**

Wyniki obliczeń mechanistycznych z programu Abaqus

Tabela Z1. Zestawienie wyników dla KR6 (W2) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego i dla obciążenia normalnego i stycznego w osi obciążenia

| Obciążenie normalne, oś obciążenia                    |                    |                        |                             |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |  |  |                  |                       |                  |                       |
|---|--------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| KR6 (W2)  | pełna<br>sczepność | poślizg<br>(odrywanie) | poślizg (brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,3$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=3,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=5,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ;<br>brak<br>odrywania) | tarcie ( $\mu=0,7$ ;<br>brak<br>odrywania) | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3<br>N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4<br>N |
| Odkształcenie BA2<br>$\epsilon_2$ dół [ $\mu$ strain] | 5,6                | 85,6                   | 85,6                        | 84,1                                  | 83,1                                  | 82,2                                  | 80,8                                  | 78,5                                  | 76,4                                  | 74,4                                  | 72,5                                  | 65,6                                  | 83,1                                       | 82,1                                       | 63,0             | 43,0                  | 76,4             | 63,0                  |
| Odkształcenie BA3<br>$\epsilon_3$ dół [ $\mu$ strain] | 48,7               | 74,3                   | 74,2                        | 73,8                                  | 73,5                                  | 73,3                                  | 72,8                                  | 72,2                                  | 71,5                                  | 70,9                                  | 70,3                                  | 68,2                                  | 73,5                                       | 73,2                                       | 69,6             | 62,5                  | 73,2             | 69,6                  |
| Napężenie<br>ścinające $\tau_{2xy}$ dół<br>[MPa]      | -1,696E-05         | 3,628E-05              | 3,629E-05                   | 2,943E-05                             | 2,503E-05                             | 2,077E-05                             | 1,461E-05                             | 4,962E-06                             | -3,995E-06                            | -1,232E-05                            | -2,005E-05                            | -4,606E-05                            | 2,505E-05                                  | 2,079E-05                                  | 1,165E-04        | 2,392E-04             | -                | 1,165E-04             |
| Trwałość BA2 [osi]                                    | 30 195 688<br>462  | 3 884 341              | 3 891 438                   | 4 118 010                             | 4 279 547                             | 4 445 803                             | 4 704 226                             | 5 159 812                             | 5 647 783                             | 6 169 634                             | 6 726 883                             | 9 341 488                             | 4 286 772                                  | 4 453 069                                  | 10 637<br>779    | 37 434<br>175         | 5 638<br>568     | 10 637<br>779         |
| Trwałość BA3 [osi]                                    | 13 623 847         | 3 394 869              | 3 403 853                   | 3 462 806                             | 3 508 028                             | 3 553 191                             | 3 620 821                             | 3 733 203                             | 3 845 126                             | 3 956 551                             | 4 067 458                             | 4 505 097                             | 3 517 099                                  | 3 562 297                                  | 4 210<br>301     | 5 996 312             | 3 557<br>966     | 4 210 301             |

| Obciążenie normalne i styczne, oś obciążenia             |                    |                        |                             |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |   |   |                  |                       |                  |                       |                                 |
|--|--------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|---------------------------------|
| KR6 (W2)   | pełna<br>sczepność | poślizg<br>(odrywanie) | poślizg (brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,3$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=3,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=5,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>brak<br>odrywania) | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3<br>N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4<br>N | Romanoschi<br>X4<br>(odrywanie) |
| Odkształcenie<br>BA2 $\epsilon_2$ dół<br>[ $\mu$ strain] | 7,5                | 80,3                   | 80,2                        | 78,8                                  | 77,8                                  | 76,9                                  | 75,6                                  | 73,4                                  | 71,3                                  | 69,4                                  | 67,5                                  | 61,0                                  | 77,8  | 76,9  | 57,7             | 38,3                  | 71,0             | 57,7                  | 71,0                            |
| Odkształcenie<br>BA3 $\epsilon_3$ dół<br>[ $\mu$ strain] | 44,7               | 66,3                   | 66,3                        | 65,9                                  | 65,7                                  | 65,4                                  | 65,0                                  | 64,4                                  | 63,9                                  | 63,3                                  | 62,8                                  | 60,9                                  | 65,6  | 65,4  | 62,2             | 55,9                  | 65,5             | 62,2                  | 65,5                            |
| Napężenie<br>ścinające $\tau_{2xy}$<br>dół [MPa]         | 2,023E-06          | 6,363E-06              | 6,370E-06                   | 2,054E-06                             | -7,109E-07                            | -3,393E-06                            | -7,271E-06                            | -1,335E-05                            | -1,900E-05                            | -2,425E-05                            | -2,915E-05                            | -4,563E-05                            | -7,000E-07                                    | -3,379E-06                                    | 2,925E-05        | 1,800E-04             | 2,925E-05        | 7,789E-05             | 2,925E-05                       |
| Trwałość BA2<br>[osi]                                    | 11 668<br>995 853  | 4 802 151              | 4 811 285                   | 5 103 027                             | 5 311 238                             | 5 525 684                             | 5 859 316                             | 6 448 194                             | 7 079 749                             | 7 755 915                             | 8 478 587                             | 11 873<br>780                         | 5 320 546                                     | 5 535 049                                     | 14 228<br>686    | 54 823 454            | 7 182 416        | 14 228 686            | 7 182 416                       |
| Trwałość BA3<br>[osi]                                    | 18 019<br>895      | 4 928 937              | 4 943 196                   | 5 027 594                             | 5 093 204                             | 5 158 676                             | 5 256 612                             | 5 419 116                             | 5 580 647                             | 5 741 141                             | 5 900 559                             | 6 526 394                             | 5 107 598                                     | 5 173 119                                     | 6 090 719        | 8 655 424             | 5 140 034        | 6 090 719             | 5 140 034                       |

Tabela Z2. Zestawienie wyników dla KR6 (W2) w osi obciążenia, obciążenie normalne i obciążenia normalnego i stycznego na krawędzi obciążenia

| Obciążenie normalne, oś obciążenia                 |                   |                     |                          |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                      |                                      |               |                 |               |                 |
|--|-------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| KR6 (W2)   | pełna szczerpność | poślizg (odrywanie) | poślizg (brak odrywania) | tarcie ( $\mu=0,3$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=2,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=2,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=3,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=5,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; brak odrywania) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; brak odrywania) | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N |
| Odkształcenie BA2 $\epsilon_2$ dół [ $\mu$ strain] | -4,9              | 33,1                | 33,0                     | 33,2                            | 33,4                            | 33,4                            | 33,6                            | 33,8                            | 34,0                            | 34,3                            | 34,3                            | 34,6                            | 33,3                                 | 33,4                                 | 15,6          | 4,0             | 25,5          | 15,6            |
| Odkształcenie BA3 $\epsilon_3$ dół [ $\mu$ strain] | 31,7              | 74,3                | 42,6                     | 42,6                            | 42,6                            | 42,6                            | 42,6                            | 42,5                            | 42,5                            | 42,4                            | 42,4                            | 42,2                            | 42,6                                 | 73,2                                 | 39,9          | 35,9            | 42,2          | 39,9            |
| Napężenie ścinające $\tau_{2xy}$ dół [MPa]         | 1,620E-03         | 8,080E-03           | 8,080E-03                | -7,869E-03                      | 7,700E-03                       | 7,590E-03                       | -7,405E-03                      | -7,095E-03                      | -6,802E-03                      | -6,260E-03                      | -6,260E-03                      | -5,332E-03                      | -7,734E-03                           | -7,600E-03                           | 7,338E-03     | -6,113E-03      | 7,854E-03     | -7,338E-03      |
| Trwałość BA2 [osi]                                 |                   | 88 758 956          | 89 174 214               | 87 320 964                      | 86 436 967                      | 85 608 345                      | 84 462 071                      | 82 784 722                      | 81 364 904                      | 79 171 860                      | 79 171 860                      | 76 720 572                      | 86 811 642                           | 85 969 004                           | 1 054 433 461 | 96 471 287 401  | 210 335 283   | 1 054 433 461   |
| Trwałość BA3 [osi]                                 | 55 854 816        | 3 394 869           | 21 146 382               | 21 081 896                      | 21 109 132                      | 21 137 044                      | 21 180 073                      | 21 254 675                      | 21 332 571                      | 21 497 075                      | 21 497 075                      | 21 853 411                      | 21 211 293                           | 3 562 297                            | 26 325 092    | 36 999 912      | 21 877 910    | 26 325 092      |

| Obciążenie normalne i styczne, oś obciążenia       |                   |                     |                          |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                      |                                      |               |                 |               |                 |                           |
|--|-------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------------------|
| KR6 (W2)   | pełna szczerpność | poślizg (odrywanie) | poślizg (brak odrywania) | tarcie ( $\mu=0,3$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=2,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=2,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=3,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=5,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; brak odrywania) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; brak odrywania) | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N | Romanoschi X4 (odrywanie) |
| Odkształcenie BA2 $\epsilon_2$ dół [ $\mu$ strain] | -0,8              | 43,1                | 43,1                     | 43,1                            | 43,1                            | 43,1                            | 43,1                            | 43,0                            | 42,9                            | 42,8                            | 42,7                            | 42,2                            | 43,0                                 | 43,0                                 | 25,1          | 12,7            | 35,2          | 25,1            | 35,2                      |
| Odkształcenie BA3 $\epsilon_3$ dół [ $\mu$ strain] | 32,6              | 43,4                | 43,4                     | 43,4                            | 43,4                            | 43,3                            | 43,3                            | 43,2                            | 43,2                            | 43,1                            | 43,0                            | 42,7                            | 43,3                                 | 43,3                                 | 40,9          | 37,2            | 43,1          | 40,9            | 43,1                      |
| Napężenie ścinające $\tau_{2xy}$ dół [MPa]         | 1,790E-03         | -7,681E-03          | -7,682E-03               | -7,465E-03                      | -7,326E-03                      | -7,189E-03                      | -6,988E-03                      | -6,675E-03                      | -6,378E-03                      | -6,097E-03                      | -5,832E-03                      | -4,899E-03                      | -7,328E-03                           | -7,193E-03                           | 3,225E-01     | -5,821E-03      | -7,465E-03    | -6,974E-03      | -7,465E-03                |
| Trwałość BA2 [osi]                                 |                   | 37 180 243          | 37 311 015               | 37 179 665                      | 37 194 821                      | 37 221 805                      | 37 285 605                      | 37 438 385                      | 37 652 652                      | 37 921 442                      | 38 241 794                      | 39 977 215                      | 37 317 117                           | 37 341 205                           | 220 898 913   | 2 055 955 322   | 72 094 693    | 220 898 913     | 72 094 693                |
| Trwałość BA3 [osi]                                 | 51 192 360        | 19 849 052          | 19 943 191               | 19 907 806                      | 19 947 745                      | 19 988 257                      | 20 049 922                      | 20 155 489                      | 20 263 840                      | 20 374 615                      | 20 487 641                      | 20 955 822                      | 20 040 201                           | 20 080 064                           | 24 173 240    | 33 163 547      | 20 408 845    | 24 173 240      | 20 408 845                |



Tabela Z3 Zestawienie naprężeń poziomych dla KR6 (W2) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego i dla obciążenia normalnego i stycznego w osi obciążenia

| Obciążenie normalne, oś obciążenia |                                       |                    |                        |                                |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |   |   |                  |                  |
|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|------------------|------------------|
| z (cm)                             | KR6 (W2)                              | pełna<br>szcepność | poślizg<br>(odrywanie) | poślizg<br>(brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,3$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=3,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=5,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>brak<br>odrywania) | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X4 |
| 0                                  | Naprężenie $\sigma_1$ góra [MPa]      | -1,0723            | -1,2541                | -0,4525                        | -1,2483                               | -1,2446                               | -1,2410                               | -1,2356                               | -1,2271                               | -1,2190                               | -1,2112                               | -1,2039                               | -1,1776                               | -1,2440                                       | -1,2403                                       | -1,2596          | -1,2700          |
| 5                                  | Naprężenie $\sigma_1$ dół [MPa]       | -0,6079            | -0,3268                | 0,2402                         | -0,3292                               | -0,3308                               | -0,3323                               | -0,3346                               | -0,3383                               | -0,3419                               | -0,3454                               | -0,3487                               | -0,3610                               | -0,3306                                       | -0,3322                                       | -0,4495          | -0,3858          |
| 5                                  | Naprężenie $\sigma_2$ góra [MPa]      | -0,6006            | -0,3245                | -0,3245                        | -0,3269                               | -0,3285                               | -0,3300                               | -0,3323                               | -0,3360                               | -0,3396                               | -0,3430                               | -0,3463                               | -0,3585                               | -0,3283                                       | -0,3299                                       | -0,4449          | -0,3824          |
| 13                                 | Naprężenie $\sigma_2$ dół [MPa]       | -0,1094            | 1,0204                 | 1,0204                         | 0,9992                                | 0,9854                                | 0,9719                                | 0,9522                                | 0,9207                                | 0,8907                                | 0,8622                                | 0,8351                                | 0,7382                                | 0,9848  | 0,9714  | 0,6993           | 0,8897           |
| 13                                 | Naprężenie $\sigma_3$ góra góra [MPa] | -0,1117            | -1,2927                | -1,2927                        | -1,2710                               | -1,2569                               | -1,2431                               | -1,2229                               | -1,1906                               | -1,1599                               | -1,1307                               | -1,1028                               | -1,0033                               | -1,2559                                       | -1,2422                                       | -0,9630          | -1,1621          |
| 22                                 | Naprężenie $\sigma_3$ góra dół [MPa]  | 0,2307             | -0,0864                | -0,0864                        | -0,0831                               | -0,1118                               | -0,0789                               | -0,0759                               | -0,0709                               | -0,0662                               | -0,0616                               | -0,0572                               | -0,0409                               | -0,0809                                       | -0,0789                                       | 0,0351           | -0,0315          |
| 22                                 | Naprężenie $\sigma_3$ dół góra [MPa]  | 0,2320             | -0,0846                | -0,0846                        | -0,0814                               | -0,0793                               | -0,0772                               | -0,0742                               | -0,0693                               | -0,0645                               | -0,0600                               | -0,0556                               | -0,0394                               | -0,0792                                       | -0,0771                                       | 0,0368           | -0,0298          |
| 31                                 | Naprężenie $\sigma_3$ dół dół [MPa]   | 0,6533             | 0,9891                 | 0,9891                         | 0,9832                                | 0,9793                                | 0,9755                                | 0,9700                                | 0,9610                                | 0,9525                                | 0,9442                                | 0,9364                                | 0,9078                                | 0,9786  | 0,9748  | 0,9292           | 0,9765           |
| 31                                 | Naprężenie KŁSM góra [MPa]            | 0,0134             | 0,0132                 | 0,0132                         | 0,0131                                | 0,0131                                | 0,0130                                | 0,0130                                | 0,0129                                | 0,0128                                | 0,0127                                | 0,0126                                | 0,0123                                | 0,0131  | 0,0130  | 0,0149           | 0,0143           |
| 51                                 | Naprężenie KŁSM dół [MPa]             | 0,0246             | 0,0455                 | 0,0455                         | 0,0453                                | 0,0452                                | 0,0451                                | 0,0449                                | 0,0446                                | 0,0444                                | 0,0441                                | 0,0439                                | 0,0430                                | 0,0451  | 0,0450  | 0,0386           | 0,0430           |
| 51                                 | Naprężenie na podłożu góra [MPa]      | 0,0002             | 0,0002                 | 0,0002                         | 0,0002                                | 0,0002                                | 0,0002                                | 0,0002                                | 0,0129                                | 0,0002                                | 0,0001                                | 0,0001                                | 0,0001                                | 0,0002  | 0,0002  | 0,0008           | 0,0006           |

| Obciążenie normalne i styczne, oś obciążenia |                                       |                    |                            |                                |                                       |                                       |   |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |   |   |                   |                  |                               |
|--|---------------------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|-------------------|------------------|-------------------------------|
| z (cm)                                       | KR6 (W2)                              | pełna<br>szcepność | poślizg<br>(odrywa<br>nie) | poślizg<br>(brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,3$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywa<br>nie) | tarcie<br>( $\mu=1,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=3,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=5,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>brak<br>odrywania) | Romano<br>schi X3 | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4<br>odrywanie |
| 0  | Naprężenie $\sigma_1$ góra [MPa]      | 1,2770             | 1,1496                     | 1,1503                         | 1,1542                                | 1,1572                                | 1,1601                                    | 1,1643                                | 1,1711                                | 1,1775                                | 1,1836                                | 1,1895                                | 1,2101                                | 1,1578  | 1,1607  | 1,1373            | 1,1311           | 1,1311                        |
| 5  | Naprężenie $\sigma_1$ dół [MPa]       | -0,2624            | 0,0318                     | 0,0320                         | 0,0286                                | 0,0266                                | 0,0245                                    | 0,0216                                | 0,0168                                | 0,0121                                | 0,0077                                | 0,0035                                | -0,0120                               | 0,0267  | 0,0247  | -0,0946           | -0,0289          | -0,0289                       |
| 5  | Naprężenie $\sigma_2$ góra [MPa]      | -0,2607            | 0,0280                     | 0,0281                         | 0,0249                                | 0,0228                                | 0,0208                                    | 0,0179                                | 0,0131                                | 0,0086                                | 0,0042                                | 0,0000                                | -0,0152                               | 0,0230  | 0,0210  | -0,0960           | -0,0316          | -0,0316                       |
| 13   | Naprężenie $\sigma_2$ dół [MPa]       | -0,0553            | 0,9703                     | 0,9696                         | 0,9506                                | 0,9378                                | 0,9253                                    | 0,9070                                | 0,8778                                | 0,8501                                | 0,8238                                | 0,7987                                | 0,7095                                | 0,9372  | 0,9247  | 0,6522            | 0,8398           | 0,8398                        |
| 13   | Naprężenie $\sigma_3$ góra góra [MPa] | -0,0585            | -1,1324                    | -1,1314                        | -1,1122                               | -1,0991                               | -1,0863                                   | -1,0676                               | -1,0377                               | -1,0092                               | -0,9822                               | -0,9564                               | -0,8646                               | -1,0982                                       | -1,0854                                       | -0,8067           | -1,0024          | -1,0024                       |
| 22   | Naprężenie $\sigma_3$ góra dół [MPa]  | 0,2305             | -0,0911                    | -0,0910                        | -0,0873                               | -0,0848                               | -0,0824                                   | -0,0788                               | -0,0731                               | -0,0676                               | -0,0623                               | -0,0572                               | -0,0386                               | -0,0847                                       | -0,0823                                       | 0,0324            | -0,0353          | -0,0353                       |
| 22   | Naprężenie $\sigma_3$ dół góra [MPa]  | 0,2314             | -0,0898                    | -0,0897                        | -0,0860                               | -0,0835                               | -0,0811                                   | -0,0776                               | -0,0718                               | -0,0663                               | -0,0611                               | -0,0560                               | -0,0375                               | -0,0834                                       | -0,0810                                       | 0,0337            | -0,0339          | -0,0339                       |
| 31   | Naprężenie $\sigma_3$ dół dół [MPa]   | 0,6030             | 0,8992                     | 0,8984                         | 0,8937                                | 0,8902                                | 0,8867                                    | 0,8815                                | 0,8733                                | 0,8654                                | 0,8578                                | 0,8506                                | 0,8244                                | 0,8894  | 0,8859  | 0,8445            | 0,8884           | 0,8884                        |
| 31   | Naprężenie KŁSM góra [MPa]            | 0,0123             | 0,0111                     | 0,0111                         | 0,0111                                | 0,0110                                | 0,0110                                    | 0,0110                                | 0,0109                                | 0,0108                                | 0,0108                                | 0,0107                                | 0,0105                                | 0,0110  | 0,0110  | 0,0130            | 0,0123           | 0,0123                        |
| 51   | Naprężenie KŁSM dół [MPa]             | 0,0235             | 0,0437                     | 0,0436                         | 0,0435                                | 0,0434                                | 0,0433                                    | 0,0431                                | 0,0428                                | 0,0425                                | 0,0423                                | 0,0420                                | 0,0411                                | 0,0433  | 0,0432  | 0,0369            | 0,0413           | 0,0413                        |
| 51   | Naprężenie na podłożu góra [MPa]      | 0,0001             | 0,0000                     | 0,0000                         | 0,0000                                | 0,0000                                | 0,0000                                    | -0,0001                               | -0,0001                               | -0,0001                               | -0,0001                               | -0,0001                               | -0,0002                               | 0,0000  | 0,0000  | 0,0006            | 0,0004           | 0,0004                        |

Tabela Z4. Zestawienie naprężeń poziomych dla KR6 (W2) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego i dla obciążenia normalnego i stycznego na krawędzi obciążenia

| Obciążenie normalne, oś obciążenia |  |                    |                        |                                |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |   |   |                  |                  |
|------------------------------------|--|--------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|------------------|------------------|
| z (cm)                             | KR6 (W2)                                 | pełna<br>szcepnosc | poślizg<br>(odrywanie) | poślizg<br>(brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,3$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=3,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=5,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>brak<br>odrywania) | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X4 |
| 0                                  | Naprężenie $\sigma_{x1}$ góra [MPa]      | -0,5407            | -0,5707                | -0,5700                        | -0,5709                               | -0,5709                               | -0,5710                               | -0,5711                               | -0,5713                               | -0,5713                               | -0,5714                               | -0,5714                               | -0,5711                               | -0,5702                                       | -0,5703                                       | -0,5918          | -0,5911          |
| 5                                  | Naprężenie $\sigma_{x1}$ dół [MPa]       | -0,4299            | -0,2079                | -0,2078                        | -0,2090                               | -0,2097                               | -0,2104                               | -0,2115                               | -0,2132                               | -0,2148                               | -0,2165                               | -0,2181                               | -0,2240                               | -0,2096                                       | -0,2103                                       | -0,3203          | -0,2635          |
| 5                                  | Naprężenie $\sigma_{x2}$ góra [MPa]      | -0,4234            | -0,2057                | -0,2055                        | -0,2067                               | -0,2074                               | -0,2081                               | -0,2092                               | -0,2108                               | -0,2124                               | -0,2140                               | -0,2156                               | -0,2214                               | -0,2073                                       | -0,2080                                       | -0,3159          | -0,2602          |
| 13                                 | Naprężenie $\sigma_{x2}$ dół [MPa]       | -0,1325            | 0,4982                 | 0,4976                         | 0,4972                                | 0,4965                                | 0,4958                                | 0,4946                                | 0,4925                                | 0,4904                                | 0,4881                                | 0,4857                                | 0,4753                                | 0,4959  | 0,4952  | 0,2388           | 0,3862           |
| 13                                 | Naprężenie $\sigma_{x3}$ góra góra [MPa] | -0,1292            | -0,8001                | -0,7990                        | -0,7985                               | -0,7974                               | -0,7963                               | -0,7946                               | -0,7917                               | -0,7887                               | -0,7856                               | -0,7824                               | -0,7693                               | -0,7964                                       | -0,7953                                       | -0,5343          | -0,6886          |
| 22                                 | Naprężenie $\sigma_{x3}$ góra dół [MPa]  | 0,1548             | -0,0864                | -0,0835                        | -0,0822                               | -0,0813                               | -0,0804                               | -0,0790                               | -0,0768                               | -0,0747                               | -0,0726                               | -0,0706                               | -0,0630                               | -0,0812                                       | -0,0789                                       | 0,0249           | -0,0329          |
| 22                                 | Naprężenie $\sigma_{x3}$ dół góra [MPa]  | 0,1553             | -0,0830                | -0,0829                        | -0,0816                               | -0,0807                               | -0,0797                               | -0,0784                               | -0,0762                               | -0,0741                               | -0,0720                               | -0,0700                               | -0,0624                               | -0,0806                                       | -0,0797                                       | 0,0255           | -0,0323          |
| 31                                 | Naprężenie $\sigma_{x3}$ dół dół [MPa]   | 0,4585             | 0,9891                 | 0,6273                         | 0,6271                                | 0,6264                                | 0,6256                                | 0,6246                                | 0,6229                                | 0,6212                                | 0,6195                                | 0,6178                                | 0,6115                                | 0,6255  | 0,9748  | 0,5895           | 0,6217           |
| 31                                 | Naprężenie KŁSM góra [MPa]               | 0,0083             | 0,0051                 | 0,0051                         | 0,0051                                | 0,0052                                | 0,0052                                | 0,0052                                | 0,0053                                | 0,0053                                | 0,0053                                | 0,0054                                | 0,0055                                | 0,0052  | 0,0052  | 0,0072           | 0,0063           |
| 51                                 | Naprężenie KŁSM dół [MPa]                | 0,0208             | 0,0368                 | 0,0367                         | 0,0367                                | 0,0366                                | 0,0366                                | 0,0365                                | 0,0363                                | 0,0362                                | 0,0360                                | 0,0359                                | 0,0353                                | 0,0365  | 0,0365  | 0,0309           | 0,0347           |
| 51                                 | Naprężenie na podłożu góra [MPa]         | -0,0003            | -0,0010                | -0,0010                        | -0,0010                               | -0,0010                               | -0,0010                               | -0,0010                               | -0,0010                               | -0,0010                               | -0,0010                               | -0,0010                               | -0,0010                               | -0,0010                                       | -0,0010                                       | -0,0003          | -0,0005          |

| Obciążenie normalne i styczne, oś obciążenia |  |                    |                            |                                |                                       |                                       |                                  |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |  |                   |                  |                               |
|--|--|--------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------|------------------|-------------------------------|
| z (cm)                                       | KR6 (W2)                                 | pełna<br>szcepnosc | poślizg<br>(odrywa<br>nie) | poślizg<br>(brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,3$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>Odr.) | tarcie<br>( $\mu=1,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=3,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=5,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>brak odr.) | tarcie ( $\mu=0,7$ ;<br>brak<br>odrywania) | Romano<br>schi X3 | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4<br>odrywanie |
| 0  | Naprężenie $\sigma_{x1}$ góra [MPa]      | -1,2411            | -1,276                     | -1,2757                        | -1,2763                               | -1,2763                               | -1,2762                          | -1,2760                               | -1,2758                               | -1,2755                               | -1,2751                               | -1,2748                               | -1,2731                               | -1,2756                               | -1,2755                                    | -1,3003           | -1,2982          | -0,3254                       |
| 5  | Naprężenie $\sigma_{x1}$ dół [MPa]       | -0,5037            | -0,272                     | -0,2722                        | -0,2738                               | -0,2747                               | -0,2756                          | -0,2769                               | -0,2790                               | -0,2811                               | -0,2831                               | -0,2851                               | -0,2926                               | -0,2745                               | -0,2754                                    | -0,3879           | -0,3295          | 0,4724                        |
| 5  | Naprężenie $\sigma_{x2}$ góra [MPa]      | -0,4963            | -0,269                     | -0,2692                        | -0,2707                               | -0,2716                               | -0,2725                          | -0,2738                               | -0,2759                               | -0,2779                               | -0,2799                               | -0,2819                               | -0,2892                               | -0,2714                               | -0,2723                                    | -0,3826           | -0,3254          | -0,3254                       |
| 13   | Naprężenie $\sigma_{x2}$ dół [MPa]       | -0,1079            | 0,586                      | 0,5855                         | 0,5834                                | 0,5814                                | 0,5795                           | 0,5766                                | 0,5717                                | 0,5667                                | 0,5617                                | 0,5567                                | 0,5363                                | 0,5808                                | 0,5789                                     | 0,3225            | 0,4724           | 0,4724                        |
| 13   | Naprężenie $\sigma_{x3}$ góra góra [MPa] | -0,1066            | -0,836                     | -0,8352                        | -0,8330                               | -0,8308                               | -0,8285                          | -0,8252                               | -0,8195                               | -0,8138                               | -0,8081                               | -0,8024                               | -0,7797                               | -0,8297                               | -0,8275                                    | -0,5675           | -0,7237          | -0,7237                       |
| 22   | Naprężenie $\sigma_{x3}$ góra dół [MPa]  | 0,1670             | -0,078                     | -0,0779                        | -0,0763                               | -0,0753                               | -0,0742                          | -0,0726                               | -0,0701                               | -0,0676                               | -0,0651                               | -0,0628                               | -0,0539                               | -0,0752                               | -0,0741                                    | 0,0326            | -0,0263          | -0,0263                       |
| 22   | Naprężenie $\sigma_{x3}$ dół góra [MPa]  | 0,1676             | -0,077                     | -0,0771                        | -0,0755                               | -0,0745                               | -0,0734                          | -0,0718                               | -0,0693                               | -0,0668                               | -0,0644                               | -0,0620                               | -0,0532                               | -0,0744                               | -0,0733                                    | 0,0334            | -0,0255          | -0,0255                       |
| 31   | Naprężenie $\sigma_{x3}$ dół dół [MPa]   | 0,4633             | 0,634                      | 0,6332                         | 0,6327                                | 0,6319                                | 0,6310                           | 0,6298                                | 0,6278                                | 0,6258                                | 0,6238                                | 0,6219                                | 0,6144                                | 0,6311                                | 0,6303                                     | 0,5976            | 0,6286           | 0,6286                        |
| 31   | Naprężenie KŁSM góra [MPa]               | 0,0086             | 0,005                      | 0,0054                         | 0,0054                                | 0,0054                                | 0,0054                           | 0,0055                                | 0,0055                                | 0,0055                                | 0,0055                                | 0,0056                                | 0,0056                                | 0,0058                                | 0,0054                                     | 0,0076            | 0,0066           | 0,0066                        |
| 51   | Naprężenie KŁSM dół [MPa]                | 0,0203             | 0,036                      | 0,0360                         | 0,0360                                | 0,0359                                | 0,0359                           | 0,0358                                | 0,0356                                | 0,0354                                | 0,0353                                | 0,0351                                | 0,0345                                | 0,0358                                | 0,0358                                     | 0,0303            | 0,0340           | 0,0340                        |
| 51   | Naprężenie na podłożu góra [MPa]         | -0,0004            | -0,00                      | -0,0010                        | -0,0011                               | -0,0011                               | -0,0011                          | -0,0011                               | -0,0011                               | -0,0011                               | -0,0011                               | -0,0011                               | -0,0011                               | -0,0010                               | -0,0010                                    | -0,0003           | -0,0006          | -0,0006                       |

Tabela Z5. Zestawienie odkształceń poziomych dla KR6 (W2) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego i dla obciążenia normalnego i stycznego w osi obciążenia

| Obciążenie normalne, oś obciążenia |   |                     |                        |                                |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |   |   |                  |                  |
|------------------------------------|---|---------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|------------------|------------------|
| z (cm)                             | KR6 (W2)                                | pełna<br>szczerpość | poślizg<br>(odrywanie) | poślizg<br>(brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,3$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=3,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=5,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>brak<br>odrywania) | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X4 |
| 0                                  | Odkształcenie ex1 góra [μstrain]        | -52,47              | -64,85                 | -64,80                         | -64,46                                | -64,21                                | -63,96                                | -63,59                                | -63,01                                | -62,46                                | -61,94                                | -61,44                                | -59,65                                | -64,16  | -63,91  | -65,21           | -65,93           |
| 5                                  | Odkształcenie ex1 dół [μstrain]         | -21,92              | -3,39                  | -3,38                          | -3,52                                 | -3,61                                 | -3,69                                 | -3,82                                 | -4,02                                 | -4,22                                 | -4,41                                 | -4,60                                 | -5,30                                 | -3,59   | -3,68   | -11,68           | -7,39            |
| 5                                  | Odkształcenie ex2 góra [μstrain]        | -21,93              | -3,40                  | -3,39                          | -3,53                                 | -3,61                                 | -3,70                                 | -3,82                                 | -4,03                                 | -4,23                                 | -4,42                                 | -4,61                                 | -5,31                                 | -3,60   | -3,69   | -11,69           | -7,40            |
| 13                                 | Odkształcenie ex2 dół [μstrain]         | 5,63                | 85,61                  | 85,56                          | 84,11                                 | 83,13                                 | 82,17                                 | 80,77                                 | 78,54                                 | 76,41                                 | 74,38                                 | 72,45                                 | 65,57                                 | 83,09   | 82,13   | 63,04            | 76,45            |
| 13                                 | Odkształcenie ex3 góra góra [μstrain]   | 5,63                | -78,63                 | -78,56                         | -77,09                                | -76,09                                | -75,11                                | -73,68                                | -71,39                                | -69,21                                | -67,14                                | -65,16                                | -58,10                                | -76,02  | -75,05  | -54,93           | -69,23           |
| 22                                 | Odkształcenie ex3 góra dół [μstrain]    | 22,15               | 2,77                   | 2,77                           | 2,89                                  | 0,98                                  | 3,06                                  | 3,19                                  | 3,39                                  | 3,58                                  | 3,78                                  | 3,96                                  | 4,67                                  | 2,98  | 3,07  | 10,97            | 6,54             |
| 22                                 | Odkształcenie ex3 dół góra [μstrain]    | 22,15               | 2,76                   | 2,77                           | 2,89                                  | 2,97                                  | 3,06                                  | 3,18                                  | 3,38                                  | 3,58                                  | 3,77                                  | 3,96                                  | 4,66                                  | 2,98  | 3,06  | 10,97            | 6,54             |
| 31                                 | Odkształcenie ex3 dół dół [μstrain]     | 48,70               | 74,28                  | 74,22                          | 73,83                                 | 73,54                                 | 73,26                                 | 72,84                                 | 72,17                                 | 71,52                                 | 70,90                                 | 70,31                                 | 68,16                                 | 73,49   | 73,20   | 69,58            | 73,23            |
| 31                                 | Odkształcenie KLSM góra [μstrain]       | 48,56               | 74,01                  | 73,95                          | 73,57                                 | 73,28                                 | 72,99                                 | 72,58                                 | 71,91                                 | 71,27                                 | 70,65                                 | 70,06                                 | 67,93                                 | 73,22   | 72,94   | 69,33            | 72,97            |
| 51                                 | Odkształcenie KLSM dół [μstrain]        | 54,29               | 100,91                 | 100,69                         | 100,54                                | 100,30                                | 100,06                                | 99,70                                 | 99,13                                 | 98,57                                 | 98,03                                 | 97,51                                 | 95,57                                 | 100,08  | 99,85   | 84,47            | 94,77            |
| 51                                 | Odkształcenie na podłożu góra [μstrain] | 54,34               | 100,98                 | 100,76                         | 100,61                                | 100,37                                | 100,13                                | 99,77                                 | 71,91                                 | 98,65                                 | 98,11                                 | 97,59                                 | 95,65                                 | 100,15  | 99,92   | 84,53            | 94,83            |

| Obciążenie normalne i styczne, oś obciążenia |   |                     |                             |                                |                                       |                                       |  |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |   |   |                    |                  |                               |
|--|---|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|--------------------|------------------|-------------------------------|
| z (cm)                                       | KR6 (W2)                                | pełna<br>szczerpość | poślizg<br>(odrywa-<br>nie) | poślizg<br>(brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,3$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywa-<br>nie) | tarcie<br>( $\mu=1,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=2,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=3,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=5,0$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>brak<br>odrywania) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>brak<br>odrywania) | Romano-<br>schi X3 | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4<br>odrywanie |
| 0  | Odkształcenie ex1 góra [μstrain]        | 157,54              | 150,39                      | 150,44                         | 150,67                                | 150,85                                | 151,02                                     | 151,28                                | 151,68                                | 152,07                                | 152,44                                | 152,79                                | 154,02                                | 150,89  | 151,07  | 149,30             | 149,03           | 149,03                        |
| 5  | Odkształcenie ex1 dół [μstrain]         | 2,17                | 22,97                       | 22,98                          | 22,74                                 | 22,58                                 | 22,43                                      | 22,21                                 | 21,86                                 | 21,52                                 | 21,19                                 | 20,88                                 | 19,74                                 | 22,60   | 22,45   | 14,18              | 18,76            | 18,76                         |
| 5  | Odkształcenie ex2 góra [μstrain]        | 2,17                | 22,97                       | 22,98                          | 22,73                                 | 22,58                                 | 22,43                                      | 22,21                                 | 21,86                                 | 21,52                                 | 21,19                                 | 20,88                                 | 19,74                                 | 22,59   | 22,44   | 14,18              | 18,75            | 18,75                         |
| 13   | Odkształcenie ex2 dół [μstrain]         | 7,51                | 80,27                       | 80,22                          | 78,80                                 | 77,85                                 | 76,92                                      | 75,56                                 | 73,39                                 | 71,34                                 | 69,39                                 | 67,53                                 | 60,97                                 | 77,81   | 76,88   | 57,70              | 71,03            | 71,03                         |
| 13   | Odkształcenie ex3 góra góra [μstrain]   | 7,51                | -69,11                      | -69,04                         | -67,61                                | -66,64                                | -65,69                                     | -64,30                                | -62,08                                | -59,98                                | -57,99                                | -56,09                                | -49,36                                | -66,57  | -65,62  | -45,53             | -59,67           | -59,67                        |
| 22   | Odkształcenie ex3 góra dół [μstrain]    | 21,53               | 0,37                        | 0,38                           | 0,59                                  | 0,73                                  | 0,87                                       | 1,08                                  | 1,41                                  | 1,74                                  | 2,05                                  | 2,34                                  | 3,44                                  | 0,74  | 0,88  | 8,92               | 4,30             | 4,30                          |
| 22   | Odkształcenie ex3 dół góra [μstrain]    | 21,53               | 0,36                        | 0,37                           | 0,58                                  | 0,73                                  | 0,87                                       | 1,07                                  | 1,41                                  | 1,73                                  | 2,04                                  | 2,34                                  | 3,43                                  | 0,73  | 0,87  | 8,92               | 4,29             | 4,29                          |
| 31   | Odkształcenie ex3 dół dół [μstrain]     | 44,73               | 66,32                       | 66,27                          | 65,93                                 | 65,67                                 | 65,41                                      | 65,04                                 | 64,44                                 | 63,87                                 | 63,32                                 | 62,79                                 | 60,90                                 | 65,61   | 65,36   | 62,19              | 65,48            | 65,48                         |
| 31   | Odkształcenie KLSM góra [μstrain]       | 44,62               | 66,08                       | 66,03                          | 65,69                                 | 65,43                                 | 65,18                                      | 64,81                                 | 64,21                                 | 63,64                                 | 63,10                                 | 62,58                                 | 60,70                                 | 65,38   | 65,12   | 61,98              | 65,25            | 65,25                         |
| 51   | Odkształcenie KLSM dół [μstrain]        | 51,92               | 96,76                       | 96,55                          | 96,37                                 | 96,11                                 | 95,86                                      | 95,49                                 | 94,88                                 | 94,30                                 | 93,73                                 | 93,18                                 | 91,16                                 | 95,91   | 95,66   | 80,71              | 90,78            | 90,78                         |
| 51   | Odkształcenie na podłożu góra [μstrain] | 51,97               | 96,84                       | 96,62                          | 96,45                                 | 96,19                                 | 95,94                                      | 95,56                                 | 94,96                                 | 94,37                                 | 93,81                                 | 93,26                                 | 91,23                                 | 95,98   | 95,73   | 80,77              | 90,84            | 90,84                         |

Tabela Z6. Zestawienie odkształceń poziomych dla KR6 (W2) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego i dla obciążenia normalnego i stycznego na krawędzi obciążenia

| Obciążenie normalne, krawędź obciążenia |   |                  |                     |                          |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                      |                                      |               |               |
|---|---|------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|
| Z (cm)                                  | KR6 (W2)                                | pełna szczepność | poślizg (odrywanie) | poślizg (brak odrywania) | tarcie ( $\mu=0,3$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=2,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=2,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=3,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=5,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; brak odrywania) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; brak odrywania) | Romanoschi X3 | Romanoschi X4 |
| 0                                       | Odkształcenie ex1 góra [ustrain]        | -26,02           | -26,16              | -26,12                   | -26,24                          | -26,29                          | -26,33                          | -26,40                          | -26,51                          | -26,61                          | -26,70                          | -26,78                          | -27,06                          | -26,24                               | -26,29                               | -27,80        | -27,61        |
| 5                                       | Odkształcenie ex1 dół [ustrain]         | -21,58           | -7,17               | -7,16                    | -7,24                           | -7,28                           | -7,33                           | -7,39                           | -7,50                           | -7,60                           | -7,70                           | -7,80                           | -8,18                           | -7,27                                | -7,31                                | -14,68        | -10,91        |
| 5                                       | Odkształcenie ex2 góra [ustrain]        | -21,56           | -7,14               | -7,13                    | -7,21                           | -7,25                           | -7,30                           | -7,36                           | -7,47                           | -7,58                           | -7,68                           | -7,78                           | -8,15                           | -7,24                                | -7,29                                | -14,66        | -10,88        |
| 13                                      | Odkształcenie ex2 dół [ustrain]         | -4,86            | 33,08               | 33,04                    | 33,25                           | 33,35                           | 33,45                           | 33,59                           | 33,79                           | 33,97                           | 34,12                           | 34,25                           | 34,58                           | 33,31                                | 33,41                                | 15,60         | 25,45         |
| 13                                      | Odkształcenie ex3 góra góra [ustrain]   | -4,83            | -45,92              | -45,84                   | -46,06                          | -46,15                          | -46,23                          | -46,35                          | -46,52                          | -46,66                          | -46,78                          | -46,88                          | -47,08                          | -46,07                               | -46,15                               | -27,57        | -38,11        |
| 22                                      | Odkształcenie ex3 góra dół [ustrain]    | 12,73            | 2,77                | -2,25                    | -2,17                           | -2,12                           | -2,06                           | -1,98                           | -1,85                           | -1,73                           | -1,60                           | -1,48                           | -1,04                           | -2,11                                | 3,07                                 | 5,05          | 1,22          |
| 22                                      | Odkształcenie ex3 dół góra [ustrain]    | 12,72            | -2,27               | -2,26                    | -2,18                           | -2,13                           | -2,07                           | -1,99                           | -1,86                           | -1,74                           | -1,61                           | -1,49                           | -1,05                           | -2,12                                | -2,07                                | 5,05          | 1,21          |
| 31                                      | Odkształcenie ex3 dół dół [ustrain]     | 31,72            | 74,28               | 42,61                    | 42,65                           | 42,63                           | 42,61                           | 42,59                           | 42,54                           | 42,49                           | 42,44                           | 42,39                           | 42,18                           | 42,57                                | 73,20                                | 39,86         | 42,17         |
| 31                                      | Odkształcenie KLSM góra [ustrain]       | 32,49            | 44,25               | 44,18                    | 44,21                           | 44,18                           | 44,15                           | 44,11                           | 44,04                           | 43,97                           | 43,90                           | 43,83                           | 43,54                           | 44,12                                | 44,09                                | 41,31         | 43,71         |
| 51                                      | Odkształcenie KLSM dół [ustrain]        | 45,63            | 80,90               | 80,67                    | 80,70                           | 80,57                           | 80,45                           | 80,26                           | 79,95                           | 79,64                           | 79,35                           | 79,06                           | 77,97                           | 80,35                                | 80,23                                | 66,89         | 75,55         |
| 51                                      | Odkształcenie na podłożu góra [ustrain] | 46,10            | 82,03               | 81,80                    | 81,82                           | 81,69                           | 81,55                           | 81,35                           | 81,03                           | 80,72                           | 80,41                           | 80,11                           | 78,98                           | 81,46                                | 81,33                                | 67,86         | 76,62         |

| Obciążenie normalne i styczne, krawędź obciążenia |   |                  |                     |                          |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                      |                                      |               |               |                         |
|---|---|------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
| Z (cm)  | KR6 (W2)                                | pełna szczepność | poślizg (odrywanie) | poślizg (brak odrywania) | tarcie ( $\mu=0,3$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=2,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=2,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=3,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=5,0$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; brak odrywania) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; brak odrywania) | Romanoschi X3 | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 odrywanie |
| 0   | Odkształcenie ex1 góra [ustrain]        | -88,68           | -88,97              | -88,92                   | -89,03                          | -89,07                          | -89,10                          | -89,16                          | -89,24                          | -89,32                          | -89,38                          | -89,45                          | -89,64                          | -89,02                               | -89,06                               | -90,95        | -90,58        | -13,13                  |
| 5   | Odkształcenie ex1 dół [ustrain]         | -24,66           | -9,24               | -9,22                    | -9,33                           | -9,40                           | -9,46                           | -9,55                           | -9,70                           | -9,85                           | -9,99                           | -10,13                          | -10,64                          | -9,38                                | -9,45                                | -17,13        | -13,16        | 35,24                   |
| 5   | Odkształcenie ex2 góra [ustrain]        | -24,63           | -9,21               | -9,20                    | -9,31                           | -9,37                           | -9,43                           | -9,53                           | -9,68                           | -9,82                           | -9,96                           | -10,10                          | -10,61                          | -9,36                                | -9,42                                | -17,11        | -13,13        | -13,13                  |
| 13  | Odkształcenie ex2 dół [ustrain]         | -0,83            | 43,10               | 43,05                    | 43,10                           | 43,09                           | 43,08                           | 43,06                           | 43,01                           | 42,93                           | 42,84                           | 42,73                           | 42,16                           | 43,05                                | 43,04                                | 25,08         | 35,24         | 35,24                   |
| 13  | Odkształcenie ex3 góra góra [ustrain]   | -0,80            | -47,55              | -47,47                   | -47,53                          | -47,51                          | -47,49                          | -47,45                          | -47,37                          | -47,27                          | -47,15                          | -47,01                          | -46,34                          | -47,44                               | -47,42                               | -28,79        | -39,57        | -39,57                  |
| 22  | Odkształcenie ex3 góra dół [ustrain]    | 14,54            | -1,03               | -1,02                    | -0,92                           | -0,86                           | -0,79                           | -0,69                           | -0,53                           | -0,37                           | -0,22                           | -0,08                           | 0,46                            | -0,85                                | -0,78                                | 6,55          | 2,58          | 2,58                    |
| 22  | Odkształcenie ex3 dół góra [ustrain]    | 14,53            | -1,04               | -1,03                    | -0,94                           | -0,87                           | -0,80                           | -0,70                           | -0,54                           | -0,39                           | -0,24                           | -0,09                           | 0,45                            | -0,86                                | -0,79                                | 6,54          | 2,57          | 2,57                    |
| 31  | Odkształcenie ex3 dół dół [ustrain]     | 32,57            | 43,43               | 43,37                    | 43,40                           | 43,37                           | 43,34                           | 43,30                           | 43,23                           | 43,16                           | 43,09                           | 43,02                           | 42,72                           | 43,31                                | 43,28                                | 40,91         | 43,07         | 43,07                   |
| 31  | Odkształcenie KLSM góra [ustrain]       | 33,21            | 44,82               | 44,75                    | 44,76                           | 44,72                           | 44,69                           | 44,63                           | 44,54                           | 44,44                           | 44,35                           | 44,25                           | 43,88                           | 44,66                                | 44,63                                | 42,17         | 44,41         | 44,41                   |
| 51  | Odkształcenie KLSM dół [ustrain]        | 44,73            | 79,31               | 79,09                    | 79,10                           | 78,96                           | 78,82                           | 78,61                           | 78,27                           | 77,95                           | 77,63                           | 77,32                           | 76,15                           | 78,74                                | 78,60                                | 65,56         | 74,07         | 74,07                   |
| 51  | Odkształcenie na podłożu góra [ustrain] | 45,13            | 80,34               | 80,12                    | 80,12                           | 79,97                           | 79,82                           | 79,61                           | 79,26                           | 78,92                           | 78,59                           | 78,27                           | 77,06                           | 79,75                                | 79,61                                | 66,43         | 75,05         | 75,05                   |

Tabela Z7. Porównanie rozkładu naprężeń dla KR6 (W2) dla modeli Romanoschi

| z (cm) | KR6 (W2)                                    | Oś obciążenia       |                  |                    |                  |                    |                               |                  |                    |                  |                    | Krawędź obciążenia  |                  |                    |                  |                    |                               |                  |                    |                  |                    |
|--------|---|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
|        |   | Obciążenie normalne |                  |                    |                  |                    | Obciążenie normalne i styczne |                  |                    |                  |                    | Obciążenie normalne |                  |                    |                  |                    | Obciążenie normalne i styczne |                  |                    |                  |                    |
|        |   | pełna<br>szcepność  | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3 N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4 N | pełna<br>szcepność            | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3 N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4 N | pełna<br>szcepność  | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3 N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4 N | pełna<br>szcepność            | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3 N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4 N |
| 0      | Naprężenie<br>$\sigma_{x1}$ góra [MPa]      | -1,072              | -1,260           | -1,211             | -1,270           | -1,260             | 1,277                         | 1,137            | 1,176              | 1,131            | 1,137              | -0,541              | -0,592           | -0,573             | -0,591           | -0,592             | -1,241                        | -1,300           | -1,282             | -1,298           | -1,300             |
| 5      | Naprężenie<br>$\sigma_{x1}$ dół [MPa]       | -0,608              | -0,450           | -0,521             | -0,386           | -0,450             | -0,262                        | -0,095           | -0,169             | -0,029           | -0,095             | -0,430              | -0,320           | -0,377             | -0,264           | -0,320             | -0,504                        | -0,388           | -0,447             | -0,330           | -0,388             |
| 5      | Naprężenie<br>$\sigma_{x2}$ góra [MPa]      | -0,601              | -0,445           | -0,515             | -0,382           | -0,445             | -0,261                        | -0,096           | -0,169             | -0,032           | -0,096             | -0,423              | -0,316           | -0,372             | -0,260           | -0,316             | -0,496                        | -0,383           | -0,441             | -0,325           | -0,383             |
| 13     | Naprężenie<br>$\sigma_{x2}$ dół [MPa]       | -0,109              | 0,699            | 0,416              | 0,890            | 0,699              | -0,055                        | 0,652            | 0,380              | 0,840            | 0,652              | -0,132              | 0,239            | 0,056              | 0,386            | 0,239              | -0,108                        | 0,323            | 0,134              | 0,472            | 0,323              |
| 13     | Naprężenie<br>$\sigma_{x3}$ góra góra [MPa] | -0,112              | -0,963           | -0,663             | -1,162           | -0,963             | -0,058                        | -0,807           | -0,519             | -1,002           | -0,807             | -0,129              | -0,534           | -0,338             | -0,689           | -0,534             | -0,107                        | -0,568           | -0,366             | -0,724           | -0,568             |
| 22     | Naprężenie<br>$\sigma_{x3}$ góra dół [MPa]  | 0,231               | 0,035            | 0,117              | -0,032           | 0,035              | 0,230                         | 0,032            | 0,116              | -0,035           | 0,032              | 0,155               | 0,025            | 0,089              | -0,033           | 0,025              | 0,167                         | 0,033            | 0,098              | -0,026           | 0,033              |
| 22     | Naprężenie<br>$\sigma_{x3}$ dół góra [MPa]  | 0,232               | 0,037            | 0,119              | -0,030           | 0,037              | 0,231                         | 0,034            | 0,117              | -0,034           | 0,034              | 0,155               | 0,026            | 0,090              | -0,032           | 0,026              | 0,168                         | 0,033            | 0,099              | -0,026           | 0,033              |
| 31     | Naprężenie<br>$\sigma_{x3}$ dół dół [MPa]   | 0,653               | 0,929            | 0,836              | 0,976            | 0,929              | 0,603                         | 0,844            | 0,759              | 0,888            | 0,844              | 0,458               | 0,590            | 0,532              | 0,622            | 0,590              | 0,463                         | 0,598            | 0,542              | 0,629            | 0,598              |
| 31     | Naprężenie<br>KŁSM góra [MPa]               | 0,013               | 0,015            | 0,015              | 0,014            | 0,015              | 0,012                         | 0,013            | 0,013              | 0,012            | 0,013              | 0,008               | 0,007            | 0,008              | 0,006            | 0,007              | 0,009                         | 0,008            | 0,008              | 0,007            | 0,008              |
| 51     | Naprężenie<br>KŁSM dół [MPa]                | 0,025               | 0,039            | 0,032              | 0,043            | 0,039              | 0,023                         | 0,037            | 0,031              | 0,041            | 0,037              | 0,021               | 0,031            | 0,026              | 0,035            | 0,031              | 0,020                         | 0,030            | 0,025              | 0,034            | 0,030              |
| 51     | Naprężenie na<br>podłożu góra [MPa]         | 0,000               | 0,001            | 0,001              | 0,001            | 0,001              | 0,000                         | 0,001            | 0,001              | 0,000            | 0,001              | 0,000               | 0,000            | 0,000              | -0,001           | 0,000              | 0,000                         | 0,000            | 0,000              | -0,001           | 0,000              |

Tabela Z8. Porównanie rozkładu odkształceń dla KR6 (W2) dla modeli Romanoschi

| z (cm) | KR6 (W2)                                      | Oś obciążenia       |                  |                    |                  |                    |                               |                  |                    |                  |                    | Krawędź obciążenia  |                  |                    |                  |                    |                               |                  |                    |                  |                    |
|--------|---|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
|        |   | Obciążenie normalne |                  |                    |                  |                    | Obciążenie normalne i styczne |                  |                    |                  |                    | Obciążenie normalne |                  |                    |                  |                    | Obciążenie normalne i styczne |                  |                    |                  |                    |
|        |   | pełna<br>szcepność  | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3 N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4 N | pełna<br>szcepność            | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3 N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4 N | pełna<br>szcepność  | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3 N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4 N | pełna<br>szcepność            | Romanoschi<br>X3 | Romanoschi<br>X3 N | Romanoschi<br>X4 | Romanoschi<br>X4 N |
| 0      | Odkształcenie<br>ex1 góra<br>[ustrain]        | -52,469             | -65,212          | -61,898            | -65,928          | -65,212            | 157,543                       | 149,303          | 151,650            | 149,031          | 149,303            | -26,017             | -27,799          | -26,865            | -27,607          | -27,799            | -88,683                       | -90,955          | -90,204            | -90,582          | -90,955            |
| 5      | Odkształcenie<br>ex1 dół [ustrain]            | -21,924             | -11,683          | -16,404            | -7,386           | -11,683            | 2,170                         | 14,182           | 8,965              | 18,756           | 14,182             | -21,584             | -14,685          | -18,402            | -10,909          | -14,685            | -24,662                       | -17,133          | -21,136            | -13,158          | -17,133            |
| 5      | Odkształcenie<br>ex2 góra<br>[ustrain]        | -21,929             | -11,692          | -16,411            | -7,395           | -11,692            | 2,170                         | 14,179           | 8,963              | 18,752           | 14,179             | -21,556             | -14,656          | -18,373            | -10,881          | -14,656            | -24,635                       | -17,107          | -21,109            | -13,133          | -17,107            |
| 13     | Odkształcenie<br>ex2 dół [ustrain]            | 5,628               | 63,036           | 43,008             | 76,446           | 63,036             | 7,513                         | 57,704           | 38,300             | 71,026           | 57,704             | -4,862              | 15,597           | 3,954              | 25,455           | 15,597             | -0,828                        | 25,078           | 12,733             | 35,242           | 25,078             |
| 13     | Odkształcenie<br>ex3 góra góra<br>[ustrain]   | 5,628               | -54,932          | -33,475            | -69,227          | -54,932            | 7,513                         | -45,533          | -24,806            | -59,672          | -45,533            | -4,834              | -27,573          | -14,870            | -38,111          | -27,573            | -0,799                        | -28,788          | -15,466            | -39,575          | -28,788            |
| 22     | Odkształcenie<br>ex3 góra dół<br>[ustrain]    | 22,154              | 10,971           | 16,119             | 6,544            | 10,971             | 21,534                        | 8,923            | 14,430             | 4,299            | 8,923              | 12,725              | 5,053            | 9,064              | 1,224            | 5,053              | 14,541                        | 6,551            | 10,749             | 2,584            | 6,551              |
| 22     | Odkształcenie<br>ex3 dół góra<br>[ustrain]    | 22,152              | 10,967           | 16,116             | 6,539            | 10,967             | 21,532                        | 8,919            | 14,427             | 4,294            | 8,919              | 12,718              | 5,045            | 9,056              | 1,215            | 5,045              | 14,533                        | 6,542            | 10,741             | 2,574            | 6,542              |
| 31     | Odkształcenie<br>ex3 dół dół<br>[ustrain]     | 48,697              | 69,577           | 62,488             | 73,228           | 69,577             | 44,730                        | 62,193           | 55,894             | 65,484           | 62,193             | 31,718              | 39,863           | 35,946             | 42,169           | 39,863             | 32,569                        | 40,910           | 37,162             | 43,069           | 40,910             |
| 31     | Odkształcenie<br>KLSM góra<br>[ustrain]       | 48,563              | 69,332           | 62,278             | 72,966           | 69,332             | 44,616                        | 61,979           | 55,713             | 65,253           | 61,979             | 32,486              | 41,309           | 37,197             | 43,705           | 41,309             | 33,208                        | 42,169           | 38,241             | 44,413           | 42,169             |
| 51     | Odkształcenie<br>KLSM dół<br>[ustrain]        | 54,289              | 84,474           | 70,706             | 94,768           | 84,474             | 51,921                        | 80,714           | 67,381             | 90,779           | 80,714             | 45,633              | 66,893           | 56,170             | 75,546           | 66,893             | 44,727                        | 65,561           | 55,048             | 74,074           | 65,561             |
| 51     | Odkształcenie na<br>podłożu góra<br>[ustrain] | 54,336              | 84,527           | 70,753             | 94,831           | 84,527             | 51,970                        | 80,769           | 67,430             | 90,843           | 80,769             | 46,099              | 67,856           | 56,948             | 76,616           | 67,856             | 45,133                        | 66,433           | 55,743             | 75,049           | 66,433             |

Tabela Z9. Porównanie trwałości warstwy wiążącej BA 2 i warstwy podbudowy BA3 dla KR6 (W2) dla modeli Romanoschi

| Przypadek                          | X,Y,Z(0;0;Z)        |                 |               |                 |               |                               |               |                 |                          |               | X,Y,Z(r;0;Z)        |               |                 |               |                               |               |                 |                          |  |
|------------------------------------|---------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-------------------------------|---------------|-----------------|--------------------------|---------------|---------------------|---------------|-----------------|---------------|-------------------------------|---------------|-----------------|--------------------------|--|
|                                    | obciążenie normalne |                 |               |                 |               | obciążenie normalne i styczne |               |                 |                          |               | obciążenie normalne |               |                 |               | obciążenie normalne i styczne |               |                 |                          |  |
|                                    | Romanoschi X3       | Romanoschi X3 N | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N               | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N | Romanoschi X4 odrywani e | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N     | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N | Romanoschi X3 | Romanoschi X3 N               | Romanoschi X4 | Romanoschi X4 N | Romanoschi X4 odrywani e |  |
| Odształcenie BA2 dół [strain]      | 6,30E-05            | 4,30E-05        | 7,64E-05      | 6,30E-05        | 5,77E-05      | 3,83E-05                      | 7,10E-05      | 5,77E-05        | 7,10E-05                 | 1,56E-05      | 3,95E-06            | 2,55E-05      | 1,56E-05        | 2,51E-05      | 1,27E-05                      | 3,52E-05      | 2,51E-05        | 3,52E-05                 |  |
| Odształcenie BA2 dół [μstrain]     | 63,0                | 43,0            | 76,4          | 63,0            | 57,7          | 38,3                          | 71,0          | 57,7            | 71,0                     | 15,6          | 4,0                 | 25,5          | 15,6            | 25,1          | 12,7                          | 35,2          | 25,1            | 35,2                     |  |
| Trwałość BA2 dół [mln osi]         | 10,64               | 37,43           | 5,64          | 10,64           | 14,23         | 54,82                         | 7,18          | 14,23           | 7,18                     | 1 054,43      | 96<br>471,29        | 210,34        | 1 054,43        | 220,90        | 2 055,96                      | 72,09         | 220,90          | 72,09                    |  |
| Odształcenie BA3 dół-dół [strain]  | 6,96E-05            | 6,25E-05        | 7,32E-05      | 6,96E-05        | 6,22E-05      | 5,59E-05                      | 6,55E-05      | 6,22E-05        | 6,55E-05                 | 3,99E-05      | 3,59E-05            | 4,22E-05      | 3,99E-05        | 4,09E-05      | 3,72E-05                      | 4,31E-05      | 4,09E-05        | 4,31E-05                 |  |
| Odształcenie BA3 dół-dół [μstrain] | 69,6                | 62,5            | 73,2          | 69,6            | 62,2          | 55,9                          | 65,5          | 62,2            | 65,5                     | 39,9          | 35,9                | 42,2          | 39,9            | 40,9          | 37,2                          | 43,1          | 40,9            | 43,1                     |  |
| Trwałość BA3 dół-dół [mln osi]     | 4,21                | 6,00            | 3,56          | 4,21            | 6,09          | 8,66                          | 5,14          | 6,09            | 5,14                     | 26,33         | 37,00               | 21,88         | 26,33           | 24,17         | 33,16                         | 20,41         | 24,17           | 20,41                    |  |

Tabela Z10. Wpływ współczynnika tarcia na naprężenia poziome i ścinające oraz na odkształcenia poziome na spodzie warstw BA2 i BA3 dla KR6 (W2).  
Obciążenie poziome, oś obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 2 -DÓŁ                |                            |                              |                                    | BA3 -DÓŁ - DÓŁ           |                            |                              |                                    |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|                      | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain |
| Poślizg z odrywaniem | 1,020                    | 3,63E-05                   | 8,56E-05                     | 85,61                              | 0,989                    | 9,01E-05                   | 7,43E-05                     | 74,28                              |
| 0,3                  | 0,999                    | 2,94E-05                   | 8,41E-05                     | 84,11                              | 0,983                    | 8,88E-05                   | 7,38E-05                     | 73,83                              |
| 0,5                  | 0,985                    | 2,50E-05                   | 8,31E-05                     | 83,13                              | 0,979                    | 8,80E-05                   | 7,35E-05                     | 73,54                              |
| 0,7                  | 0,971                    | 2,08E-05                   | 8,21E-05                     | 82,13                              | 0,975                    | 8,72E-05                   | 7,32E-05                     | 73,20                              |
| 1,0                  | 0,952                    | 1,46E-05                   | 8,08E-05                     | 80,77                              | 0,970                    | 8,60E-05                   | 7,28E-05                     | 72,84                              |
| 1,5                  | 0,921                    | 4,96E-06                   | 7,85E-05                     | 78,54                              | 0,961                    | 8,41E-05                   | 7,22E-05                     | 72,17                              |
| 2,0                  | 0,891                    | -3,99E-06                  | 7,64E-05                     | 76,41                              | 0,952                    | 8,23E-05                   | 7,15E-05                     | 71,52                              |
| 2,5                  | 0,862                    | -1,23E-05                  | 7,44E-05                     | 74,38                              | 0,944                    | 8,06E-05                   | 7,09E-05                     | 70,90                              |
| 3,0                  | 0,835                    | -2,01E-05                  | 7,25E-05                     | 72,45                              | 0,936                    | 7,90E-05                   | 7,03E-05                     | 70,31                              |
| 5,0                  | 0,738                    | -4,61E-05                  | 6,56E-05                     | 65,57                              | 0,908                    | 7,32E-05                   | 6,82E-05                     | 68,16                              |
| Pełna szczepność     | -0,109                   | -1,70E-05                  | 5,63E-06                     | 5,63                               | 0,653                    | 4,73E-05                   | 4,87E-05                     | 48,70                              |

Tabela Z11. Wpływ współczynnika tarcia na naprężenia poziome i ścinające oraz na odkształcenia poziome na spodzie warstw BA2 i BA3 dla KR6 (W2).  
Obciążenie poziome i styczne, oś obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 2 -DÓŁ                |                            |                              |                                    | BA3 -DÓŁ - DÓŁ           |                            |                              |                                    |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|                      | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain |
| Poślizg z odrywaniem | 0,970                    | 6,36E-06                   | 8,03E-05                     | 80,27                              | 0,899                    | 7,20E-05                   | 6,63E-05                     | 66,30                              |
| 0,3                  | 0,951                    | 2,05E-06                   | 7,88E-05                     | 78,80                              | 0,894                    | 7,09E-05                   | 6,59E-05                     | 65,93                              |
| 0,5                  | 0,938                    | -7,11E-07                  | 7,78E-05                     | 77,85                              | 0,890                    | 7,02E-05                   | 6,57E-05                     | 65,67                              |
| 0,7                  | 0,925                    | -3,39E-06                  | 7,69E-05                     | 76,92                              | 0,887                    | 6,95E-05                   | 6,54E-05                     | 65,41                              |
| 1,0                  | 0,907                    | -7,27E-06                  | 7,56E-05                     | 75,56                              | 0,882                    | 6,85E-05                   | 6,50E-05                     | 65,04                              |
| 1,5                  | 0,878                    | -1,33E-05                  | 7,34E-05                     | 73,39                              | 0,873                    | 6,69E-05                   | 6,44E-05                     | 64,44                              |
| 2,0                  | 0,850                    | -1,90E-05                  | 7,13E-05                     | 71,34                              | 0,865                    | 6,53E-05                   | 6,39E-05                     | 63,87                              |
| 2,5                  | 0,824                    | -2,43E-05                  | 6,94E-05                     | 69,39                              | 0,858                    | 6,38E-05                   | 6,33E-05                     | 63,32                              |
| 3,0                  | 0,799                    | -2,91E-05                  | 6,75E-05                     | 67,53                              | 0,851                    | 6,24E-05                   | 6,28E-05                     | 62,79                              |
| 5,0                  | 0,709                    | -4,56E-05                  | 6,10E-05                     | 60,97                              | 0,824                    | 5,75E-05                   | 6,09E-05                     | 60,90                              |
| Pełna szczepność     | -0,055                   | -5,53E-02                  | 7,51E-06                     | 7,51                               | 0,603                    | 3,69E-05                   | 4,47E-05                     | 44,73                              |



Tabela Z12. Wpływ współczynnika tarcia na naprężenia poziome i ścinające oraz na odkształcenia poziome na spodzie warstw BA2 i BA3 dla KR6 (W2).  
Obciążenie poziome, krawędź obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 2 -DÓŁ                |                            |                              |                                    | BA3 -DÓŁ - DÓŁ           |                            |                              |                                    |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|                      | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain |
| Poślizg z odrywaniem | 0,498                    | -8,08E-03                  | 3,30E-05                     | 33,04                              | 0,627                    | -4,48E-03                  | 4,26E-05                     | 42,61                              |
| 0,3                  | 0,497                    | -7,87E-03                  | 3,32E-05                     | 33,25                              | 0,627                    | -4,42E-03                  | 4,26E-05                     | 42,65                              |
| 0,5                  | 0,496                    | -7,73E-03                  | 3,34E-05                     | 33,35                              | 0,626                    | -4,39E-03                  | 4,26E-05                     | 42,63                              |
| 0,7                  | 0,496                    | -7,60E-03                  | 3,34E-05                     | 33,45                              | 0,626                    | -4,35E-03                  | 4,26E-05                     | 42,61                              |
| 1,0                  | 0,495                    | -7,41E-03                  | 3,36E-05                     | 33,59                              | 0,625                    | -4,30E-03                  | 4,26E-05                     | 42,59                              |
| 1,5                  | 0,493                    | -7,10E-03                  | 3,38E-05                     | 33,79                              | 0,623                    | -4,21E-03                  | 4,25E-05                     | 42,54                              |
| 2,0                  | 0,490                    | -6,80E-03                  | 3,40E-05                     | 33,97                              | 0,621                    | -4,13E-03                  | 4,25E-05                     | 42,49                              |
| 2,5                  | 0,488                    | -6,52E-03                  | 3,41E-05                     | 34,12                              | 0,619                    | -4,06E-03                  | 4,24E-05                     | 42,44                              |
| 3,0                  | 0,486                    | -6,26E-03                  | 3,43E-05                     | 34,25                              | 0,618                    | -3,98E-03                  | 4,24E-05                     | 42,39                              |
| 5,0                  | 0,475                    | -5,33E-03                  | 3,46E-05                     | 34,58                              | 0,612                    | -3,72E-03                  | 4,22E-05                     | 42,18                              |
| Pełna szczepność     | -0,132                   | -1,71E-03                  | -4,86E-06                    | -4,86                              | 0,458                    | -2,39E-03                  | 3,17E-05                     | 31,70                              |

Tabela Z13. Wpływ współczynnika tarcia na naprężenia poziome i ścinające oraz na odkształcenia poziome na spodzie warstw BA2 i BA3 dla KR6 (W2).  
Obciążenie poziome i styczne, krawędź obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 2 -DÓŁ                |                            |                              |                                    | BA3 -DÓŁ - DÓŁ           |                            |                              |                                    |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|                      | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain |
| Poślizg z odrywaniem | 0,586                    | -7,68E-03                  | 4,31E-05                     | 43,10                              | 0,634                    | -3,96E-03                  | 4,34E-05                     | 43,43                              |
| 0,3                  | 0,583                    | -7,47E-03                  | 4,31E-05                     | 43,10                              | 0,633                    | -3,91E-03                  | 4,34E-05                     | 43,40                              |
| 0,5                  | 0,581                    | -7,33E-03                  | 4,31E-05                     | 43,09                              | 0,632                    | -3,88E-03                  | 4,34E-05                     | 43,37                              |
| 0,7                  | 0,580                    | -7,19E-03                  | 4,31E-05                     | 43,08                              | 0,631                    | -3,84E-03                  | 4,33E-05                     | 43,34                              |
| 1,0                  | 0,577                    | -6,99E-03                  | 4,31E-05                     | 43,06                              | 0,630                    | -3,79E-03                  | 4,33E-05                     | 43,30                              |
| 1,5                  | 0,572                    | -6,67E-03                  | 4,30E-05                     | 43,01                              | 0,628                    | -3,71E-03                  | 4,32E-05                     | 43,23                              |
| 2,0                  | 0,567                    | -6,38E-03                  | 4,29E-05                     | 42,93                              | 0,626                    | -3,64E-03                  | 4,32E-05                     | 43,16                              |
| 2,5                  | 0,562                    | -6,10E-03                  | 4,28E-05                     | 42,84                              | 0,624                    | -3,57E-03                  | 4,31E-05                     | 43,09                              |
| 3,0                  | 0,557                    | -5,83E-03                  | 4,27E-05                     | 42,73                              | 0,622                    | -3,50E-03                  | 4,30E-05                     | 43,02                              |
| 5,0                  | 0,536                    | -4,90E-03                  | 4,22E-05                     | 42,16                              | 0,614                    | -3,25E-03                  | 4,27E-05                     | 42,72                              |
| Pełna szczepność     | -0,108                   | -1,79E-03                  | -8,28E-07                    | -0,83                              | 0,463                    | -2,07E-03                  | 3,26E-05                     | 32,57                              |

Tabela Z14. Wpływ współczynnika tarcia na trwałość warstwy wiążącej BA2 i warstwy podbudowy BA3 dla KR6 (W2).  
Obciążenie poziome, oś obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 2 -DÓŁ                    |                                    |                  | BA3 -DÓŁ - DÓŁ               |                                    |                  |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|
|                      | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi |
| Poślizg z odrywaniem | 8,56E-05                     | 85,6                               | 3,88             | 7,43E-05                     | 74,3                               | 3,39             |
| 0,3                  | 8,41E-05                     | 84,1                               | 4,12             | 7,38E-05                     | 73,8                               | 3,46             |
| 0,5                  | 8,31E-05                     | 83,1                               | 4,29             | 7,35E-05                     | 73,5                               | 3,52             |
| 0,7                  | 8,21E-05                     | 82,1                               | 4,45             | 7,32E-05                     | 73,2                               | 3,56             |
| 1,0                  | 8,08E-05                     | 80,8                               | 4,70             | 7,28E-05                     | 72,8                               | 3,62             |
| 1,5                  | 7,85E-05                     | 78,5                               | 5,16             | 7,22E-05                     | 72,2                               | 3,73             |
| 2,0                  | 7,64E-05                     | 76,4                               | 5,65             | 7,15E-05                     | 71,5                               | 3,85             |
| 2,5                  | 7,44E-05                     | 74,4                               | 6,17             | 7,09E-05                     | 70,9                               | 3,96             |
| 3,0                  | 7,25E-05                     | 72,5                               | 6,73             | 7,03E-05                     | 70,3                               | 4,07             |
| 5,0                  | 6,56E-05                     | 65,6                               | 9,34             | 6,82E-05                     | 68,2                               | 4,51             |
| Pełna szczepność     | 5,63E-06                     | 5,6                                | 30 195,69        | 4,87E-05                     | 48,7                               | 13,62            |

Tabela Z15. Wpływ współczynnika tarcia na trwałość warstwy wiążącej BA2 i warstwy podbudowy BA3 dla KR6 (W2).  
Obciążenie poziome i styczne, oś obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 2 -DÓŁ                    |                                    |                  | BA3 -DÓŁ - DÓŁ               |                                    |                  |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|
|                      | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi |
| Poślizg z odrywaniem | 8,03E-05                     | 80,3                               | 4,80             | 6,63E-05                     | 66,3                               | 4,93             |
| 0,3                  | 7,88E-05                     | 78,8                               | 5,10             | 7,38E-05                     | 73,8                               | 3,46             |
| 0,5                  | 7,78E-05                     | 77,8                               | 5,31             | 7,35E-05                     | 73,5                               | 3,52             |
| 0,7                  | 7,69E-05                     | 76,9                               | 5,53             | 7,32E-05                     | 73,2                               | 3,56             |
| 1,0                  | 7,56E-05                     | 75,6                               | 5,86             | 7,28E-05                     | 72,8                               | 3,62             |
| 1,5                  | 7,34E-05                     | 73,4                               | 6,45             | 7,22E-05                     | 72,2                               | 3,73             |
| 2,0                  | 7,13E-05                     | 71,3                               | 7,08             | 7,15E-05                     | 71,5                               | 3,85             |
| 2,5                  | 6,94E-05                     | 69,4                               | 7,76             | 7,09E-05                     | 70,9                               | 3,96             |
| 3,0                  | 6,75E-05                     | 67,5                               | 8,48             | 7,03E-05                     | 70,3                               | 4,07             |
| 5,0                  | 6,10E-05                     | 61,0                               | 11,87            | 6,82E-05                     | 68,2                               | 4,51             |
| Pełna szczepność     | 7,51E-06                     | 7,5                                | 11 669,00        | 4,47E-05                     | 44,7                               | 18,02            |

Tabela Z16. Wpływ współczynnika tarcia na trwałość warstwy wiążącej BA2 i warstwy podbudowy BA3 dla KR6 (W2).  
Obciążenie poziome, krawędź obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 2 -DÓŁ                    |                                    |                  | BA3 -DÓŁ - DÓŁ               |                                    |                  |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|
|                      | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi |
| Poślizg z odrywaniem | 3,30E-05                     | 33,0                               | 89,17            | 4,26E-05                     | 42,6                               | 21,15            |
| 0,3                  | 3,32E-05                     | 33,2                               | 87,32            | 4,26E-05                     | 42,6                               | 21,08            |
| 0,5                  | 3,34E-05                     | 33,4                               | 86,44            | 4,26E-05                     | 42,6                               | 21,11            |
| 0,7                  | 3,34E-05                     | 33,4                               | 85,61            | 4,26E-05                     | 42,6                               | 21,14            |
| 1,0                  | 3,36E-05                     | 33,6                               | 84,46            | 4,26E-05                     | 42,6                               | 21,18            |
| 1,5                  | 3,38E-05                     | 33,8                               | 82,78            | 4,25E-05                     | 42,5                               | 21,25            |
| 2,0                  | 3,40E-05                     | 34,0                               | 81,36            | 4,25E-05                     | 42,5                               | 21,33            |
| 2,5                  | 3,41E-05                     | 34,1                               | 80,17            | 4,24E-05                     | 42,4                               | 21,41            |
| 3,0                  | 3,43E-05                     | 34,3                               | 79,17            | 4,24E-05                     | 42,4                               | 21,50            |
| 5,0                  | 3,46E-05                     | 34,6                               | 76,72            | 4,22E-05                     | 42,2                               | 21,85            |
| Pełna szczepność     | -4,86E-06                    | -4,9                               | -                | 3,17E-05                     | 31,7                               | 55,96            |

Tabela Z17. Wpływ współczynnika tarcia na trwałość warstwy wiążącej BA2 i warstwy podbudowy BA3 dla KR6 (W2).  
Obciążenie poziome i styczne, krawędź obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 2 -DÓŁ                    |                                    |                  | BA3 -DÓŁ - DÓŁ               |                                    |                  |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|
|                      | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi |
| Poślizg z odrywaniem | 4,31E-05                     | 43,1                               | 37,18            | 4,34E-05                     | 43,4                               | 19,85            |
| 0,3                  | 4,31E-05                     | 43,1                               | 37,18            | 4,34E-05                     | 43,4                               | 19,91            |
| 0,5                  | 4,31E-05                     | 43,1                               | 37,19            | 4,34E-05                     | 43,4                               | 19,95            |
| 0,7                  | 4,31E-05                     | 43,1                               | 37,22            | 4,33E-05                     | 43,3                               | 19,99            |
| 1,0                  | 4,31E-05                     | 43,1                               | 37,29            | 4,33E-05                     | 43,3                               | 20,05            |
| 1,5                  | 4,30E-05                     | 43,0                               | 37,44            | 4,32E-05                     | 43,2                               | 20,16            |
| 2,0                  | 4,29E-05                     | 42,9                               | 37,65            | 4,32E-05                     | 43,2                               | 20,26            |
| 2,5                  | 4,28E-05                     | 42,8                               | 37,92            | 4,31E-05                     | 43,1                               | 20,37            |
| 3,0                  | 4,27E-05                     | 42,7                               | 38,24            | 4,30E-05                     | 43,0                               | 20,49            |
| 5,0                  | 4,22E-05                     | 42,2                               | 39,98            | 4,27E-05                     | 42,7                               | 20,96            |
| Pełna szczepność     | -8,28E-07                    | -0,8                               | -                | 3,26E-05                     | 32,6                               | 51,19            |

Tabela Z19. Zestawienie naprężeń poziomych dla KR6 (W8) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego w osi obciążenia

**Obciążenie normalne, oś obciążenia**

| Głębokość z (cm) | KR6 (W8)                                 | pełna szczepność | poślizg (odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,5$ ; odrywanie) | Romanoschi X3, odrywanie | Romanoschi X4, odrywanie |
|------------------|--|------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0                | Naprężenie $\sigma_{x1}$ góra [MPa]      | -1,072           | -1,433              | -1,428                          | -1,426                          | -1,420                          | -1,337                   | -1,400                   |
| 5                | Naprężenie $\sigma_{x1}$ dół [MPa]       | -0,608           | -0,698              | -0,697                          | -0,697                          | -0,695                          | -0,687                   | -0,700                   |
| 5                | Naprężenie $\sigma_{x2}$ góra [MPa]      | -0,601           | -0,689              | -0,688                          | -0,687                          | -0,685                          | -0,678                   | -0,690                   |
| 13               | Naprężenie $\sigma_{x2}$ dół [MPa]       | -0,109           | 0,200               | 0,196                           | 0,195                           | 0,189                           | 0,082                    | 0,146                    |
| 13               | Naprężenie $\sigma_{x3}$ góra góra [MPa] | -0,112           | 0,185               | 0,181                           | 0,180                           | 0,174                           | 0,072                    | 0,133                    |
| 22               | Naprężenie $\sigma_{x3}$ góra dół [MPa]  | 0,231            | 1,133               | 1,121                           | 1,116                           | 1,097                           | 0,859                    | 1,018                    |
| 22               | Naprężenie $\sigma_{x3}$ dół góra [MPa]  | 0,232            | -0,645              | -0,633                          | -0,628                          | -0,610                          | -0,354                   | -0,516                   |
| 31               | Naprężenie $\sigma_{x3}$ dół dół [MPa]   | 0,653            | 0,431               | 0,433                           | 0,434                           | 0,437                           | 0,556                    | 0,496                    |
| 31               | Naprężenie KŁSM góra [MPa]               | 0,013            | -0,005              | -0,005                          | -0,005                          | -0,005                          | 0,003                    | -0,001                   |
| 51               | Naprężenie KŁSM dół [MPa]                | 0,025            | 0,034               | 0,034                           | 0,034                           | 0,033                           | 0,032                    | 0,033                    |
| 51               | Naprężenie na podłożu góra [MPa]         | 0,000            | -0,002              | -0,002                          | -0,002                          | -0,002                          | 0,000                    | -0,001                   |

Tabela Z20. Zestawienie naprężeń poziomych dla KR6 (W8) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego na krawędzi obciążenia

**Obciążenie normalne, krawędź obciążenia**

| Głębokość z (cm) | KR6 (W8)                                 | pełna szczepność | poślizg (odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,5$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=0,7$ ; odrywanie) | tarcie ( $\mu=1,5$ ; odrywanie) | Romanoschi X3, odrywanie | Romanoschi X4, odrywanie |
|------------------|--|------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0                | Naprężenie $\sigma_{x1}$ góra [MPa]      | -0,541           | -0,778              | -0,775                          | -0,774                          | -0,771                          | -0,701                   | -0,751                   |
| 5                | Naprężenie $\sigma_{x1}$ dół [MPa]       | -0,430           | -0,480              | -0,479                          | -0,479                          | -0,478                          | -0,474                   | -0,483                   |
| 5                | Naprężenie $\sigma_{x2}$ góra [MPa]      | -0,423           | -0,472              | -0,471                          | -0,471                          | -0,470                          | -0,467                   | -0,475                   |
| 13               | Naprężenie $\sigma_{x2}$ dół [MPa]       | -0,132           | 0,105               | 0,102                           | 0,101                           | 0,097                           | -0,001                   | 0,055                    |
| 13               | Naprężenie $\sigma_{x3}$ góra góra [MPa] | -0,129           | 0,097               | 0,095                           | 0,094                           | 0,090                           | -0,003                   | 0,050                    |
| 22               | Naprężenie $\sigma_{x3}$ góra dół [MPa]  | 0,155            | 0,726               | 0,721                           | 0,718                           | 0,710                           | 0,498                    | 0,625                    |
| 22               | Naprężenie $\sigma_{x3}$ dół góra [MPa]  | 0,155            | -0,414              | -0,409                          | -0,406                          | -0,398                          | -0,165                   | -0,298                   |
| 31               | Naprężenie $\sigma_{x3}$ dół dół [MPa]   | 0,458            | 0,239               | 0,242                           | 0,243                           | 0,246                           | 0,359                    | 0,302                    |
| 31               | Naprężenie KŁSM góra [MPa]               | 0,008            | -0,008              | -0,007                          | -0,007                          | -0,007                          | 0,000                    | -0,004                   |
| 51               | Naprężenie KŁSM dół [MPa]                | 0,021            | 0,027               | 0,027                           | 0,027                           | 0,026                           | 0,025                    | 0,027                    |
| 51               | Naprężenie na podłożu góra [MPa]         | 0,000            | -0,003              | -0,003                          | -0,003                          | -0,003                          | -0,001                   | -0,002                   |

Tabela Z21. Zestawienie odkształceń poziomych dla KR6 (W8) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego w osi obciążenia

**Obciążenie normalne, oś obciążenia**

| Głębokość z (cm) | KR6 (W8)  | pełna<br>sczeplność | poślizg<br>(odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | Romanoschi<br>X3,<br>odrywanie | Romanoschi<br>X4,<br>odrywanie |
|------------------|---|---------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0                | Odkształcenie $\epsilon x1$ góra [ $\mu$ strain]      | -52,469             | -76,973                | -76,673                               | -76,554                               | -76,094                               | -70,462                        | -74,739                        |
| 5                | Odkształcenie $\epsilon x1$ dół [ $\mu$ strain]       | -21,924             | -28,735                | -28,645                               | -28,610                               | -28,472                               | -27,876                        | -28,792                        |
| 5                | Odkształcenie $\epsilon x2$ góra [ $\mu$ strain]      | -21,929             | -28,743                | -28,653                               | -28,618                               | -28,480                               | -27,883                        | -28,799                        |
| 13               | Odkształcenie $\epsilon x2$ dół [ $\mu$ strain]       | 5,628               | 24,378                 | 24,176                                | 24,096                                | 23,786                                | 16,561                         | 20,755                         |
| 13               | Odkształcenie $\epsilon x3$ góra góra [ $\mu$ strain] | 5,628               | 24,376                 | 24,173                                | 24,094                                | 23,784                                | 16,559                         | 20,753                         |
| 22               | Odkształcenie $\epsilon x3$ góra dół [ $\mu$ strain]  | 22,154              | 86,545                 | 85,678                                | 85,336                                | 84,000                                | 66,717                         | 78,212                         |
| 22               | Odkształcenie $\epsilon x3$ dół góra [ $\mu$ strain]  | 22,152              | -43,142                | -42,254                               | -41,904                               | -40,536                               | -21,820                        | -33,713                        |
| 31               | Odkształcenie $\epsilon x3$ dół dół [ $\mu$ strain]   | 48,697              | 33,223                 | 33,356                                | 33,409                                | 33,612                                | 42,122                         | 37,843                         |
| 31               | Odkształcenie KŁSM góra [ $\mu$ strain]               | 48,563              | 33,043                 | 33,178                                | 33,230                                | 33,435                                | 41,949                         | 37,666                         |
| 51               | Odkształcenie KŁSM dół [ $\mu$ strain]                | 54,289              | 78,973                 | 78,679                                | 78,563                                | 78,113                                | 71,838                         | 76,593                         |
| 51               | Odkształcenie na podłożu góra [ $\mu$ strain]         | 54,336              | 79,051                 | 78,756                                | 78,641                                | 78,191                                | 71,894                         | 76,660                         |

Tabela Z22. Zestawienie odkształceń poziomych dla KR6 (W8) w osi obciążenia dla obciążenia normalnego na krawędzi obciążenia

**Obciążenie normalne, krawędź obciążenia**

| Głębokość z (cm) | KR6 (W8)  | pełna<br>sczepność | poślizg<br>(odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,5$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=0,7$ ;<br>odrywanie) | tarcie<br>( $\mu=1,5$ ;<br>odrywanie) | Romanoschi<br>X3,<br>odrywanie | Romanoschi<br>X4,<br>odrywanie |
|------------------|---|--------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0                | Odkształcenie $\epsilon x1$ góra [ $\mu$ strain]      | -26,017            | -40,638                | -40,484                               | -40,424                               | -40,190                               | -35,639                        | -38,859                        |
| 5                | Odkształcenie $\epsilon x1$ dół [ $\mu$ strain]       | -21,584            | -24,751                | -24,718                               | -24,705                               | -24,656                               | -24,401                        | -24,951                        |
| 5                | Odkształcenie $\epsilon x2$ góra [ $\mu$ strain]      | -21,556            | -24,727                | -24,695                               | -24,682                               | -24,633                               | -24,376                        | -24,927                        |
| 13               | Odkształcenie $\epsilon x2$ dół [ $\mu$ strain]       | -4,862             | 9,759                  | 9,596                                 | 9,531                                 | 9,281                                 | 2,802                          | 6,419                          |
| 13               | Odkształcenie $\epsilon x3$ góra góra [ $\mu$ strain] | -4,834             | 9,781                  | 9,617                                 | 9,553                                 | 9,302                                 | 2,825                          | 6,441                          |
| 22               | Odkształcenie $\epsilon x3$ góra dół [ $\mu$ strain]  | 12,725             | 49,717                 | 49,389                                | 49,262                                | 48,768                                | 33,606                         | 42,512                         |
| 22               | Odkształcenie $\epsilon x3$ dół góra [ $\mu$ strain]  | 12,718             | -25,079                | -24,755                               | -24,629                               | -24,141                               | -7,389                         | -16,762                        |
| 31               | Odkształcenie $\epsilon x3$ dół dół [ $\mu$ strain]   | 31,718             | 16,190                 | 16,378                                | 16,452                                | 16,742                                | 24,662                         | 20,637                         |
| 31               | Odkształcenie KŁSM góra [ $\mu$ strain]               | 32,486             | 17,299                 | 17,483                                | 17,555                                | 17,837                                | 25,723                         | 21,732                         |
| 51               | Odkształcenie KŁSM dół [ $\mu$ strain]                | 45,633             | 62,514                 | 62,325                                | 62,250                                | 61,962                                | 56,767                         | 60,553                         |
| 51               | Odkształcenie na podłożu góra [ $\mu$ strain]         | 46,099             | 63,491                 | 63,295                                | 63,219                                | 62,921                                | 57,628                         | 61,491                         |

Tabela Z23. Wpływ współczynnika tarcia na naprężenia poziome i ścinające oraz na odkształcenia poziome na spodzie warstw BA2 i BA3 dla KR6 (W8).  
Obciążenie pionowe, oś obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 3 -GÓRA -DÓŁ          |                            |                              |                                    | BA3 -DÓŁ - DÓŁ           |                            |                              |                                    |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|                      | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain |
| Poślizg z odrywaniem | 1,020                    | 3,63E-05                   | 8,56E-05                     | 85,61                              | 0,989                    | 9,01E-05                   | 7,43E-05                     | 74,28                              |
| 0,5                  | 1,121                    | 4,33E-05                   | 8,57E-05                     | 85,68                              | 0,433                    | 5,18E-05                   | 3,34E-05                     | 33,36                              |
| 0,7                  | 1,116                    | 4,23E-05                   | 8,53E-05                     | 85,34                              | 0,434                    | 5,17E-05                   | 3,34E-05                     | 33,41                              |
| 1,5                  | 1,097                    | 3,84E-05                   | 8,40E-05                     | 84,00                              | 0,437                    | 5,13E-05                   | 3,36E-05                     | 33,61                              |
| Pełna szczepność     | 0,231                    | -7,44E-06                  | 2,22E-05                     | 22,15                              | 0,653                    | 4,73E-05                   | 4,87E-05                     | 48,70                              |

Tabela Z24. Wpływ współczynnika tarcia na naprężenia poziome i ścinające oraz na odkształcenia poziome na spodzie warstw BA2 i BA3 dla KR6 (W8).  
Obciążenie pionowe, krawędź obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 3 -GÓRA -DÓŁ          |                            |                              |                                    | BA3 -DÓŁ - DÓŁ           |                            |                              |                                    |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|                      | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Naprężenie poziome (MPa) | Naprężenie ścinające (MPa) | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain |
| Poślizg z odrywaniem | 0,726                    | -5,11E-03                  | 4,97E-05                     | 49,72                              | 0,239                    | -2,43E-03                  | 1,62E-05                     | 16,19                              |
| 0,5                  | 0,721                    | -5,01E-03                  | 4,94E-05                     | 49,39                              | 0,242                    | -2,42E-03                  | 1,64E-05                     | 16,38                              |
| 0,7                  | 0,718                    | -4,97E-03                  | 4,93E-05                     | 49,26                              | 0,243                    | -2,42E-03                  | 1,65E-05                     | 16,45                              |
| 1,5                  | 0,710                    | -4,82E-03                  | 4,88E-05                     | 48,77                              | 0,246                    | -2,41E-03                  | 1,67E-05                     | 16,74                              |
| Pełna szczepność     | 0,155                    | -1,31E-03                  | 1,27E-05                     | 12,73                              | 0,458                    | -2,39E-03                  | 3,17E-05                     | 31,70                              |



Tabela Z25. Wpływ współczynnika tarcia na trwałość warstwy wiążącej BA2 i warstwy podbudowy BA3 dla KR6 (W8).  
Obciążenie pionowe, oś obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 3 -GÓRA -DÓŁ              |                                    |                  | BA3 -DÓŁ - DÓŁ               |                                    |                  |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|
|                      | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi |
| Poślizg z odrywaniem | 8,65E-05                     | 86,5                               | 3,75             | 3,32E-05                     | 33,2                               | 47,95            |
| 0,5                  | 8,57E-05                     | 85,7                               | 3,87             | 3,34E-05                     | 33,4                               | 47,32            |
| 0,7                  | 8,53E-05                     | 85,3                               | 3,93             | 3,34E-05                     | 33,4                               | 47,08            |
| 1,5                  | 8,40E-05                     | 84,0                               | 4,14             | 3,36E-05                     | 33,6                               | 46,15            |
| Pełna szepność       | 2,22E-05                     | 22,2                               | 332,21           | 4,87E-05                     | 48,7                               | 13,62            |

Tabela Z26. Wpływ współczynnika tarcia na trwałość warstwy wiążącej BA2 i warstwy podbudowy BA3 dla KR6 (W8).  
Obciążenie pionowe, krawędź obciążenia

| Współczynnik tarcia  | BA 3 -GÓRA -DÓŁ              |                                    |                  | BA3 -DÓŁ - DÓŁ               |                                    |                  |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|
|                      | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi | Odkształcenie poziome strain | Odkształcenie poziome $\mu$ strain | Trwałość mln osi |
| Poślizg z odrywaniem | 4,97E-05                     | 49,7                               | 23,23            | 1,62E-05                     | 16,2                               | 510,82           |
| 0,5                  | 4,94E-05                     | 49,4                               | 23,74            | 1,64E-05                     | 16,4                               | 491,72           |
| 0,7                  | 4,93E-05                     | 49,3                               | 23,95            | 1,65E-05                     | 16,5                               | 484,46           |
| 1,5                  | 4,88E-05                     | 48,8                               | 24,75            | 1,67E-05                     | 16,7                               | 457,41           |
| Pełna szepność       | 1,27E-05                     | 12,7                               | -                | 3,17E-05                     | 31,7                               | 55,85            |