

Politechnika Śląska  
Wydział Budownictwa  
Katedra Geotechniki i Dróg

Rada dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

**mgr inż. Sebastian Syma**

Rozprawa doktorska

ANALIZA ZALEŻNOŚCI MODUŁÓW ODKSZTAŁCENIA  
KONSTRUKCJI DROGOWYCH  
W METODACH STATYCZNEJ I DYNAMICZNEJ

Analysis of correlations between deformation modules  
of road structures in static and dynamic methods

Promotor:

**prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka**

Promotor pomocniczy:

**dr hab. inż. Marian Łupieżowiec, prof. PŚ**

GLIWICE, czerwiec 2023

*Pracę dedykuję Sylwii i Frankowi  
oraz Bobkowi i Karmelce*

## Spis treści

STRESZCZENIE.....	6
ABSTRACT.....	7
1. WPROWADZENIE.....	8
2. PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ LEKKIEJ PŁYTY DYNAMICZNEJ ORAZ PŁYTY STATYCZNEJ VSS W POLSCE I NA ŚWIECIE.....	12
3. DROGI ICH PODZIAŁ I BUDOWA.....	22
3.1 KLASYFIKACJA DRÓG.....	22
3.2 ELEMENTY SKŁADOWE DROGI.....	24
3.3 KONSTRUKCJA NAWIERZCHNI DROGOWEJ.....	25
4. PODBUDOWY.....	31
4.1 RODZAJE PODBUDÓW POMOCNICZYCH.....	31
4.1.1 Podbudowa z gruntu stabilizowanego cementem.....	32
4.1.2 Podbudowa z gruntu stabilizowanego wapnem.....	32
4.1.3 Podbudowa z kruszywa stabilizowanego mechanicznie.....	33
4.1.4. Podbudowa z tłuczni kamiennego.....	33
4.1.5. Podbudowa z chudego betonu.....	33
4.1.6. Podbudowa z betonu cementowego.....	34
4.1.7. Podbudowa z betonu popiołowego.....	34
4.1.8. Podbudowa z betonu asfaltowego.....	35
4.1.9. Podbudowa z piasku otoczonego asfaltem.....	36
4.1.10. Podbudowa z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE).....	36
4.2 WYMAGANIA MIESZANEK DO WYKONANIA PODBUDOWY Z KRUSZYWA STABILIZOWANEGO MECHANICZNIE.....	36
4.3 ZAGĘSZCZANIE WARSTWY PODBUDOWY.....	38
4.4 WYMAGANIA ODBIOROWE DLA PODBUDÓW ZASADNICZEJ I POMOCNICZEJ Z KRUSZYWA STABILIZOWANEGO MECHANICZNIE.....	40
5. BADANIE WARSTWY PODBUDOWY.....	43
5.1 PŁYTA STATYCZNA VSS.....	43
5.1.1 Rodzaje płyt statycznych VSS.....	43

5.1.2	Metodologia wykonania badania płytą VSS .....	45
5.1.3	Błędy podczas wykonywania badań płytą statyczną VSS .....	45
5.1.4	Metodyka wykonywania badania .....	50
5.2.	LEKKA PŁYTA DYNAMICZNA .....	52
5.2.1	Budowa lekkiej płyty dynamicznej.....	52
5.2.2	Zasada działania lekkiej płyty dynamicznej .....	54
5.2.3	Metodyka badania .....	55
5.3	UGIĘCIOMIERZ BENKELMANA.....	56
6.	METODYKA I PROGRAM BADAŃ .....	58
6.1	POLETKO DOŚWIADCZALNE.....	58
6.2	SPOSÓB WYKONANIA BADAŃ PORÓWNAWCZYCH W TERENIE .....	60
6.3	DODATKOWE BADAŃIA WYKORZYSTANE W PRACY.....	63
6.3.1	Analiza sitowa.....	63
6.3.2	Wilgotność naturalna .....	63
6.4	ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ .....	64
6.4.1	Analiza numeryczna.....	65
6.4.2	Analiza statystyczna.....	68
7.	KATEGORIA RUCHU KR1 – KR2 .....	70
7.1	KONSTRUKCJA NR 1 .....	71
7.2	KONSTRUKCJA NR 2 .....	78
7.3	KONSTRUKCJA NR 3 .....	81
7.4	KONSTRUKCJA NR 4 .....	83
7.5	PODSUMOWANIE .....	85
8	KATEGORIA RUCHU KR3 – KR4.....	87
8.1	KONSTRUKCJA NR 1 .....	88
8.2	KONSTRUKCJA NR 2 .....	95
8.3	KONSTRUKCJA NR 3 .....	97
8.4	KONSTRUKCJA NR 4 .....	100
8.5	KONSTRUKCJA NR 5 .....	102
8.6	PODSUMOWANIE .....	104

9. KATEGORIA RUCHU KR5 – KR7 .....	107
9.1 KONSTRUKCJA NR 1 .....	108
9.2 KONSTRUKCJA NR 2 .....	116
9.3 KONSTRUKCJA NR 3 .....	118
9.4 KONSTRUKCJA NR 4 .....	120
9.5 KONSTRUKCJA NR 5 .....	122
9.6 KONSTRUKCJA NR 6 .....	125
9.7 KONSTRUKCJA NR 7 .....	127
9.8 KONSTRUKCJA PÓLSZTYWNA .....	128
9.9 KONSTRUKCJA PODATNA .....	131
9.10 PODSUMOWANIE .....	133
10. PODSUMOWANIE.....	136
11. WNIOSKI .....	142
BIBLIOGRAFIA .....	146
LITERATURA PODSTAWOWA .....	146
NORMY, ROZPORZĄDZENIA .....	151
KATALOGI, INSTRUKCJE.....	153
STRONY INTERNETOWE .....	153

## Streszczenie

Celem rozprawy doktorskiej jest analiza możliwości uzyskania zadowalającego współczynnika determinacji  $R^2$  przy porównaniu wartości dynamicznego modułu odkształcenia uzyskanych podczas badania lekką płytą dynamiczną a wtórnym modułem odkształcenia uzyskanych podczas badania statyczną płytą na podbudowie z kruszywa o frakcji 0/31,5 mm dla kategorii dróg: KR1 – KR2, KR3 – KR4, KR5 – KR7.

Na potrzeby pracy zostało wykonanych 350 porównań in situ na 16 budowach o różnych konstrukcjach drogowych. Badania zostały podzielone na kategorie ruchu oraz na podbudowy podatne oraz półsztywne. Na wszystkich budowach zastosowano kruszywo dolomitowe z zakładu GZD Siewierz. Pojedyncze porównanie obejmowało jedno badanie płytą statyczną oraz trzy badania płytą dynamiczną. Uzyskane wyniki badań zostały ze sobą zestawione celem porównania wartości dynamicznego i statycznego modułu odkształcenia. Zostały zastosowane dwie metody porównań.

Sposób wykonania pojedynczych badań bazuje na polskich normach (BN-64/8931-02, PN-98/S-02205), katalogach opracowanych przez IBDiM (KPRNPP, 2013) oraz zaleceniach producenta lekkiej płyty dynamicznej firmy ZORN (Instrukcja ZFG3.0 2013) i normie niemieckiej (DIN 18134).

Rozprawa składa się z 11 rozdziałów. W pierwszym opiszano genezę pracy oraz określono cele rozprawy doktorskiej. W rozdziale drugim przedstawiono studium literaturowe dotyczące porównania statycznego i dynamicznego modułu odkształcenia oraz do jakich odbiorów prac budowlanych wykorzystuje się powyższe moduły. W rozdziale trzecim zostały omówione: klasyfikacja dróg w Polsce, elementy składowe drogi oraz konstrukcje nawierzchni drogowej. W rozdziale czwartym zostały przedstawione rodzaje podbudów oraz wymagania dla kruszyw używanych do warstw podbudowy. Omówiono głównie kruszywo łamane 0/31,5 mm, z którego są wykonane podbudowy ujęte w niniejszej pracy. W rozdziale piątym zostały opisane badania wykorzystane do analizy porównawczej niniejszej rozprawy, tj. badanie płytą statyczną i badanie lekką płytą dynamiczną oraz badania kruszywa o frakcji 0/31,5 mm. Rozdział szósty poświęcony został opisaniu metodyce analizy otrzymywania wyników, poletkami doświadczalnym oraz zestawieniu wszystkich badań z podsumowaniem wyników dla 16 konstrukcji drogowych. Kolejne rozdziały zawierają metodykę, analizy oraz zestawienia wszystkich badań z podsumowaniem wyników dla konstrukcji drogowych z podziałem na: kategorie ruchu (KR1 – KR2, KR3 – KR4, KR5 – KR7) oraz konstrukcje podatne i półsztywne. Rozdział 11, ostatni, obejmuje wnioski.

## Abstract

The aim of the doctoral dissertation is to analyze the possibility of achieving a satisfactory coefficient of determination  $R^2$  by comparing the values of the dynamic deformation modulus obtained during the testing with a lightweight dynamic plate and the secondary deformation modulus obtained during the testing with a static plate on an aggregate foundation with a fraction of 0/31.5 mm for road categories: KR1 - KR2, KR3 - KR4, KR5 - KR7.

For the purpose of the study, 350 in situ comparisons were performed on 16 different road constructions. The tests were divided into traffic categories and flexible and semi-rigid substructures. Dolomite aggregate from the GZD Siewierz plant was used on all construction sites. Each individual comparison involved one test with a static plate and three tests with a dynamic plate. The obtained results of the tests were compared to evaluate the values of the dynamic and static modulus of deformation. Two comparison methods were used.

The execution of individual tests was based on Polish standards (BN-64/8931-02, PN-98/S-02205), catalogs developed by IBDiM (KPRNPP, 2013) and recommendations of the manufacturer of the lightweight dynamic plate by ZORN (Instruction ZFG3.0 2013) and the German standard (DIN 18134).

The dissertation consists of 11 chapters. The first chapter justifies the need to undertake the topic defines the goals of the doctoral dissertation. The second chapter presents a literature review on the comparison of the static and the applications of these modules in constructions works. The third chapter discusses: the classification of roads in Poland, road components and road Pavement structures. The fourth chapter presents types of Road bases and the requirements for aggregates used for foundation layers. It mainly focuses on the crushed aggregate of 0/31.5 mm, which is used in the bases studied in this work. The fifth chapter describes the tests used for the comparative analysis in this dissertation, namely the static plate test and the lightweight dynamic plate test, and the tests of the aggregate with a fraction of 0/31.5 mm. The sixth chapter describes the methodology of the obtaining results, experimental fields and summarizes all tests with results for the 16 road constructions. The following chapters include the methodology, analyzes and summaries of all tests with a summary of the results for road structures divided into: traffic categories (KR1 - KR2, KR3 - KR4, KR5 - KR7) and flexible and semi-rigid structures. Chapter 11, the last one, presents conclusions.

# 1. Wprowadzenie

Autor w swej pracy zawodowej przez kilkanaście lat zajmował się wykonywaniem badań w laboratorium drogowym. Do jego obowiązków należało przede wszystkim wykonywanie polowych badań laboratoryjnych na budowach różnych kategorii dróg, od dróg wewnętrznych na terenach zakładów pracy, centrów handlowych po autostrady.

W początkowych latach pracy zawodowej autora, które przypadały na koniec XX wieku, badanie płytą statyczną było głównym badaniem odbiorowym poszczególnych warstw konstrukcji drogowej. Sposób wykonywania tego badania był znormalizowany (BN-64/8931-02, PN-98/S-02205). Na początku XXI wieku, na budowach, na których pracował autor, zaczęto wykonywać na większą skalę badanie lekką płytą dynamiczną. Badanie to było wykonywane na podstawie instrukcji producenta, do której załączone były również wymagania dla warstw wykonanych z piasku, żwiru oraz pospółki. W związku z tym, że na korzyść badania przeprowadzonego za pomocą lekkiej płyty dynamicznej w porównaniu do płyty statycznej przemawiały takie argumenty jak:

- krótki czas wykonania badania (ok. 3 min.), podczas gdy czas wykonania badania płytą statyczną waha się od 30 minut do godziny w zależności od badanej warstwy,
- mniejsze koszty, badanie nie wymaga przeciwwagi (walec, załadowany samochód ciężarowy),
- możliwość wykonania większej liczby badań na danym odcinku podbudowy (zagęszczenie siatki wykonywanych badań),

badanie lekką płytą dynamiczną nie ograniczało się do warstw wykonanych z w/w materiałów. Generowało to potrzebę wykonywania korelacji pomiędzy statycznym a dynamicznym modułem odkształcenia na warstwy wykonywane z innych materiałów. Na budowie drogi szybkiego ruchu S-69 odcinek Milówka – Szare (lata 2003-2004), autor wraz z pracownikami laboratorium nadzoru inwestorskiego prowadził pierwsze próby korelacji dla warstw wykonanych z innych materiałów. W tym czasie, w czasopiśmie naukowych zaczęły pojawiać się artykuły dotyczące korelacji pomiędzy statycznym a dynamicznym modułem odkształcenia oraz zastosowaniem lekkiej płyty dynamicznej (Sulewska 2001, 2003a, 2003b, 2012).

W 2005 roku, IBDiM opublikował pracę na temat korelacji pomiędzy statycznym a dynamicznym modułem odkształcenia dla piasków, łupka przywęglowego przepalonego



o uziarnieniu 0/63 mm i nieprzepsalonego oraz mieszanki z kruszywa łamanego dolomitowego o uziarnieniu 0/31,5 mm. Po ukazaniu się tej publikacji na budowach zaczęto szerzej stosować lekką płytę dynamiczną do wykonywania badań warstw podbudów pomocniczych i zasadniczych z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie.

Z doświadczeń autora wynikało, że korelacja uzyskana przez IBDiM dla kruszywa łamanego dolomitowego o uziarnieniu 0/31,5 mm na poletku doświadczalnym odbiega od wyników uzyskiwanych bezpośrednio na budowie. Według instrukcji IBDiM (2005) do osiągnięcia wymagania  $E_2 \geq 180$  MPa dla kategorii ruchu KR5 – KR7 wystarczy wynik  $E_{VD} = 51,3$  MPa. Wyniki korelacji opracowane przez autora były wyższe od uzyskanych przez IBDiM. Rozbieżności w wynikach korelacji wpłynęły na zainteresowanie autora tematyką korelacji pomiędzy statycznym a dynamicznym modułem odkształcenia dla kruszywa 0/31,5 mm. Ponadto korelacja opracowana przez IBDiM ograniczyła się tylko dla konstrukcji dróg KR5 – KR7. Nie można było jej zastosować dla dróg kategorii KR1 – KR4, ponieważ wszystkie badania były wykonane na warstwach o wymaganiach dla wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 \geq 180$  MPa. Dla kategorii ruchu KR1 – KR2 moduł ten wynosi  $E_2 \geq 120$  MPa, a dla KR3 – KR4  $E_2 \geq 140$  MPa.

Przy budowie długich odcinków dróg, takich jak autostrady, drogi szybkiego ruchu (KR6 – KR7) istnieje możliwość wykonania analizy porównawczej dla metody statycznej i dynamicznej. Długi okres wykonywania inwestycji oraz duża powierzchnia wykonywanego odcinka pozwala na wykonanie wielu porównań. Z doświadczenia autora wynika, że problem zaczyna się podczas remontów oraz wykonywania krótkich odcinków dróg (zazwyczaj kategorie ruchu KR1 – KR4), gdzie nie ma możliwości wykonania dokładnego porównania wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia. Wykonywane wówczas analizy pojedynczych porównań modułów statycznego i dynamicznego mogą prowadzić do uzyskania błędnych parametrów. Wpływ na to ma zbyt mała liczba wykonanych badań oraz losowy rozkład kruszywa w warstwie.

Porównaniem modułów odkształcenia pomiędzy metodą statyczną i dynamiczną zajmuje się w Polsce kilku autorów (Kumor i in., 2013a, 2013b, Bartnik i Sulewska, 2015, Wyroślak i Ossowski 2016, Wyroślak 2017). Porównania te ograniczały się głównie do przeniesienia na warunki polskie (piasek, pospółka) wymagań przedstawionych przez producentów płyt dynamicznych oraz dotyczyły warstw podłoża i nasypu. Brakowało jednak opracowania porównań pomiędzy wtórnym modułem

odkształcenia a dynamicznym modułem odkształcenia na warstwach podbudowy z kruszywa łamanego 0/31,5 mm dla ruchu KR1 – KR2 oraz KR3 – KR4.

Praca ma odpowiedzieć na pytanie czy porównania wartości dynamicznego modułu odkształcenia uzyskiwane podczas badania lekką płytą dynamiczną a wtórnym modułem odkształcenia uzyskiwanym podczas badania statyczną płytą na podbudowie z kruszywa o frakcji 0/31,5 mm dla kategorii dróg: KR1 – KR2, KR3 – KR4, KR5 – KR7 doprowadzą do uzyskania zadowalającego współczynnika determinacji  $R^2$ .

Na potrzeby pracy zostało wykonanych 350 porównań in situ na 16 budowach o różnych konstrukcjach drogowych. Badania zostały podzielone na kategorie ruchu oraz na podbudowy podatne oraz półsztywne. Na wszystkich budowach było zastosowane kruszywo dolomitowe z zakładu GZD Siewierz. Pojedyncze porównanie obejmowało jedno badanie płytą statyczną oraz trzy badania płytą dynamiczną. Uzyskane wyniki badań zostały ze sobą zestawione celem porównania wartości dynamicznego i statycznego modułu odkształcenia. Zostały zastosowane dwie metody porównań.

Sposób wykonania pojedynczych badań bazuje na polskich normach (BN-64/8931-02, PN-98/S-02205), katalogach opracowanych przez IBDiM (KPRNPP, 2013) oraz zaleceniach producenta lekkiej płyty dynamicznej firmy ZORN (Instrukcja ZFG3.0 2013) i normie niemieckiej (DIN 18134).

W rozdziale drugim przedstawiono studium literaturowe dotyczące porównania statycznego i dynamicznego modułu odkształcenia oraz do jakich odbiorów prac budowlanych wykorzystuje się powyższe moduły.

W rozdziale trzecim zostały omówione: klasyfikacja dróg w Polsce, elementy składowe drogi oraz konstrukcje nawierzchni drogowej. Autor omawia tę tematykę celem wprowadzenia do dalszych zagadnień opisanych w pozostałych rozdziałach pracy.

W rozdziale czwartym zostały przedstawione rodzaje podbudów oraz wymagania dla kruszyw używanych do warstw podbudowy. Autor skupił się głównie na kruszywie łamanym 0/31,5 mm z którego są wykonane podbudowy ujęte w niniejszym opracowaniu. W tym rozdziale zostały też opisane sposoby zagęszczania podbudów oraz wymagania odbiorowe podbudów dla poszczególnych kategorii ruchu.

W rozdziale piątym zostały opisane badania wykorzystane do analizy porównawczej w niniejszej rozprawie, tj. badanie płytą statyczną i badanie lekką płytą dynamiczną oraz badania kruszywa o frakcji 0/31,5 mm.

Rozdział szósty został poświęcony metodyce analizy otrzymywania wyników, charakterystyce poligonów doświadczalnych oraz zestawieniu wszystkich badań z podsumowaniem wyników dla 16 konstrukcji drogowych.

Kolejne rozdziały zawierają metodykę, analizy oraz zestawienia wszystkich badań z podsumowaniem wyników dla konstrukcji drogowych z podziałem na:

- kategorie ruchu (KR1 – KR2, KR3 – KR4, KR5 – KR7),
- konstrukcje podatne i półsztywne.

## **2. Przegląd zastosowań lekkiej płyty dynamicznej oraz płyty statycznej VSS w Polsce i na świecie**

Badanie lekką płytą dynamiczną warstw konstrukcji drogowej wraz z podłożem i nasypami zaczęło być badaniem popularnym w Polsce pod koniec XX w. W tym czasie opracowaniem metodyki badania lekką płytą dynamiczną oraz analizą czynników wpływających na wykonywanie badania zajmowała się m.in. Sulewska (1993, 2001, 2003a). Aktualnie, badanie to jest wykonywane na budowach dróg i stopniowo zastępuje badanie płytą statyczną VSS na warstwach o mniejszym znaczeniu, takich jak np. chodniki, warstwy nasypu i podłoża na drogach o niższej kategorii ruchu.

Niemieckie warunki techniczne (ZTV E-STB 09) dopuszczają stosowanie płyty dynamicznej do badania warstw z piasków, pospółek oraz żwirów. Możliwość zastąpienia badania płytą statyczną (DIN 18134 2012-04) badaniem płytą dynamiczną (DIN 18134) wywołało konieczność wykonywania korelacji dla innych rodzajów materiałów stosowanych w budownictwie drogowym, kolejowym, przemysłowym. Dystrybutorzy lekkiej płyty dynamicznej przedstawiają korelacje, jednak z zaznaczeniem, że są to dane informacyjne, nie gwarantujące uzyskania poprawnych wyników (Instrukcja ZFG 3.0). Większość opracowań wykonywanych jest na konkretnym rodzaju materiału oraz na warstwach o jednolitej miąższości. Piaski, pospółki i żwiry są materiałami, które mają określoną frakcję, np. żwir 2-8 mm, 8-16 mm. Dlatego do pozostałych materiałów budowlanych o niejednorodnej frakcji, np. 0/31,5mm, 0/63mm, powinny być wykonane korelacje pomiędzy statycznym a dynamicznym modułem odkształcenia. Badania w tym zakresie prowadzone są na całym świecie.

W Stanach Zjednoczonych przeprowadzono badanie lekką płytą dynamiczną przy użyciu dwóch średnic płyty: 300 mm i 200 mm. Badania były prowadzone na piasku pylastym. Naukowcy analizowali zmienność dynamicznego modułu odkształcenia w zależności od wilgotności badanej warstwy. Z wykonanych badań wynikało, że wilgotność badanej warstwy miała wpływ na wielkość uzyskiwanego dynamicznego modułu odkształcenia. Wraz ze spadkiem wilgotności badanej warstwy wartość dynamicznego modułu odkształcenia wzrastała (Tehrani i Meehan 2010). W kolejnych badaniach przy zastosowaniu lekkiej płyty dynamicznej o średnicach płyty od 150 mm do 300 mm, opisanych w amerykańskiej literaturze, stwierdzono głębokość wpływu lekkiej płyty dynamicznej na badaną warstwę, która wynosiła od 2,0 do 2,5 średnicy płyty. Na

głębokość oddziaływania lekkiej płyty dynamicznej na badaną warstwę miała wpływ wielkość frakcji użytego kruszywa. Im grubsze kruszywo tym zmniejszała się głębokość oddziaływania lekkiej płyty dynamicznej na badaną warstwę (Tirado i in. 2015).

Singh i in. (2010) przedstawili opis działania lekkiej płyty dynamicznej oraz wyniki badań wykonanych na terenie kopalni miedzi w Highland Valley na materiałach o różnych frakcjach. Autorzy doszli do wniosku, że lekka płyta dynamiczna może być używana na żwirze, a jej głębokość oddziaływania wynosi od 1,5 do 2 średnic lekkiej płyty dynamicznej. Ponadto lepszą korelację uzyskuje się dla gruntów jednolitych.

Kavussi i in. (2010) zajmowali się również problematyką zastosowania lekkiej płyty dynamicznej. Porównali oni wyniki badań z lekkiej płyty dynamicznej uzyskane bezpośrednio na budowie autostrady w Teheranie z badaniami laboratoryjnymi CBR. Analiza wyników doprowadziła autorów do wniosku, że lekka płyta dynamiczna może mieć zastosowanie do badań nośności warstw konstrukcji z kruszywa. W publikacji przedstawiono ponadto wyniki badań, w których zastosowano 3 rodzaje obciążnika ruchomego (5 kg, 10 kg, 15 kg). Wartość dynamicznego modułu odkształcenia wzrastała proporcjonalnie wraz ze zwiększoną masą obciążnika ruchomego. Wykonano również badania przy użyciu dwóch średnic płyty. Wartość dynamicznego modułu odkształcenia przy użyciu płyty o średnicy 100 mm była około 1,85 razy większa od wartości dynamicznego modułu odkształcenia uzyskanego przy użyciu płyty o średnicy 300 mm.

Kopf i in. (2011) wykonali analizę numeryczną oddziaływania płyty dynamicznej przy zmiennej grubości warstwy oraz zmienności parametrów materiałowych. Zastosowano obciążnik ruchomy o masie 10 kg i płytę o średnicy 300 mm. Z analizy danych wynika, że głębokość pomiarowa, poniżej której zmiany zachodzące w podłożu gruntowym nie mają wpływu na wynik badania, wynosi 60 cm.

Problematyka porównania dynamicznego modułu odkształcenia ze statycznym modułem odkształcenia została poruszona w publikacjach przez Bertuliene (2014), która porównywała wyniki badań dynamicznego modułu odkształcenia uzyskane za pomocą trzech różnych lekkich płyt dynamicznych ze statycznym modułem odkształcenia uzyskanym przy użyciu płyty statycznej VSS. Bertuliene (2014) wykazała, że istnieje zależność pomiędzy dynamicznym a statycznym modułem odkształcenia. Ponadto Bertuliene stwierdziła, że w celu uzyskania dokładniejszych porównań należy wziąć pod uwagę skład granulometryczny badanej warstwy (Bertuliene i in., 2019), grubość oraz temperatury badanej warstwy i temperatury otoczenia (Bertuliene i in., 2010).

W 2014 roku Elhakim i in. opublikowali pracę dotyczącą badań lekką płytą dynamiczną na warstwach wykonanych z piasku. Opisana została korelacja pomiędzy dynamicznym modułem odkształcenia a stopniem zagęszczenia dla piasków: krzemionkowego i wapiennego. Uzyskana korelacja uznana została jako zadawalająca. Ponadto Elhakim i in. (2014) stwierdzili, że głębokość oddziaływania badania wynosi od 1,5 do 2 razy średnicy lekkiej płyty dynamicznej.

W pracy Shivamantha i in. (2015) zwrócono uwagę na wpływ wilgotności badanej warstwy na wartość dynamicznego modułu odkształcenia. Ponadto stwierdzono, że gdy grubość warstwy jest mniejsza niż zasięg badania lekką płytą dynamiczną może to mieć wpływ na uzyskiwane wyniki.

W Indiach wykonano porównania dynamicznego modułu odkształcenia z pomiarem ugięć wykonanych belką Benkelmana podatnych nawierzchni drogowych. Korelacja uzyskanych wyników badań pozwoliła Autorom na stwierdzenie, że lekka płyta dynamiczna może być stosowana do badań na budowie (Guzzarlapudi i in., 2016).

Makwana i Kumar (2019) wykorzystali lekką płytę dynamiczną do wykonania korelacji pomiędzy kalifornijskim wskaźnikiem nośności CBR (California Bearing Ratio) a sondą dynamiczną stożkową DCP (Dynamic Cone Penetrometr). Uzyskano wartości współczynników determinacji  $R^2$  w przedziale  $\langle 0,811; 0,876 \rangle$ , co dało dobre dopasowanie badań.

W amerykańskiej literaturze również opisuje się m. in. próby zastosowania lekkiej płyty dynamicznej do odbioru drogowych warstw konstrukcyjnych. Wyniki badań uzyskanych w warunkach laboratoryjnych dla danego rodzaju materiału przenosi się w teren. Istotnym elementem tych porównań jest sprawdzenie grubości badanej warstwy. Gdy grubość warstw jest równa lub większa od głębokości wpływu badania można bezpośrednio zastosować wyniki uzyskane w laboratorium. Autorzy zaznaczają, że istnieje możliwość porównania innych kruszyw według metodologii przedstawionej w artykule Akmaza i in. (2020).

Narnoll i Suman (2020) przeprowadzili porównanie ugięć pomiędzy dwoma średnicami lekkich płyt dynamicznych. Z analizy wynikało, że ugięcia powierzchni uzyskane przy średnicy płyty 150 mm są od 1,5 do 1,8 razy większe niż ugięcia powierzchni uzyskane przy zastosowaniu płyty o średnicy 300 mm.

W Chinach zostały wykonane korelacje pomiędzy ugięciomierzem Benkelmana a lekką płytą dynamiczną. Uzyskane wyniki dały dobre dopasowanie (Zhang i in., 2020).

Podsumowując zakres przedstawionej literatury zagranicznej na temat badań lekką płytą dynamiczną można wyciągnąć następujące wnioski:

- masa ciężarka opadowego oraz średnica płyty, jak również wilgotność oraz miąższość badanej warstwy ma wpływ na wielkość uzyskiwanych wartości dynamicznego modułu odkształcenia,

- istnieje możliwość wykonania korelacji pomiędzy wynikami uzyskanymi lekką płytą dynamiczną a płytą statyczną, ugięciomierzem Benkelmana oraz badaniami laboratoryjnymi kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR,

- istnieje rozbieżność w analizie wyników lekką płyt dynamiczną, która jest spowodowana wykonywaniem badań dla różnych rodzajów materiałów. Analizy numeryczne potwierdzają, że największy zasięg oddziaływania lekkiej płyty dynamicznej sięga do głębokości podwójnej średnicy płyty.

W Polsce w 2005 r. IBDiM przeprowadził badania korelacyjne pomiędzy lekką płytą dynamiczną oraz płytą statyczną VSS. Jest to największe opracowanie dotyczące tego zagadnienia wykonane w Polsce w warunkach laboratoryjnych. Analiza dotyczyła następujących materiałów:

- piasków o uziarnieniu ciągłym i nieciągłym,
- pospółki o uziarnieniu ciągłym i nieciągłym,
- kruszywa łamanego dolomitowego o uziarnieniu 0/31,5 mm,
- kruszywa z łupka przywęglowego przepalonego i nieprzepalonego.

Dla piasków (tablica 2.1) oraz pospółek (tablica 2.2) przy zagęszczeniu najczęściej stosowanym w budownictwie  $I_s \geq 1,0$  wyniki korelacji pokrywają się z zaleceniami producenta. Przy pozostałych zagęszczeniach, zalecanych przez normy (tj.  $I_s \geq 1,03$ ;  $I_s \geq 0,98$ ;  $I_s \geq 0,97$ ), wyniki korelacji nie pokrywają się z zaleceniami producenta, jednak te rozbieżności nie są znaczne.

Dla wymagań wtórnego modułu odkształcenia o wartości  $E_2 \geq 180$  MPa, wyniki uzyskane są o wiele niższe niż przewiduje producent (rys. 2.3). Dlatego nie zaleca się stosować dla kruszywa łamanego o frakcji 0/31,5 mm korelacji IBDiM (2005), tylko dla danej konstrukcji drogi i danego rodzaju materiału wykonać korelację, według której należy podjąć decyzję czy na danej warstwie należałoby wykonać badanie lekką płytą dynamiczną i czy da się na tej podstawie wykonać korelację wyników (Łupieżowiec i Syma 2014, Gorączko i in., 2014).

Tablica 2.1 Zależność korelacyjna wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  i dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$  dla piasku na podstawie Instrukcji dostarczonej przez producenta oraz IBDiM (2005)

Dynamiczny moduł odkształcenia $E_{VD}$ [MPa]	Wskaźnik zagęszczenia $I_s$ [-]		
	$\geq 1,00$	$\geq 0,98$	$\geq 0,97$
Piasek <sup>1</sup>	$\geq 40$ MPa	$\geq 35$ MPa	$\geq 32$ MPa
Piasek drobny uziarnienie ciągłe <sup>2</sup>	$\geq 41$ MPa	$\geq 29$ MPa	$\geq 22$ MPa
Piasek drobny uziarnienie nieciągłe <sup>2</sup>	$\geq 43$ MPa	$\geq 27$ MPa	$\geq 20$ MPa
Piasek średni uziarnienie ciągłe <sup>2</sup>	$\geq 44$ MPa	$\geq 30$ MPa	$\geq 24$ MPa
Piasek średni uziarnienie nieciągłe <sup>2</sup>	$\geq 50$ MPa	$\geq 35$ MPa	$\geq 27$ MPa
Piasek gruby uziarnienie ciągłe <sup>2</sup>	$\geq 44$ MPa	$\geq 30$ MPa	$\geq 24$ MPa
Piasek gruby uziarnienie nieciągłe <sup>2</sup>	$\geq 43$ MPa	$\geq 27$ MPa	$\geq 20$ MPa

1. Instrukcja producenta ZFG 3.0
2. IBDiM 2005

Tablica 2.2 Zależność korelacyjna wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  i dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$  dla pospółki na podstawie instrukcji dostarczonej przez producenta oraz IBDiM (2005)

Dynamiczny moduł odkształcenia $E_{VD}$ [MPa]	Wskaźnik zagęszczenia $I_s$ [-]			
	$\geq 1,03$	$\geq 1,00$	$\geq 0,98$	$\geq 0,97$
Pospółka dobrze uziarniona <sup>1</sup>	$\geq 60$ MPa	$\geq 50$ MPa	$\geq 40$ MPa	$\geq 35$ MPa
Pospółka słabo uziarniona <sup>1</sup>	-	$\geq 40$ MPa	$\geq 35$ MPa	$\geq 32$ MPa
Pospółka uziarnienie ciągłe <sup>2</sup>	$\geq 74$ MPa	$\geq 50$ MPa	$\geq 35$ MPa	$\geq 27$ MPa
Pospółka uziarnienie nieciągłe <sup>2</sup>	-	$\geq 50$ MPa	$\geq 35$ MPa	$\geq 27$ MPa

1. Instrukcja producenta ZFG 3.0
2. IBDiM (2005)

Korelacja pomiędzy płytą statyczną i dynamiczną dla łupka przepalonego i łupka nieprzepalonego nie jest możliwa do wykonania na podstawie badań IBDiM (2005) z powodu dużej rozbieżności wyników.

Wnioski dotyczące korelacji wykonanej na warstwach z piasku i pospółki były zbliżone z wynikami przedstawionymi w Instrukcjach ZORN (2009, 2013), dostarczonych przez producentów lekkich płyt dynamicznych. Badania korelacyjne pomiędzy statyczną i dynamiczną płytą były również prowadzone przez różne ośrodki naukowe w Polsce. Zakres tych porównań obejmował głównie wyniki badań przeprowadzonych na



piaskach i pospółkach (Sulewska 2003b, Kumor i in., 2013, Rogojasz 2015, Wyroślak i Ossowski 2016). Zarówno publikacja IBDiM (2005), jak i kolejne opracowania na ten temat, miały bezpośredni wpływ na zwiększenie zastosowania płyty dynamicznej do badań odbiorowych poszczególnych warstw wykonywanych z piasku i pospółki.

Tablica 2.3 Porównanie wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  z dynamicznym modułem odkształcenia  $E_{VD}$  na podstawie Instrukcji (2013) dostarczonej przez producenta oraz IBDiM (2005)

$E_2$ [MPa]	$E_{VD}$ wg producentów [MPa]	$E_{VD}$ wg IBDiM (2005) [MPa]
180	80	52
150	70	-
120	60	-
100	50	-
80	40	-
60	30	-
45	25	-
20	15	-

Powszechność stosowania badań przy użyciu lekkiej płyty dynamicznej zaczęła być również zauważalna przy odbiorach warstw podbudowy konstrukcji drogowej. Wyniki uzyskane z badań przeprowadzonych na poletku doświadczalnym IBDiM (2005) wskazywały, że dopuszczalne jest zastosowanie lekkiej płyty dynamicznej do konstrukcji drogowej. Jednak zagadnienie to nie doczekało się analizy na większą skalę i wyniki uzyskane przez IBDiM (2005) nie znalazły odzwierciedlenia bezpośrednio w badaniach przeprowadzanych na budowie. W 2014 r. Łupieżowiec i Syma (2014b) wskazali na zbyt niską wartość dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$  uzyskanego w opracowaniu IBDiM (2005). Autorzy przedstawili również wyniki korelacji potwierdzające, że wartości dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$  uzyskane bezpośrednio na budowie są większe od uzyskanych przez IBDiM (2005).

Badania płytą statyczną VSS wykonywane zgodnie z normą BN-64/8931-02 oraz badania ugięciomierzem Benkelmana wykonywane zgodnie z normą (BN-70/8931-06) zostały wykorzystane dla sprawdzenia nośności konstrukcji nawierzchni dróg leśnych żuźlowych i żwirowych (Trzeciński 2007).

Płyta statyczna VVS oraz lekka płyta dynamiczna są również stosowane do badania modułu odkształcenia nasypu i podłoża przy budowie i przebudowie linii kolejowych (Krużyński i in. 2007, Krużyński, 2008). Autorzy przedstawiają związki pomiędzy modułem dynamicznym i statycznym opierając się na badaniach opublikowanych przez innych badaczy.

Gradkowski (2008a, 2008b) w swoich pracach wykorzystywał dynamiczny moduł odkształcenia oraz statyczny moduł odkształcenia do badania wpływu zastosowania geosyntetyków przy wzmacnianiu podłoża gruntowego nawierzchni dróg. Autor zaznaczył, że uzyskanie dynamicznego modułu odkształcenia przy użyciu lekkiej płyty dynamicznej traktowane jest jako pozanormowe, jednak wskazał on na istnienie zależności korelacyjnych pozwalających na przeliczenie dynamicznego modułu odkształcenia (nie normowego) na statyczny moduł odkształcenia (normowy).

Zelek (2009) wykorzystuje wynik wtórnego modułu odkształcenia do projektowania modernizacji dróg kolejowych. Wartość wtórnego modułu odkształcenia przyjmowana jest z Warunków technicznych utrzymania podtorza kolejowego Id-3 lub bezpośrednio z badania płytą statyczną VSS, wykonanego na terenie modernizowanego odcinka.

Piotrowski (2010) przedstawia badania porównawcze pomiędzy statyczną płytą VSS a dynamiczną lekką sondą SD-10 podtorza kolejowego (warstwa z pospółki), z których wynika, że wskaźnik odkształcenia  $I_0$  podtorza nie pozwala na dokładną ocenę wskaźnika zagęszczenia podtorza kolejowego  $I_s$ .

Zostały wykonane również badania statyczną płytą VSS podtorza kolejowego (warstwa z niesortu kamiennego, klinca, geokompozytów), z których wynika, że wskaźnik odkształcenia  $I_0$  podtorza nie pozwala na dokładną ocenę wskaźnika zagęszczenia gruntów  $I_s$  i materiałów rzeczywistego podtorza kolejowego (Pawłowski 2010, Pawłowski i Siewczyński, 2016).

Łupieżowiec (2012) przedstawił analizę numeryczną działania płyty statycznej VSS na podłożu jednorodnym oraz podłożu wzmocnione warstwą zagęszczonego kruszywa zbrojonego sztywnym georusztem. Analiza numeryczna została wykonana w programie Z\_Soil\_PC. Analiza MES pozwoliła autorowi na stwierdzenie, że zastosowanie sztywnej konstrukcji z gruntu zbrojonego powoduje redukcję osiadania.

Bardel (2012) zajął się zagadnieniem stosowania wymagań normowych dla lokalnych kruszyw (żwiry i pospółki ze złóż aluwialnych rejonu Tarnowa) oraz analizą wyników warstw stabilizowanych cementem. Autor zauważył, że należy rozważyć możliwość dostosowania wymagań normowych do danego materiału, gdyż przepisy i normy tego nie umożliwiają. Ponadto Bartel i Kądziałowski (2019) analizując wyniki badań płytą statyczną VSS podłoża stabilizowanego cementem stwierdzili, że zastosowanie cementu, jako spoiwa do stabilizacji gruntów lub mieszanek z kruszywa jest skuteczne w odniesieniu do ocenianej nośności podłoża nawierzchni.

Wartość wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  wykorzystywana jest do analizy numerycznej trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowych. Wartość wtórnego modułu odkształcenia przyjmowana jest jako moduł sprężystości podłoża gruntowego (Plewa, 2013).

Korelacja pomiędzy statycznym a dynamicznym modułem odkształcenia podczas budowy nasypów została przedstawiona w artykułach naukowców Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Autorzy sformułowali wniosek, że zależność między parametrami charakteryzującymi skład granulometryczny gruntu a parametrami charakteryzującymi jego zagęszczenie należy uznać za nieistotną (Kumor i in. 2013a, 2013b).

Maślakowski i inni (2013) opisali korelację statycznego i dynamicznego modułu odkształcenia. Badania zostały wykonane na podłożu drogowym i tramwajowym. Autorzy uznali, że wyliczone przez nich zależności korelacyjne dla kruszywa wapiennego 0/31,5 mm ułożonego na geosiatce oraz dla pospółki ułożonej na geowłókninie, pomiędzy modułem dynamicznym i modułem statycznym są zbieżne.

Próby oszacowania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  za pomocą badania ugięciomierzem dynamicznym FWD (Falling Weight Deflectometer) mieszczą się w przedziale 80% ufności wartości wyznaczonych modułów in situ. To oznacza realną możliwość stosowania badania ugięciomierzem dynamicznym FWD oraz analizę numeryczną. Analiza ta pozwala na możliwość uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia (nośności) podbudowy na drogach, na których wykonane są już warstwy bitumiczne (Pożarycki i Garbowski, 2014).

Wtórny moduł odkształcenia  $E_2$  jest wykorzystywany do projektowania wzmocnień podtorza kolejowego. Porównuje się uzyskane wyniki na badanej warstwie ochronnej z wartościami modułów projektowych i na tej podstawie przyjmuje się modernizację podtorza oraz odpowiednie wzmocnienie warstwy ochronnej (Siewczyński, 2002, Siewczyński i Pawłowski 2014).

Gorączko i inni (2014) przedstawili korelacje pomiędzy dynamicznym a statycznym modułem odkształcenia dla kruszywa wapiennego o uziarnieniu 0/31,5 mm. Uzyskane przez autorów wartości  $E_{VD}$  były znacząco wyższe od wartości proponowanych w opracowaniu IBDiM (2005) dla kruszyw dolomitowych.

Rogojsz (2015) wykonał badania nasypu wykonanego do najazdu na obiekt mostowy. Nasyp był wykonany z piasku średniego o uziarnieniu nieciągłym a miąższość każdej warstwy nasypu wynosiła 50 cm. Wysokość nasypu mieściła się w przedziale od

3 do 6 m. Badania lekką płytą dynamiczną na kolejnych warstwach były wykonane w tym samym punkcie. Następnie Rogojsz (2015) wykonał przeliczenia wyników dynamicznego modułu odkształcenia na wtórny moduł odkształcenia oraz wskaźnik zagęszczenia wg Instrukcji IBDiM (2005).

Przedmiotem badań Bartnika i Sulewskiej (2015) i Bartnika (2015) było słabonośne podłoże gruntowe zbrojone geosyntetykiem. W warunkach laboratoryjnych na podłożu gruntowym wykonano trzy warstwy z kruszywa o różnych miąższościach. Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań autorzy porównali wartości dynamicznego modułu odkształcenia i statycznego modułu odkształcenia.

Również Krawczyk i Mackiewicz (2015) zajmowali się badaniami lekką płytą dynamiczną oraz lekką płytą dynamiczną. W swoich publikacjach autorzy przedstawili analizy wpływu rodzaju przeciwwagi (Krawczyk i in., 2015) oraz wpływu czasu oddziaływania obciążenia (Mackiewicz i Krawczyk, 2015) na wtórny moduł odkształcenia. Autorzy przeprowadzili badania porównawcze dynamicznego i statycznego modułu odkształcenia i zalecają ustalanie każdorazowo korelacji dla danej konstrukcji na terenie budowy. Krawczyk i Mackiewicz (2016) poruszyli również tematykę wpływu obciążeń cyklicznych w badaniu lekką płytą dynamiczną na rodzaj podłoża: podłoże ulepszone z kruszywa łamanego 0/63 mm, podłoże ulepszone z kruszywa stabilizowanego cementem oraz podłoże rodzime (Krawczyk i Mackiewicz, 2015).

Poprawność badania zagęszczenia gruntu w zależności od jego rodzaju zależy między innymi od właściwego doboru metody badawczej. Tematyką tą zajmował się w swoich publikacjach Jermołowicz (2015, 2020a, 2020b). Opisał sposób wykonania badania lekką płytą dynamiczną oraz płytą statyczną VSS.

Grajewski i in. (2015) oraz Grajewski (2016) zajmując się nośnością dróg leśnych wykorzystując badanie lekką płytą dynamiczną oraz płytą statyczną stwierdzili, że w celu uzyskania większej zgodności pomiędzy wynikami ww. badań należy zwiększyć liczbę pomiarów płytą statyczną na poszczególnych odcinkach drogowych. Analizując wpływ wilgotności nawierzchni na nośność dróg leśnych, Grajewski (2016) zauważył, że zdarzają się sytuacje, w których niemożliwa jest korelacja modułu dynamicznego i statycznego.

Problematyka sposobu przeprowadzenia badań nośności podłoża drogowego płytą dynamiczną i statyczną została omówiona w publikacjach Kraszewskiego i innych (Kraszewski i Gajewska, 2016; Kraszewski i in., 2020).

Korelacją wyników pomiędzy statycznym a dynamicznym modułem odkształcenia zajmowali się również Wyroślak i Ossowski (2016), Wyroślak (2017). Badania porównawcze zostały wykonane podczas budowy nasypów gruntowych.

Jak udowadniają Bąk i Gosk (2007) wyniki uzyskiwane z badań przeprowadzonych z użyciem lekkiej płyty dynamicznej oraz płyty statycznej wykorzystywane są również do uzyskania danych o danym gruncie dla celów modelowania. Poza tym wykorzystuje się lekką płytę dynamiczną do określenia parametrów odkształceniowych podłoża piaszczystego (Gosk, 2005, 2010, 2011; Gosk i Czech, 2016, 2018), nasypu z różnoziarnistej pospółki (Gosk, 2014) oraz nasypu z mieszanki piasku i żwiru (Gosk, 2016). Gosk (2018) opisał konstrukcję budowy lekkiej płyty dynamicznej, sposób jej działania oraz problemy przy interpretacji wyników badań.

Jak potwierdzają różni autorzy m.in. Wesołowski i in. (2018, 2019), Wesołowski i Kowalewska (2020) badanie płytą statyczną VSS jest stosowane do sprawdzenia nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych.

Grygierek i inni (2018) wykorzystali wyniki badań lekką płytą dynamiczną do analizy skuteczności stabilizacji rodzimego gruntu spoistego na przestrzeni czasu. Wykonali 5 badań w przedziale czasowym od listopada 2012 do czerwca 2015.

W 2018 roku ukazał się artykuł, w którym zostały zaprezentowane analizy numeryczne dotyczące zasięgu działania na badaną warstwę lekkiej płyty dynamicznej oraz płyty statycznej VSS. Węgliński (2018) stwierdził, że zasięg działania lekkiej płyty dynamicznej mieści się w przedziale 2,6 do 3,0 średnicy płyty pomiarowej, a płyty statycznej VSS mieści się w przedziale 3,5÷4,1 dla podłoża gruntowego oraz w przedziale 4,0÷4,6 średnicy płyty dla podłoża ulepszonego. Zasięg działania płyty statycznej VSS jest większy niż lekkiej płyty dynamicznej ponieważ jest on zależny od zakresu użytego obciążenia. Węgliński (2018) stwierdził, że nie można porównać względem siebie wtórnego i dynamicznego modułu odkształcenia.

(Parylak, 2019a, 2019b) w swoich pracach podważył zastosowanie lekkiej płyty dynamicznej oraz statycznej płyty VSS do kontroli zagęszczenia warstw konstrukcji ziemnych. Autor wskazywał, że nieliczne kontrolne porównania wskaźników zagęszczenia  $I_s$  uzyskanych metodą pomiaru gęstości na podstawie modułu  $E_{VD}$  wskazują, że różnice pomiaru wynoszą do 60%, co dyskwalifikuje przydatność płyt do kontroli zagęszczenia gruntów.

## 3. Drogi ich podział i budowa

### 3.1 Klasyfikacja dróg

W Polsce, w celu określenia wymagań technicznych i użytkowych dróg publicznych, Rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, wprowadzono klasy dróg i przyporządkowano je do różnych kategorii.

Klasa drogi to przyporządkowanie drodze odpowiednich parametrów technicznych, wynikających z jej cech funkcjonalnych.

Poniżej podano klasy dróg, od drogi o najwyższych parametrach:

- autostrady, oznaczone symbolem „A”,
- ekspresowe, oznaczone symbolem „S”,
- główne ruchu przyspieszonego, oznaczone symbolem „GP”,
- główne, oznaczone symbolem „G”,
- zbiorcze, oznaczone symbolem „Z”,
- lokalne, oznaczone symbolem „L”,
- dojazdowe, oznaczone symbolem „D”.

Wyróżnia się następujące kategorie dróg:

- krajowa – klasa A, S lub GP,
- wojewódzka – klasa GP lub G,
- powiatowa – klasa GP, G lub Z,
- gminna – klasa GP, G, Z lub D.

Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych z 2014 roku (dalej zwany KTKNPiP) wprowadza do celów projektowych kategorie ruchu oraz określa okres projektowy.

Kategorią ruchu (tablica 3.1 i 3.2) nazywamy jeden z przedziałów określających ruch projektowy od KR1 do KR7, w zależności od sumarycznej liczby osi równoważnych 100 kN w okresie projektowym.

W KTKNPiP (2014) w celu dostosowania się do prawa unijnego, do projektowania nowych nawierzchni przyjęto następujący dopuszczalny nacisk na pojedynczą oś:

- a) nawierzchnie autostrad, dróg ekspresowych i dróg krajowych – 115 kN,
- b) nawierzchnie pozostałych dróg – 100 kN lub 115 kN.

Okres projektowy jest to okres od momentu oddania nawierzchni do użytkowania do osiągnięcia stanu krytycznego, wymagającego przebudowy nawierzchni. W okresie projektowym muszą być prowadzone roboty utrzymaniowe oraz mogą wystąpić remonty polegające na wymianie warstwy ścieralnej.

Okres projektowy wynosi:

- a) 30 lat dla autostrady i drogi ekspresowej,
- b) 20 lat dla pozostałych klas dróg.

Zarządca drogi, czyli organ administracji rządowej lub jednostki samorządu terytorialnego, do którego zadań należą sprawy z zakresu planowania, budowy, przebudowy, remontu, utrzymania i ochrony dróg (KTKNPiP, 2014), może zastosować inne okresy projektowe, jednak nie krótsze niż podane powyżej.

Tablica. 3.1 Klasyfikacja ruchu projektowego wg KTKNPiP (2014)

Kategoria ruchu	$N_{100}$ - sumaryczna liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym [w milionach osi 100 kN na pas obliczeniowy]
1	2
KR1	$0,03 < N_{100} \leq 0,09$
KR2	$0,09 < N_{100} \leq 0,50$
KR3	$0,50 < N_{100} \leq 2,50$
KR4	$2,50 < N_{100} \leq 7,30$
KR5	$7,30 < N_{100} \leq 22,00$
KR6	$22,00 < N_{100} \leq 52,00$
KR7	$N_{100} > 52,00$

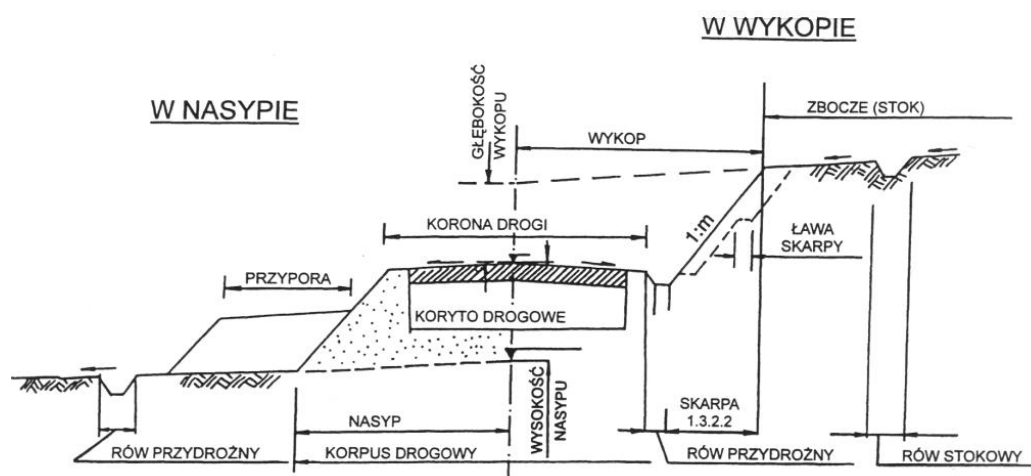
Tablica. 3.2 Klasyfikacja ruchu projektowanego na 30 lat wg KTKNS (2014)

Kategoria ruchu	$N_{100}$ - sumaryczna liczba osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym (30 lat) [milion osi 100 kN na pas obliczeniowy]	$N_{115}$ - sumaryczna liczba osi standardowych 115 kN w całym okresie projektowym (30 lat) [milion osi 115 kN na pas obliczeniowy]
1	2	3
KR1	$0,045 < N_{100} \leq 0,15$	$0,017 < N_{115} \leq 0,06$
KR2	$0,15 < N_{100} \leq 0,75$	$0,06 < N_{115} \leq 0,28$
KR3	$0,75 < N_{100} \leq 6,39$	$0,28 < N_{115} \leq 2,40$
KR4	$6,39 < N_{100} \leq 15,99$	$2,40 < N_{115} \leq 6,00$
KR5	$15,99 < N_{100} \leq 42,63$	$6,00 < N_{115} \leq 16,00$
KR6	$42,63 < N_{100} \leq 101,25$	$16,00 < N_{115} \leq 38,00$
KR7	$N_{100} > 101,25$	$N_{115} > 38,00$

## 3.2 Elementy składowe drogi

Norma PN-98/S-02205 opisuje podstawowe elementy drogowej budowli ziemnej, które zostały przedstawione na rys 3.1. Do składowych elementów drogowej budowli ziemnej zaliczamy:

- Pas drogowy – wydzielony teren, przeznaczony pod drogę oraz urządzenia związane z obsługą i ochroną drogi, obsługą ruchu i ochroną środowiska, a także zawierający rezerwę pod przyszłą rozbudowę drogi,



Rys. 3.1 Elementy składowe drogowej budowli ziemnej (wg PN-98/S-02205)

- Nasyp – drogową budowlę ziemną wykonaną powyżej powierzchni terenu w obrębie pasa drogowego,
- Wykop – drogową budowlę ziemną wykonaną w obrębie pasa drogowego, w postaci odpowiednio ukształtowanej przestrzeni powstałej w wyniku usunięcia z niej gruntu,
- Koronę drogi – część powierzchni drogi, obejmującą jezdnię z poboczami i pasem dzielącym oraz ewentualne inne elementy dodatkowe,
- Korpus drogowy – drogową budowlę ziemną ograniczoną od góry koroną drogi, a z boków skarpami lub wewnętrznymi skarpami rowów,
- Koryto drogowe – wykop uformowany w korpusie drogowym w celu ułożenia w nim konstrukcji nawierzchni,
- Podłoże nawierzchni – grunt rodzimy, nasypowy lub antropogeniczny, leżący bezpośrednio pod konstrukcją nawierzchni do głębokości przemarzania, nie mniej jednak niż do głębokości 1 m od zaprojektowanej powierzchni robót ziemnych,



- Podłoże drogowej budowli ziemnej (nasypu lub wykopu) – strefę gruntu rodzimego poniżej spodu budowli, w której właściwości gruntu mają wpływ na projektowanie, wykonanie i eksploatację budowli.

Wysokość nasypu lub głębokość wykopu – odległość pionowa pomiędzy powierzchnią terenu a wierzchem nasypu lub spodem wykopu mierzona w osi drogi (PN-98/S-02205).

### 3.3 Konstrukcja nawierzchni drogowej

Określenia „nawierzchnia” i „konstrukcja nawierzchni” są równoznaczne i mogą być stosowane wymiennie.

Według Rozporządzenia z dnia 2 marca 1999 r. wraz z późniejszymi zmianami, w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, konstrukcja drogowej budowli ziemnej oraz konstrukcja nawierzchni drogi powinny być projektowane i wykonane tak, aby:

- przenosiły wszystkie oddziaływania i wpływy mogące występować podczas budowy i podczas użytkowania drogi, jeśli nie są przekraczane dopuszczalne naciski osi pojazdu na nawierzchnię,
- miały trwałość, co najmniej równą okresowi użytkowania określonemu w dokumentacji projektowej, pod warunkiem wykonania czynności wynikających z rodzaju wbudowywanych materiałów, kosztów użytkowania i zasad utrzymania nawierzchni,
- nie uległy zniszczeniu w stopniu nieproporcjonalnym do jego przyczyny.

Nawierzchnią lub konstrukcją nawierzchni nazywamy zespół warstw, którego celem jest przeniesienie i rozłożenie naprężeń od kół pojazdów na podłoże gruntowe nawierzchni. Nawierzchnia powinna również zapewnić bezpieczeństwo i komfort jazdy pojazdów. Spoczywa ona na podłożu gruntowym (warstwie nasypu) lub warstwie ulepszanego podłoża (ulepszonej warstwie nasypu).

W Polsce, w budownictwie drogowym stosowane są trzy rodzaje rozwiązań konstrukcji nawierzchni:

- a) podatne, w których warstwa ścieralna i wiążąca wykonane są z mieszanek mineralno-asfaltowych, a żadna z warstw podbudowy zasadniczej i podbudowy pomocniczej nie jest wykonana z materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi (tablica 3.3 i rys. 3.3),

b) półsztywne, w których warstwa ścieralna i wiążąca wykonane są z mieszanek mineralno-asfaltowych, a przynajmniej jedna z warstw podbudowy zasadniczej, podbudowy pomocniczej jest wykonana z materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi (tablica 3.3 i rys. 3.3),

c) sztywne, w których wyróżniamy płytę betonową, podbudowę, która może składać się jednej warstwy lub zespołu warstw wykonanej z kruszywa lub chudego betonu, warstwę mrozochronną (odsączającą) (rys. 3.2 i tablica 3.4).

Tablica. 3.3 Układ warstw konstrukcji podatnych i półsztywnych wraz z warstwą ulepszanego podłoża (KTKNPiP, 2014)

Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Warstwa ścieralna	
		Warstwa wiążąca	
		Podbudowa zasadnicza	Górna warstwa podbudowy zasadniczej
			Dolna warstwa podbudowy zasadniczej
	Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni	Podbudowa pomocnicza	
Warstwa mrozochronna			
Podłoże gruntowe nawierzchni	Warstwa ulepszanego podłoża		
	Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie, zakwalifikowany do jednej z grup nośności podłoża od G1 do G4.		

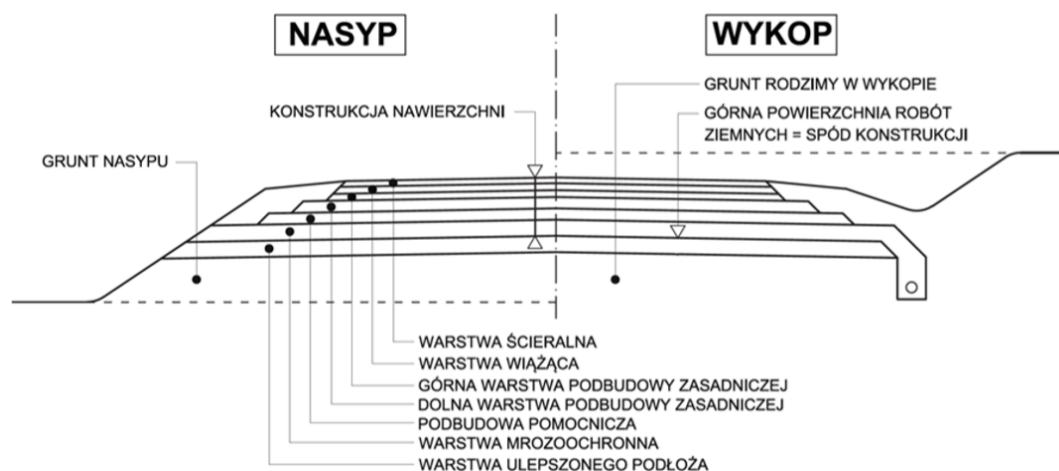


Rys. 3.2 Przekrój warstw konstrukcji sztywnych (Szydło i Mackiewicz, 2005)

Grubością konstrukcji nawierzchni nazywamy sumę grubości warstw ścieralnej, wiążącej, podbudowy zasadniczej, podbudowy pomocniczej i warstwy mrozochronnej. W skład konstrukcji nie jest wliczana warstwa ulepszanego podłoża.

Głównym podziałem konstrukcji nawierzchni jest podział na górne i dolne warstwy. Górne warstwy mają za zadanie przeniesienie obciążenia od ruchu drogowego. Dolne warstwy stanowią „fundament” dla górnych warstw i są one zależne od grupy nośności

podłoża gruntowego (tablica 3.5 i 3.6) i od wymaganej nośności powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni (rys. 3.4 i 3.5).



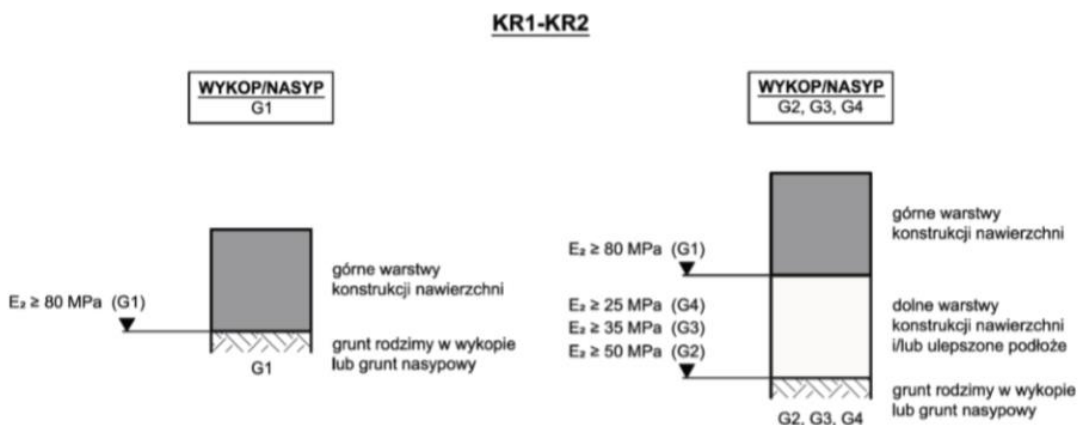
Rys. 3.3 Przekrój warstw podatnych i półsztywnych w nasypie i wykopie (KTKNPP, 2014; Judycki, 2012)

Tablica. 3.4 Układ warstw konstrukcji nawierzchni sztywnych oraz warstwy ulepszanego podłoża (KTKNS, 2014)

Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Warstwa nawierzchniowa (płyta niedyblowana, dyblowana i kotwiona, zbrojona)
		Warstwa poślizgowa
	Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni	Podbudowa zasadnicza
		Podbudowa pomocnicza
Podłoże gruntowe nawierzchni	Warstwa ulepszanego podłoża	
	Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie, zakwalifikowany do jednej z grup nośności podłoża od G1 do G4.	

Górna konstrukcja nawierzchni składa się z (rys. 3.3, tablica 3.3):

- warstwy ścieralnej jest to warstwa wierzchnia nawierzchni, poddana bezpośredniemu oddziaływaniu ruchu i czynników atmosferycznych,
- warstwy wiążącej jest to warstwa znajdująca się między warstwą ścieralną a podbudową, zapewniająca lepsze rozłożenie naprężeń w nawierzchni i przekazywanie ich na podłoże,
- warstwy podbudowy zasadniczej, która spełnia funkcję nośnej konstrukcji nawierzchni, może ona zawierać warstwę wzmacniającą lub warstwę wyrównawczą. Warstwa wzmacniająca służy do wzmocnienia istniejącej nawierzchni. Warstwa wyrównawcza służy do wyrównania nierówności podbudowy lub profilu istniejącej nawierzchni.



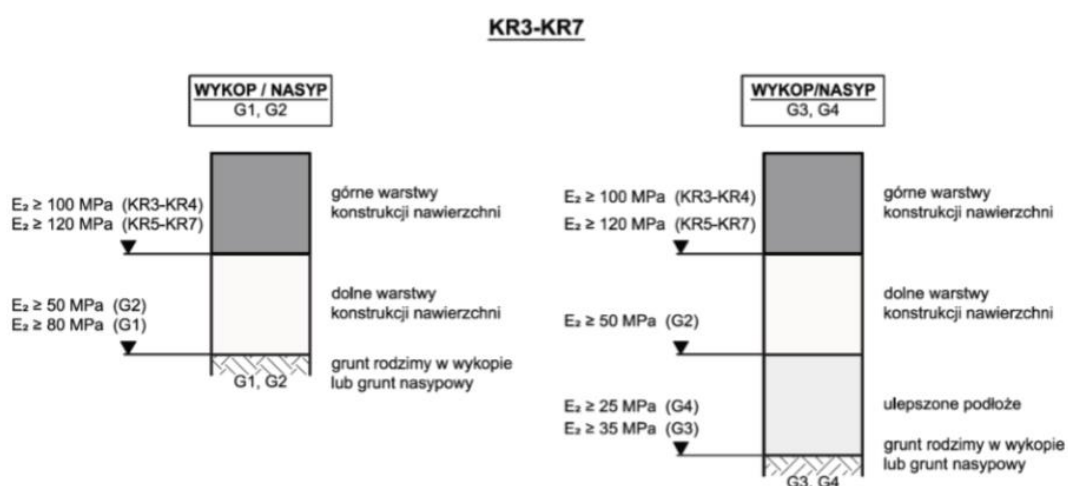
Rys. 3.4 Schemat nawierzchni dla kategorii ruchu KR1 – KR2 wraz z wymaganiami wtórnych modułów odkształcenia na powierzchni warstw w zależności od grupy nośności podłoża gruntowego (KTKNPP, 2014)

Dolna konstrukcja nawierzchni składa się z (tablica 3.3):

- podbudowy pomocniczej,
- warstwy mrozoochronnej (odsączającej, odcinającej).

Podbudowa pomocnicza tworzy platformę umożliwiającą prawidłowe wbudowanie podbudowy zasadniczej, a podczas eksploatacji nawierzchni wspomaga górne warstwy nawierzchni w rozłożeniu naprężeń od kół pojazdów oraz ochronę nawierzchni przed wysadzinami powodowanymi przez szkodliwe działanie mrozu oraz odwodnienie wgłębne. Podbudowa pomocnicza może być wykonana z:

- kruszywa naturalnego stabilizowanego mechanicznie,
- mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym,
- gruntu stabilizowanego spoiwami hydraulicznymi.



Rys. 3.5 Schemat nawierzchni dla kategorii ruchu KR3 – KR7 wraz z wymaganiami wtórnych modułów odkształcenia na powierzchni warstw w zależności od grupy nośności podłoża gruntowego (KTKNPP, 2014)

Tablica. 3.5 Klasyfikacja grup nośności podłoża gruntowego nawierzchni  $G_i$  (KTKNPP, 2014)

Lp.	Grupa nośności podłoża gruntowego $G_i$	Wskaźnik nośności CBR po 4 dniach nasączenia wodą <sup>1)</sup> [%]	Wtórny moduł odkształcenia $E_2$ <sup>1)</sup> [MPa]
1	2	3	4
1.	G1	$CBR \geq 10$	$E_2 \geq 80$
2.	G2	$5 \leq CBR < 10$	$50 \leq E_2 < 80$
3.	G3	$3 \leq CBR < 5$	$35 \leq E_2 < 50$
4.	G4	$2 \leq CBR < 3$	$25 \leq E_2 < 35$

1) warunki badania przyjęć wg normy PN-S-02205:1998

Tablica. 3.6 Klasyfikacja nośności podłoża gruntowego nawierzchni w zależności od wysadzinowości gruntu i warunków wodnych (KTKNPP, 2014)

Lp.	Rodzaj gruntu podłoża nawierzchni	Grupa nośności podłoża gruntowego nawierzchni, gdy warunki wodne są:		
		dobrze	przeciętne	złe
1	2	3	4	5
1.	Grunty niewysadzinowe	G1	G1	G1
2.	Grunty wątpliwe	G2	G2	G3
3.	Grunty mało wysadzinowe	G3	G4	G4
4.	Grunty bardzo wysadzinowe	G4	G4	G4

Wymagany poziom nośności warstwy podbudowy pomocniczej musi być zapewniony zarówno w czasie budowy, jak i w całym okresie eksploatacji nawierzchni. W czasie budowy drogi rolą podbudowy jest rozłożenie naprężeń od ruchu technologicznego oraz ochrona przed powstawaniem uszkodzeń na każdym etapie prac budowlanych. Powinna ona również zapewnić prawidłowe ułożenie i zagęszczenie górnych warstw podbudowy (Piłat i Radziszewski, 2004).

Głównym zadaniem warstwy mrozochronnej jest ochrona nawierzchni przed wysadzinami powodowanymi przez szkodliwe działanie mrozu i zwiększenie nośności warstw dolnych konstrukcji nawierzchni.

Warstwa ta może być wykonana z:

- mieszanki niezwiązanej,
- mieszanki związanej spoiwami hydraulicznymi,
- gruntów niewysadzinowych,
- gruntów stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi,
- gruntów stabilizowanych wapnem (KTKNPP, 2014).

Warstwa odsączająca powinna zapewnić odprowadzenie wody przedostającej się od spodu nawierzchni. Rolę warstwy odsączającej w niektórych przypadkach może pełnić warstwa mrozochronna lub warstwa ulepszonego podłoża. Warstwa ta musi być wykonana z materiału ziarnistego o odpowiednim uziarnieniu i o współczynniku filtracji  $k_{10} \geq 8$  m/dobę.

Warstwa odcinająca jest to warstwa separująca dolne warstwy konstrukcji nawierzchni lub warstwę ulepszonych podłoża od przenikania do nich drobnych cząstek ze spoistego podłoża gruntowego. Warstwa ta była wykonywana z odpowiednio uziarnionego piasku, a w ostatnim czasie jest ona wykonywana z geotekstyliów – geowłókniny lub geotkaniny separacyjnej (KTKNPP, 2014).

Spodem konstrukcji nawierzchni jest spód najniższej warstwy, spoczywający na podłożu gruntowym lub na warstwie ulepszonych podłoża gruntowego, zaś górą robót ziemnych jest poziom górnej powierzchni gruntu nasypowego (w nasypie) lub poziom górnej powierzchni gruntu rodzimego (w wykopie). Grunt ten zarówno w wykopie, jak i w nasypie, może być gruntem ulepszonym. Ważnym elementem jest ustalenie nośności podłoża gruntowego (tablica 3.5) przed rozpoczęciem prac projektowych. Wpływ na nośność podłoża gruntowego ma rodzaj gruntu oraz poziom wody gruntowej (tablica 3.6). Podczas wykonywania robót należy zwracać uwagę na zmieniające się warunki gruntowe ponieważ nie wszystkie zmiany gruntów mogą być rozpoznane podczas rozpoznania geologicznego przed projektowaniem danej drogi (Wiłun, 2003).

## 4. Podbudowy

Podbudowa jest warstwą pośrednią w konstrukcji drogowej, zmniejsza ona naprężenia pochodzące od nacisków kół samochodowych na warstwę ścieralną na naprężenia, jakie może przenieść podłoże gruntowe.

Wymagania dla podbudów są następujące (Piłat i Radziszewski, 2004):

- powinna być jednorodna, równomiernie zagęszczona, aby nie powodowała nadmiernych odkształceń, spękań i innych uszkodzeń w warstwach położonych na niej,
- powinna stanowić przejście od podłoża gruntowego, które nie posiada dużej sztywności do warstwy ścieralnej, która charakteryzuje się dużymi modułami sztywności,
- powinna być zabezpieczona przed przenikaniem cząstek podłoża gruntowego oraz od nadmiernego zawilgocenia przez warstwy pośrednie: warstwę odcinającą, odsączającą lub morozochronną,
- podbudowy, głównie asfaltowe, powinny być ze sobą dobrze związane dla uzyskania korzystniejszego rozkładu naprężeń na podłożu,
- powinny posiadać poprzeczny i podłużny profil zgodny z profilem warstw wyższych, niedopuszczalne są większe odchyłki w równości warstwy, niedopuszczalne jest poprawianie spadków poprzecznych oraz wysokości niwelety zmienną grubością wyższych warstw konstrukcji drogowej,
- materiały powinny spełniać wymagania warstwy podbudowy oraz należy uwzględnić możliwość użycia materiałów miejscowych, co spowoduje zmniejszenie kosztów budowy (mniejsze koszty transportu materiałów),
- istotnym elementem wykonania podbudowy jest również odpowiedni dobór technologii jej wykonania, która ma wpływ na optymalizację kosztów budowy.

### 4.1 Rodzaje podbudów pomocniczych

Wyróżnia się następujące rodzaje podbudów pomocniczych według kryterium materiału użytego do wykonania podbudowy pomocniczej (Piłat i Radziszewski, 2004, Kalabińska i in., 2008, Sieniawska – Kuras, 2010):

- podbudowy z gruntów stabilizowanych (cementem, wapnem),
- podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie,
- podbudowy z tłuczni kamiennego,
- podbudowy z chudego betonu,

- podbudowy betonowe (z betonu cementowego, z betonu popiołowego),
- podbudowy bitumiczne (z betonu asfaltowego, z piasku otoczonego asfaltem, z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej).

#### **4.1.1 Podbudowa z gruntu stabilizowanego cementem**

Stabilizacja cementem jest najbardziej popularną technologią wykonywania stabilizacji podłoża. Wykonuje się ją dla podbudów nośnych nawierzchni drogowych, parkingów, chodników, ścieżek rowerowych oraz dla wykonywania poszerzeń istniejących nawierzchni. Stabilizacja gruntu cementem to mieszanka rozdrobnionego gruntu z odpowiednią ilością cementu i wody. Dzięki wprowadzeniu cementu do gruntu zachodzi proces wiązania cementem oraz proces twardnienia samego cementu. Skład tej mieszanki musi być zaprojektowany zgodnie z wymaganiami normowymi (Kalabińska i in., 2008). Kryterium przydatności gruntu do stabilizacji cementem jest wytrzymałość gruntu stabilizowanego cementem po 7 i 28 dniach ( $R_7$  i  $R_{28}$ ). Mieszanka może być wykonywana bezpośrednio na budowie, przez wymieszanie istniejącej warstwy z odpowiednią ilością cementu lub w betoniarkach (Piłat i Radziszewski, 2004).

#### **4.1.2 Podbudowa z gruntu stabilizowanego wapnem**

Grunty stabilizowane wapnem stosowane są do warstwy ulepszonego podłoża oraz dolnej warstwy podbudowy o kategorii ruchu KR1 - KR2. Dzięki stabilizacji wapnem istnieje możliwość wykorzystania nieprzydatnych gruntów spoistych znajdujących się w podłożu. Grunty te zmieniają swoją nośność w zależności od warunków wodnych. Grunty spoiste w stanie suchym są wystarczająco nośne jako podłoże pod konstrukcję drogi. Pod wpływem wody tracą swoją nośność, dlatego stabilizacja wapnem stawiana jest, dzięki swoim specjalnym właściwościom, wyżej od stabilizacji cementem lub innymi środkami chemicznymi (Sieniawska – Kuras, 2010). Wprowadzony wapń powoduje rozpoczęcie reakcji pomiędzy nim a minerałami iłowymi. Zachodzi strukturalne przemieszczenie wody, wymiana jonowa oraz zbryłowanie spoistych części gruntu (koagulacja). Dzięki tym procesom grunt stabilizowany wapnem odporny jest na działanie wody, pozbywa się skłonności do pęcznienia i skurczu oraz uodparnia się na działanie mrozu. Z czasem ma miejsce hydrauliczne wiązanie, które przyczynia się do trwałej zmiany struktury gruntów spoistych. Mieszankę wykonuje się bezpośrednio na budowie. Przez okres 7 dni warstwę z gruntu stabilizowanego wapnem należy utrzymywać w stanie lekko wilgotnym (Piłat i Radziszewski, 2004).



### **4.1.3 Podbudowa z kruszywa stabilizowanego mechanicznie**

Do wykonania podbudowy z kruszywa stabilizowanego mechanicznie stosuje się mieszanki o odpowiednio dobranym uziarnieniu. Są to mieszanki z kruszywa naturalnego, łamanego lub żużla wielkopieczowego. Właściwości kruszyw użytych do mieszanki oraz uziarnienie mieszanki zostało opisane w rozdziale 4.2 niniejszej pracy. Warstwę taką zagęszcza się przy wilgotności optymalnej, natomiast sposób zagęszczenia warstw podbudowy z kruszywa naturalnego został opisany w rozdziale 4.3.

Minimalna grubość warstwy podbudowy powinna wynosić:

- dla kruszyw łamanych i żużli 10 cm,
- dla kruszyw naturalnych 12,5 cm,
- dla mieszanek kruszyw 11 cm (Kalabińska i in., 2008, Sieniawska – Kuras, 2010).

### **4.1.4. Podbudowa z tłucznia kamiennego**

Podbudowy z tłucznia kamiennego wykonuje się w konstrukcji drogi zazwyczaj jako dwie warstwy:

- podbudowę pomocniczą (warstwa dolna),
- podbudowę zasadniczą (warstwa górna).

Grubość warstwy po zagęszczeniu nie powinna być większa niż 20 cm. Warstwy zaprojektowane jako grubsze niż 20 cm powinny być wykonywane w dwóch warstwach, z czego górna warstwa powinna mieć grubość 1,5-krotnie większą niż wymiar największych ziaren tłucznia kamiennego (Sieniawska – Kuras, 2010). Podbudowę pomocniczą wykonuje się z tłucznia o frakcji 31,5/63 mm lub 20/63 mm, a podbudowę zasadniczą wykonuje się z tłucznia o tej samej frakcji, jak dla podbudowy pomocniczej. Warstwa ta jednak jest klinowana kliniecem 0/20 mm. Podbudowa pomocnicza dzięki przestrzeniom między ziarnami dobrze przepuszcza wodę (Piłat i Radziszewski, 2004, Kalabińska i in., 2008).

### **4.1.5. Podbudowa z chudego betonu**

Podbudowa z chudego betonu jest stosowana we wszystkich kategoriach ruchu od KR1 do KR7. Podbudowę tę układa się głównie układarkami mechanicznymi, dzięki temu uzyskujemy równomiernie rozłożoną mieszankę. Układanie rozścielaczem pozwala na uzyskanie równej nawierzchni. Rozkładanie równiarkami lub spycharkami może spowodować większe odchyłki w równości wykonywanej warstwy. W miejscach niedostępnych prace mogą być wykonywane ręcznie. Dla prawidłowego wykonywania

mieszanki z chudego betonu ważnym jest właściwe zaprojektowanie mieszanki oraz jej pielęgnacja, bezpośrednio po wykonaniu warstwy podbudowy. Należy ją utrzymywać w stanie wilgotnym (Kalabińska i in., 2008). Przez 7 dni od wykonania warstwy nie należy po niej jeździć; wyjątkiem może być tylko sprzęt utrzymujący jej wilgotność. Podstawowym badaniem jest badanie wytrzymałości po 7 (R<sub>7</sub>) i 28 (R<sub>28</sub>) dniach. Wytrzymałość mieszanki po 28 dniach powinna mieścić się w granicach od 6 do 9 MPa. Na drogach szybkiego ruchu oraz autostradach dopuszcza się, aby wytrzymałość chudego betonu pod nawierzchnią betonową była powyżej 6 MPa, a mniejsza niż 20 MPa. Przyspiesza to proces wykonywania robót. Beton szybciej uzyskuje potrzebną wytrzymałość, co pozwala na szybsze wykonanie dalszych robót (Sieniawska – Kuras, 2010).

Ze względu na rozkład naprężeń w konstrukcji, podbudowa z chudego betonu znajduje się pomiędzy podbudową sztywną a podatną (Piłat i Radziszewski, 2004.).

#### **4.1.6. Podbudowa z betonu cementowego**

Podbudowa z betonu cementowego jest wykonywana z mieszanki betonowej. Podbudowa stosowana jest głównie na parkingach oraz zatokach autobusowych, pod nawierzchnią z kostki betonowej lub granitowej. Wymagania dotyczące zbrojenia płyt, zagęszczania mieszanki betonowej i formowania szczelin dylatacyjnych są określone w specyfikacjach technicznych D.04.06.01. Podbudowa powinna być układana tylko w sposób mechaniczny układarkami w deskowaniach z prowadnicami lub układarkami z szalunkiem ślizgowym (Piłat i Radziszewski, 2004, Kalabińska i in., 2008, Sieniawska – Kuras, 2010).

#### **4.1.7. Podbudowa z betonu popiołowego**

Podbudowa z betonu popiołowego stosowana jest do podbudów nośnych części nawierzchni drogowych. Mieszanka z betonu popiołowego składa się z doboru odpowiedniej proporcji: kruszywa, popiołów lotnych z węgla kamiennego i aktywnych popiołów lotnych z węgla brunatnego, wapna lub cementu oraz wody i dodatków ulepszających (Piłat i Radziszewski, 2004). Mieszanka powinna zostać wykonana w betoniarkach lub stacjonarnych mieszankach, które zapewnią jej jednorodność. Układa się ją mechanicznie w prowadnicach. Gdy technologia wykonania podbudowy wymaga wykonania jej w dwóch warstwach, druga warstwa powinna zostać

wykonana bezpośrednio po zakończeniu zagęszczania pierwszej warstwy. Warstwę zagęszcza się płytami wibracyjnymi. Układanie następnych warstw konstrukcji drogowej można rozpocząć dopiero po 30 dniach od jej wykonania, co w znacznym stopniu wydłuża czas technologiczny wykonania robót (Sieniawska – Kuras, 2010).

#### **4.1.8. Podbudowa z betonu asfaltowego**

Podbudowa z betonu asfaltowego stosowana jest do budowy nośnych części nawierzchni drogowej o obciążeniu ruchu od KR1 do KR7. Składa się ona z jednej lub więcej warstw wytworzonej i zagęszczonej na gorąco mieszanki mineralno-asfaltowej, spełniającej wymogi betonu asfaltowego. Podłoże pod podbudowę powinno być równe, suche i skropione emulsją asfaltową. Warstwy pomiędzy kolejnymi warstwami podbudowy asfaltowej powinny również zostać oczyszczone oraz skropione emulsją asfaltową dla zapewnienia właściwego połączenia międzywarstwowego. Dopuszcza się wykonanie dwóch warstw podbudowy bezpośrednio po sobie. Drugą warstwę wykonuje się po zagęszczeniu pierwszej i istnieje wtedy możliwość wykonania ich bez skropienia emulsją asfaltową. Mieszanki asfaltowe produkuje się w otaczarkach o mieszaniu cyklicznym lub ciągłym. Dozowanie powinno być wagowe, dopuszczalne jest dozowanie objętościowe asfaltu uwzględniając jego gęstość w zależności od temperatury. Sterowanie powinno być zautomatyzowane i elektroniczne (Piłat i Radziszewski, 2004). Transport mieszanki betonu asfaltowego powinien odbywać się pojazdami samowładowczymi, przystosowanymi do utrzymania wymaganej temperatury mieszanki do czasu jej wbudowania. Najlepszym sposobem transportu jest transport samochodami termosami z podwójnymi ścianami skrzyni wyposażonej w system grzewczy. Jednak ze względu na znaczny koszt takiego transportu (cena pojedynczej naczepy) jest on w Polsce rzadko wykorzystywany. Mieszanka wbudowywana jest za pomocą układarki (rozścielacza), która umożliwia uzyskanie jednakowej grubości warstwy, odpowiedniej równości i jednakowego stopnia wstępnego zagęszczenia (Sieniawska – Kuras, 2010). Zagęszczanie powinno odbywać się walcami gładkimi oraz walcami ogumionymi niezwłocznie po ułożeniu mieszanki i zgodnie ze schematem przejść walca ustalonym na odcinku próbnym (Kalabińska i in., 2008).

#### **4.1.9. Podbudowa z piasku otoczonego asfaltem**

Podbudowa z piasku otoczonego asfaltem jest coraz rzadziej stosowana w Polsce. Stosuje się ją do nawierzchni drogowych o obciążeniu od KR1 do KR4. Mieszanka jest produkowana w zespołach maszyn do suszenia i otaczania na gorąco MMA typu betonowego. Układa się ją w prowadnicach albo w świetle wcześniej ustawionych krawężników. Zagęszcza się ją walcami ogumionymi (Piłat i Radziszewski, 2004, Kalabińska i in., 2008).

#### **4.1.10. Podbudowa z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)**

Podbudowa z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej jest stosowana na drogach dla wszystkich kategorii obciążenia ruchem. Zazwyczaj jest ona wykonywana dla nawierzchni, które uległy zniszczeniu i podlegają całkowitej przebudowie. Mieszanki MCE wykonywane są w takim wypadku na miejscu. Mieszanka ta składa się zazwyczaj z destruktu ze starej nawierzchni, z nowego materiału doziarniającego dowiezionego w ilości odpowiadającej zaprojektowanemu składowi mieszanki. Bardzo ważnym elementem wykonania tej podbudowy jest rozpoznanie konstrukcji istniejącej nawierzchni co pozwala ustalić ostateczny skład mieszanki. Podbudowa z MCE jest również stosowana do wykonania poszerzeń. Wytwarzana jest wtedy w mieszarce stacjonarnej i rozkładana na drodze typową rozkładarką. Wykonanie podbudowy z MCE polega na rozłożeniu materiału doziarniającego, frezowaniu istniejącej nawierzchni, wyrównaniu i wstępnym dogęszczeniu walcem stalowym, rozłożeniu cementu oraz mieszaniu składników całej warstwy z jednoczesnym dozowaniem emulsji asfaltowej. Zagęszczanie mieszanki polega na wstępnym zagęszczeniu jej walcem ogumionym, a następnie docelowym zagęszczeniu walcami stalowymi wibracyjnymi (Piłat i Radziszewski, 2004, Kalabińska i in., 2008, Sieniawska – Kuras, 2010).

### **4.2 Wymagania mieszanek do wykonania podbudowy z kruszywa stabilizowanego mechanicznie**

Do warstw podbudowy pomocniczej są stosowane mieszanki niezwiązane o frakcji: 0/31,5 mm; 0/63mm.

Wymagania oraz sposób badania mieszanek do warstw podbudowy pomocniczej są następujące:

- zawartość pyłów <0,063 mm

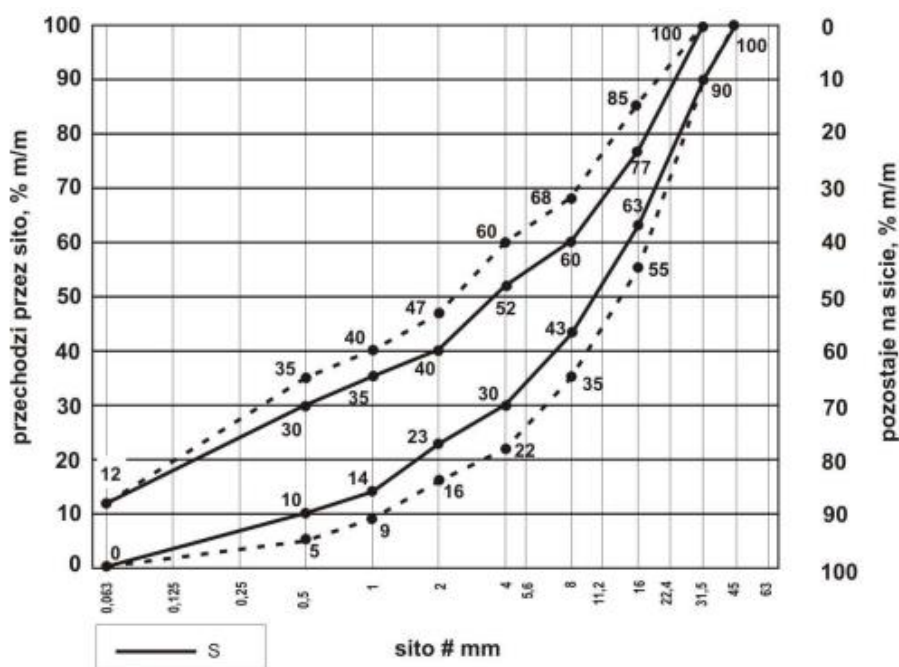
Zawartość pyłów należy oznaczać według normy PN-EN 933-1, po pięciokrotnym zagęszczeniu metodą Proctora.

- zawartość nadziarna < 10%

Oznacza się według normy PN-EN 933-1, po pięciokrotnym zagęszczeniu metodą Proctora.

- uziarnienie

Oznacza się według normy PN-EN 933-1 i powinno spełniać wymagania wskazane na rysunkach 4.1÷4.2. Mieszanka jest przydatna, gdy jej uziarnienie po pięciokrotnym zagęszczeniu metodą Proctora mieści się w krzywych granicznych podanych na rysunkach 4.1÷4.2.



Rys. 4.1 Graniczne wymagania mieszanki niezwiązanej 0/31,5 mm (WT-4, 2010)

- mrozoodporność, wodoprzepuszczalność

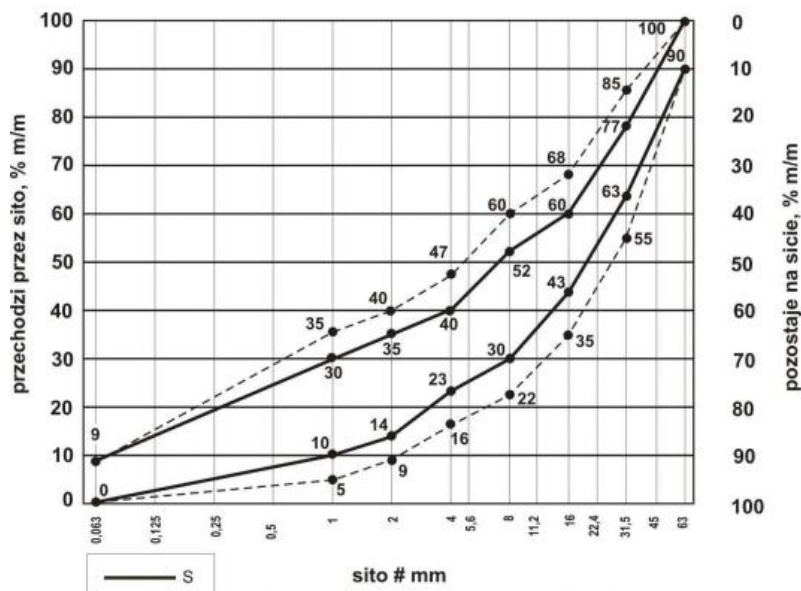
Dla podbudowy pomocniczej nie jest wymagana wodoprzepuszczalność, ponieważ rozwiązania konstrukcyjne tego nie przewidują (podbudowa pomocnicza jest ułożona na warstwie wodoprzepuszczalnej).

- zawartość wody

Zawartość wody powinna odpowiadać ilości wymaganej w trakcie wbudowywania i zagęszczania, określonej według normy PN-EN 13286-2.

- wartość CBR

CBR należy wyznaczyć według normy PN-EN 13286-47. Badanie należy wykonać dla mieszanki zagęszczonej do wskaźnika zagęszczenia  $I_s = 1,0$  i po 96 godzinach przechowywania w wodzie (WT-4, 2010).



Rys. 4.2 Graniczne wymagania mieszanki niezwiązanej 0/63 mm (WT-4, 2010)

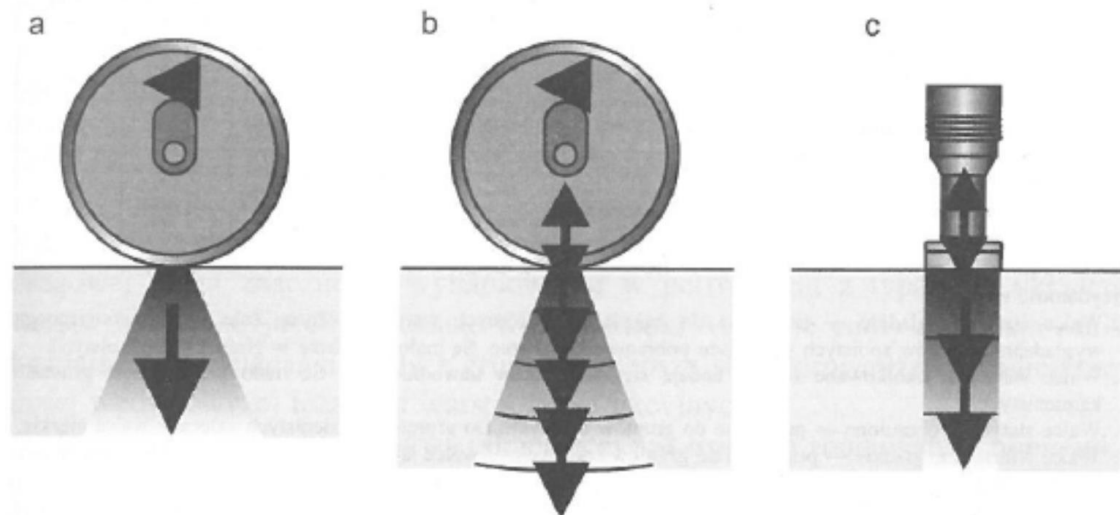
### 4.3 Zagęszczanie warstwy podbudowy

Sposoby zagęszczania warstw podbudowy można podzielić na grupy o różnym oddziaływaniu na grunt (rys 4.3):

- zagęszczenie statyczne – stosuje się przeważnie do zagęszczania w nasypach gruntów spoistych,
- zagęszczenie dynamiczne (wibracyjne) – stosuje się do zagęszczania gruntów niespoistych (sypkich) drobnoziarnistych i gruboziarnistych oraz gruntów kamienistych,
- zagęszczenie udarowe.

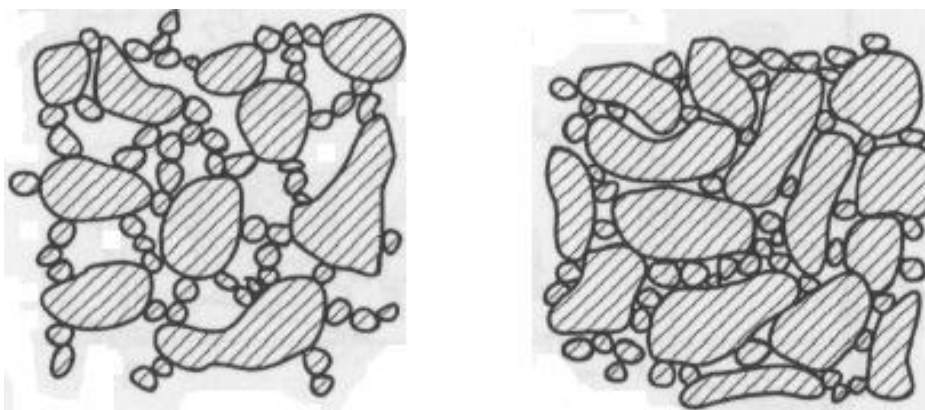
Zagęszczenie statyczne powoduje przemieszczenie ziaren i cząstek gruntu. Po wyparciu i sprężeniu powietrza oraz po wyparciu wody z porów, ziarna i cząstki gruntu przejmują obciążenie. Zagęszczenie statyczne polega na poddaniu gruntu działaniu ciśnienia statycznego pochodzącego od ciężaru własnego maszyny zagęszczającej. Podczas wałowania zachodzi proces niszczenia słabszych ziaren (rys 4.4). Maszyną do statycznego oddziaływania na podłoże jest walec stalowy gładki. Zagęszczenie następuje na skutek ciężaru własnego. Oddziaływanie walca statycznego sięga na niewielką

głębokość, zatem maszyny do takiego oddziaływania muszą posiadać duży ciężar. W walcach ogumionych oddziaływanie na zagęszczaną warstwę zależy od masy walca, liczby kół oraz ciśnienia w kołach. Walce statyczne oddziałują na zagęszczaną warstwę na głębokość od 10 do 50 cm. Głębokość zagęszczania zależy od rodzaju zagęszczanego gruntu/kruszywa i jego wilgotności, rodzaju, masy walca oraz liczby przejazdów po jednym śladzie.



Rys. 4.3 Zagęszczanie: a) statyczne, b) wibracyjne, c) udarowe (Piłat i Radziszewski, 2004)

Zagęszczanie dynamiczne wibracyjne polega na przenoszeniu drgań mechanicznych wywołanych przez wibrator na masę gruntową. Drgania zmniejszają opór tarcia wewnętrznego pomiędzy poszczególnymi ziarnami i cząstkami. Dzięki temu uzyskujemy grunt zagęszczony, w którym mniejsze ziarna i cząstki wypełniają pory między większymi ziarnami. Wpływ na wibracyjne zagęszczenie gruntów ma skład granulometryczny, wskaźnik różnoziarnistości, wilgotność gruntu, częstotliwość drgań, przyspieszenie drgań, obciążenie statyczne, czas wibracji i energia zagęszczania.



Rys. 4.4. Przemieszczanie ziaren gruntu (uszczelnianie) podczas procesu zagęszczania statycznego (Pisarczyk, 2005)

Do maszyn stosowanych do zagęszczenia dynamicznego zaliczamy:

- walce wibracyjne oddziaływujące jednocześnie statycznie i dynamicznie na zagęszczaną warstwę. Dlatego uzyskuje się lepsze efekty zagęszczenia. Walce wibracyjne oddziałują na głębokość do 0,8 m,

- zagęszczarki płytowe, których elementem zagęszczającym jest stalowa płyta drgająca. Stosuje się je do warstwowego zagęszczania gruntów niespoistych, dobrze sprawdzają się w miejscach trudno dostępnych. Głębokość zagęszczania zależy od powierzchni i kształtu płyty, jej ciężaru oraz częstotliwości drgań (Pisarczyk, 2005).

Rodzaje oddziaływań oraz maszyny stosowane do zagęszczania przedstawia tablica. 4.1.

Tablica. 4.1 Rodzaje oddziaływania i maszyny do zagęszczania (Pisarczyk, 2005)

Rodzaj oddziaływania	Maszyny do zagęszczania
Statyczne	walce gładkie, okołkowane, kołowe i ogumione, ciągnione i samojezdne, ciągniki gąsienicowe i kołowe
Dynamiczne (wibracyjne)	płyty wibracyjne (samobieżne, ciągnione), walce wibracyjne (gładkie, okołkowane, na kołach ogumionych), wibratory wgłębne
Udarowe	ubijaki swobodne i spadające (grawitacyjne), ubijaki elektryczne i spalinowe, ubijaki pneumatyczne

#### **4.4 Wymagania odbiorowe dla podbudów zasadniczej i pomocniczej z kruszywa stabilizowanego mechanicznie**

Sposoby wykonania badania płytą VSS oraz sposoby obliczania pierwotnego modułu odkształcenia  $E_1$ , wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz wskaźnika odkształcenia  $I_0$  zostały opisane w rozdziale 5.1 niniejszej pracy.

Wymagania w zakresie wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  dla podbudowy zasadniczej nie zostały sprecyzowane. Jedyнным dokumentem na jaki powołują się projektanci jest norma PN-97/S-06102, w której w tablicy 4.2 są zawarte wymagania dotyczące minimalnych wartości modułów odkształcenia w zależności od przyjętego wskaźnika nośności (Łupieżowiec i Syma, 2014a).

W trakcie przeprowadzania przez autora badań do niniejszej pracy, obowiązywała norma PN-84/S-96023, która została wycofana 25.08.2015 r. W normie PN-84/S-96023



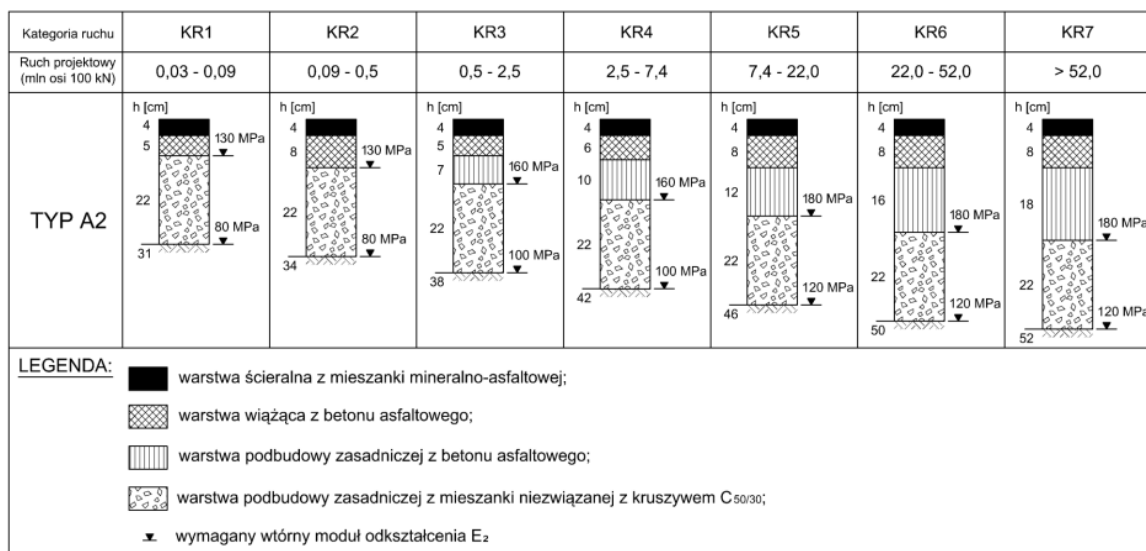
zawarto wymagania dla podbudów w zależności od kategorii ruchu (tab. 4.3). Pominięto w niej kategorię ruchu KR1. Ponadto nie występuje w tablicy 4.3 kategoria ruchu KR7.

Tablica. 4.2 Minimalne moduły odkształcenia w zależności od projektowanego wskaźnika nośności (PN-97/S-06102)

Podbudowa z kruszywa o wskaźniku $w_{noś}$ nie mniejszym niż [%]	Minimalny moduł odkształcenia mierzony płytą o średnicy 30 cm [MPa]	
	od pierwszego obciążenia $E_1$	od drugiego obciążenia $E_2$
60	60	120
80	80	140
120	100	180

Tablica. 4.3 Wymagania w zakresie modułu  $E_2$  dla podbudów, w zależności od kategorii ruchu (PN-84/S-96023)

Kategoria ruchu	Wtórny moduł odkształcenia mierzony płytą o średnicy 30 cm [MPa]
Ruch lekki – $R_2$	140
Lekko średni – $R_3$ i średni $R_4$	170
Ciężki – $R_5$ i bardzo ciężki – $R_6$	200



Rys. 4.5 Schemat nawierzchni dla kategorii ruchu KR1 – KR7 wraz z wymaganiami wtórnych modułów odkształcenia na podbudowie zasadniczej z kruszywa (KTKNPP, 2014)

Wymagania dla podbudowy pomocniczej są opisane w KTKNPiP (2014). Zostały one uzależnione od kategorii ruchu, i tak:

- dla kategorii ruchu KR1 – KR2 wtórny moduł odkształcenia wynosi  $E_2 = 80$  MPa
- dla kategorii ruchu KR3 – KR4 wtórny moduł odkształcenia wynosi  $E_2 = 100$  MPa

- dla kategorii ruchu KR5 – KR7 wtórny moduł odkształcenia wynosi  $E_2 = 120 \text{ MPa}$

W KTKNPP (2014) zostały przedstawione wymagania wtórnych modułów odkształcenia dla podbudowy zasadniczej dla kategorii ruchu od KR1 do KR7 (rys 4.5). Autor pracując na budowie, nie spotkał się do tej pory z zastosowaniem tych wymogów. Nadal stosowane są wymagania dla kategorii ruchu KR1 – KR2  $E_2 \geq 120 \text{ MPa}$ , a dla kategorii ruchu KR3 – KR4  $E_2 \geq 140 \text{ MPa}$ .

## 5. Badanie warstwy podbudowy

### 5.1 Płyta statyczna VSS

Nazwa badania płytą statyczną VSS wywodzi się od skrótu Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute (Szwajcarski Zarząd Drogownictwa) (Wyroślak i Ossowski, 2016). Metoda badawcza stosowana jest do warstw konstrukcyjnych podatnych oraz podłoża gruntowego (BN-64/8931-02). Metodę tę można stosować przy badaniu warstw z gruntów drobno- i gruboziarnistych oraz mieszanek niezwiązanych z kruszywa o maksymalnym wymiarze ziarna 63 mm. Metoda ta nie powinna być stosowana do warstw sztywnych (związanych hydraulicznie po rozpoczęciu procesu wiązania) (KPRNPP, 2013, załącznik B3). Obecnie w Polsce brakuje normy oraz wytycznych określających w jednoznaczny sposób wykonanie pomiaru dla wyznaczenia pierwotnego modułu odkształcenia  $E_1$  i wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$ , jak również wskaźnika odkształcenia  $I_0$  dla poszczególnych warstw konstrukcji drogowej.

W literaturze przedmiotu, wytycznych, aktach normatywnych i specyfikacjach procedura wykonania tego badania oraz sposób obliczania wyników różnią się między sobą w dość znacznym stopniu. W praktyce na budowie wtórny moduł odkształcenia zwany jest „nośnością” co wynika prawdopodobnie z tego, że wartość  $E_2$  w znacznej mierze decyduje o trwałości budowli drogowej. Wskaźnik odkształcenia uzyskiwany ze stosunku modułu wtórnego odkształcenia  $E_2$  do pierwotnego  $E_1$ , zwany jest „zagęszczeniem”, co jest określeniem błędnym (Łupieżowiec i Syma 2014a). Mimo to badanie płytą VSS jest powszechnie stosowane w praktyce w celu sprawdzenia „nośności” podbudowy oraz jej „zagęszczenia”.

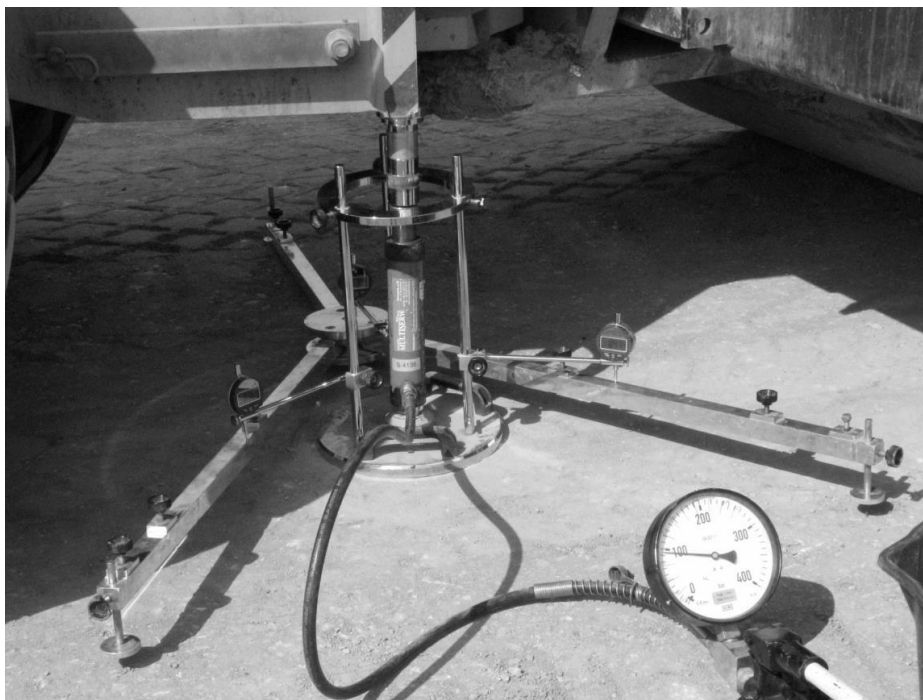
#### 5.1.1 Rodzaje płyt statycznych VSS

Rozróżnia się następujące rodzaje płyt statycznych:

a) płyta statyczna trzyczujnikowa (fot. 5.1) – składa się z (www.szurlat.pl):

- płyty stalowej  $\varnothing 300$  mm z poziomnicą oraz pierścieniem wyrównawczym z uchwytami do czujników,
- pompy obciążeniowej o sile nacisku 100 kN składającej się z pompy hydraulicznej z cylindrem hydraulicznym, manometru o zakresie skali 0-0,8 MN/m<sup>2</sup>, węża wysokociśnieniowego,

- przegubu sferycznego z trzpieniami przedłużającymi o różnej długości (łącznie płytę stalową z przeciwwagą),
- trzech czujników pomiarowych (zegarowe lub elektroniczne) z minimalnym zakresem pomiarowym 10 mm oraz o dokładności 0,01 mm,
- teleskopowego statywu pomiarowego – trójramiennego z belką poprzeczną,



Fot. 5.1 Przykładowa płyta statyczna trzyczujnikowa do badania VSS (zdjęcie własne)

c) płyta statyczna jednoczujnikowa (fot.5.2) – składa się z ([www.geolab.com.pl](http://www.geolab.com.pl)):

- płyty stalowej  $\varnothing 300$  mm z wbudowaną poziomnicą, tunelem pomiarowym i dolnym adapterem do cylindra,
- pompy obciążeniowej o sile nacisku 100 kN składającej się z pompy hydraulicznej z cylindrem hydraulicznym, manometru o zakresie skali 0-0,8 MN/m<sup>2</sup>, węża wysokociśnieniowego,
- przegubu kulowego z magnesem oraz trzpieniami przedłużającymi (łącznie płytę stalową z przeciwwagą),
- czujnika pomiarowego (zegarowego lub elektronicznego) o dokładności pomiaru 0,01 mm,
- teleskopowego statywu pomiarowego z uchwytem czujnika na końcu belki, libellą do poziomowania statywu oraz nóżkami z możliwością regulacji ich wysokości.



Fot. 5.2 Przykładowa płyta statyczna jednoczujnikowa do badania VSS (zdjęcie własne)

### 5.1.2 Metodologia wykonania badania płytą VSS

W celu wykonania badania płytą statyczną VSS należy (KPRNPP, 2013):

- płytę stalową ustawić pod przeciwwagą, w taki sposób, aby przegub kulowy można było oprzeć pod ramą konstrukcyjną przeciwwagi (samochód ciężarowy, koparka, walec),
- płytę dopasować do powierzchni badanej warstwy, dociskając ją rękami przez kilkakrotny jej obrót. W przypadku, gdy badana warstwa nie jest dokładnie wyrównana, należy ją wyrównać cienką warstwą wysuszonego piasku kalibrowanego (np. frakcji 0,5 -1,0 mm),
- na płycie ustawić cylinder hydrauliczny z trzpieniami przedłużającymi wraz z przegubem; pompę hydrauliczną połączyć z cylindrem hydraulicznym,
- statyw pomiarowy ustawić w taki sposób, aby jego punkty podparcia były w jak największej odległości zarówno od płyty, jak i od punktów podparcia przeciwwagi (BN-64/8931-02). Jeśli jest to płyta statyczna jednoczujnikowa statyw należy wypoziomować za pomocą zamontowanej na nim libelli,
- zamocować i wyzerować czujniki pomiarowe,
- przygotować arkusz roboczy z określonymi współrzędnymi punktu badawczego.

### 5.1.3 Błędy podczas wykonywania badań płytą statyczną VSS

Badanie płytą statyczną powinno być przeprowadzone zgodnie z jej procedurą. Podczas wykonywania tego badania jesteśmy narażeni na pewne nieprawidłowości

związane z ustawieniem sprzętu, sposobem wykonania badania, czynnikami zewnętrznymi oraz błędami odczytu. Przed wykonaniem badania należy przeanalizować czynniki zewnętrzne mogące mieć wpływ na jego prawidłowe wykonanie. Jednym z czynników zewnętrznych są warunki atmosferyczne (Łupieżowiec i Syma, 2014). W okresie wczesnowiosennym, późnojesiennym oraz zimowym, należy sprawdzić temperaturę badanej warstwy, która nie powinna być niższa niż  $0^{\circ}\text{C}$  (KPRNPP, 2013). Należy również sprawdzić czy w badanej warstwie nie występuje zmarzlina. Sprawdzenie powinno polegać na przekopaniu badanej warstwy w pobliżu planowanego wykonania badania. Przekop taki należy wykonać nawet wtedy, gdy temperatura badanej warstwy jest dodatnia, ale w ostatnim okresie występowały ujemne temperatury powietrza. Następnym czynnikiem atmosferycznym jest porywisty wiatr. Sprzęt używany jako przeciwwaga (samochód ciężarowy, walec) posiada dużą powierzchnię, na którą oddziałuje wiatr, powodując jej drgania, które są przenoszone bezpośrednio na czujnik pomiarowy. Drgania przeciwwagi można ograniczyć ustawiając ją „pod wiatr”. Podobny efekt „drżania czujnika” powoduje ruch technologiczny prowadzony w pobliżu wykonywania badania. Na czas wykonywania badania należy ograniczyć ruch technologiczny oraz nie należy w pobliżu zagęszczania warstwy. Problem stanowi ograniczenie drgań czujnika w przypadku konieczności wykonywania badania na drodze częściowo dopuszczonej do ruchu. W takiej sytuacji nie da się całkowicie wyeliminować ruchu w pobliżu wykonywania badania. Należy wtedy podjąć próbę zmniejszenia prędkości przejeżdżających samochodów. Najlepszym rozwiązaniem byłoby jednak na czas wykonywania całego badania wstrzymać ruch samochodów. Gdy nie jest to możliwe ze względu na duże natężenie ruchu, należy wstrzymać go całkowicie w czasie wykonywania odczytu pomiarów w zakresie obciążenia mającego wpływ na wynik (zależnie od metody 0,15 - 0,25 MPa lub 0,25 – 0,35 MPa). Czas wstrzymania ruchu wynosiłby ok. 5 min dla pierwotnego modułu odkształcenia  $E_1$  oraz 5 min dla wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$ . Minimalna masa przeciwwagi w punkcie przyłożenia przegubu dla końcowego obciążenia powinna wynosić dla podbudowy 0,45 MPa - 3,2 Mg (Łupieżowiec i Syma, 2015).

Według normy BN-64/8931-20 przeciwwaga w punkcie przyłożenia przegubu powinna wynosić 4,0 Mg, z tym, że obciążenie końcowe osiąga wartość 0,55 MPa. Brak wymaganego obciążenia spowoduje niemożność uzyskania odpowiedniego ciśnienia potrzebnego do wykonania badania. W sprzęcie budowlanym służącym za przeciwwagę nie powinna znajdować się w trakcie badania żadna osoba. Każdy ruch osoby przebywającej w pobliżu sprzętu może powodować drżanie, co również ma wpływ na

uzyskiwane wyniki. Próba wejścia lub wyjścia z przeciwwagi (walec, samochód ciężarowy) również może spowodować drganie sprzętu. Po przygotowaniu odpowiedniej przeciwwagi oraz poinformowaniu pracowników znajdujących się w pobliżu o wykonywanym badaniu, przystępujemy do ustawiania sprzętu badawczego. Badana warstwa powinna być równa. Jeśli występują jakieś nierówności powinno się je wyrównać jak najcieńszą warstwą suchego piasku kalibrowanego. Poprawne przygotowanie warstwy do badań spowoduje przyleganie całej płyty do powierzchni warstwy, co pozwoli na prawidłowe ocenienie jej stanu. Przykład wadliwego wykonania podłoża przed przystąpieniem do badań przedstawiono na fot. 5.3. i fot. 5.4.



Fot. 5.3 Przykład wadliwego wykonania wyrównania przed wykonaniem badania (zdjęcie własne)

W celu wyznaczenia wartości modułu odkształcenia zakłada się całkowite przyleganie płyty do badanej warstwy; brak tego przylegania powoduje błędy w obliczeniach. Taki wynik nie odzwierciedla zagęszczenia i nośności badanej warstwy. Zbyt gruba warstwa wyrównawcza spowoduje osiadanie wykonanego wyrównania, co z kolei wykażą czujniki pomiarowe - pokażą osiadanie badanej warstwy wraz z osiadaniami wykonanej warstwy wyrównawczej. Kolejnym elementem, na który należy zwrócić uwagę jest ustawienie statywu pomiarowego. Statyw powinien mieć ustawione punkty podparcia jak najdalej od podparcia przeciwwagi oraz płyty stalowej. Trzeba pamiętać również o zamontowaniu przegubu sferowego z magnesem. Brak zamocowania może skutkować przesunięciem trzpienia przedłużającego, a nawet jego wypadnięcie przy wyższym ciśnieniu podczas badania. Podczas całkowitego odprężenia brak przegubu

z magnelem powoduje w aparacie jednopunktowym osunięcie się trzpienia przedłużającego na pierścień wyrównawczy z płyty, co powoduje jego przesunięcie, a w aparacie trzypunktowym spowoduje niekontrolowane wypadnięcie siłownika wraz z trzpieniem przedłużającym. Po ustawieniu sprzętu należy sprawdzić czy któraś z części ruchomych: siłownik lub wąż wysokociśnieniowy nie stykają się z płytą lub statywem. Jednym z najczęstszych błędów podczas ustawiania płyty statycznej trzyczujnikowej jest niewłaściwe rozstawienie czujników pomiarowych. Czujniki powinny być zamocowane na rzucie trójkąta równobocznego. Inne ustawienie czujników powoduje podczas nierównomiernego osiadania płyty błędne wskazania czujników. Przykład niepoprawnego ustawienia czujników przedstawiono na fot. 5.5. Jedyne prawidłowe ustawienie czujników pozwala na uzyskanie rzeczywistego, uśrednionego wyniku odczytu z trzech czujników.

Taki problem nie występuje przy płycie jednoczujnikowej, ponieważ czujnik jest zamocowany w środku płyty i nierównomierne osiadanie nie powoduje błędnego wskazania odczytu. Podczas samego wykonywania badania mogą nastąpić błędy odczytu; głównie zdarza się to na czujnikach analogowych. Drugim z najczęstszych błędów popełnianych podczas badania płytą statyczną jest skracanie czasu badania poprzez:

- pominięcie oczekiwania 2 minut pomiędzy odczytami w danym obciążeniu jednostkowym (niezależnie od wielkości osiadań),
- pominięcie oczekiwania kolejnych 2 minut, gdy różnica pomiędzy dwoma kolejnymi odczytami jest większa niż 0,05 mm i przejście na następny stopień obciążenia jednostkowego.

Samo wykonywanie badania, bez rozkładania sprzętu przy końcowym obciążeniu 0,45 MPa i bez potrzeby ponownego czekania 2 minut wynosi około 45 minut. Przyspieszenie badania płytą VSS powoduje uzyskanie wyższej wartości wtórnego modułu odkształcenia oraz większej wartości wskaźnika odkształcenia. Podczas badania warstwy o większym nachyleniu płytą statyczną trzyczujnikową może nastąpić „cofanie się” jednego z czujników - jest to spowodowane nierównomiernym osiadaniem płyty stalowej. Należy wówczas przerwać badanie i rozpocząć je w innym miejscu.

Przy dużym nachyleniu badanej warstwy należy zwrócić uwagę na zabezpieczenie przeciwwagi (samochód ciężarowy, walec), aby się nie przesunęła (fot. 5.6). Może to mieć nie tylko wpływ na wykonywane badanie, ale również może być niebezpieczne dla osoby wykonującej badanie. Podczas używania jako przeciwwagi koparek lub koparko – ładowarek należy zwrócić uwagę, gdy są one ustawione na podporach (stabilizatorach). Siłowniki podtrzymujące te podpory muszą być sprawne, ich osiadanie może zniszczyć sprzęt, za pomocą którego jest wykonywane badanie (Łupieżowiec i Syma, 2015).





Fot. 5.4 Przykład niepoprawnego przygotowania warstwy do badania płytą VSS (zdjęcie własne)



Fot. 5.5 Przykład nieprawidłowego ustawienia czujników podczas badania płytą VSS (zdjęcie autora)



Fot. 5.6 Zabezpieczenie przeciwwagi (walca) przed osunięciem się na warstwie o dużym nachyleniu podłużnym drogi (zdjęcie autora)

#### 5.1.4 Metodyka wykonywania badania

Sposób wykonania badania został określony w normie BN-64/8931-02; DODP, 1998; Instrukcji (1998) oraz KPRNPP, 2013.

Badanie płytą statyczną polega na pomiarze odkształceń pionowych (osiadania) warstwy pod wpływem nacisku statycznego, wywieranego na nią za pomocą stalowej okrągłej płyty. Nacisk na płytę uzyskuje się przez wywieranie ciśnienia za pośrednictwem lewarka zasilanego ręczną pompą olejową. Po badaniu płytą VSS określamy:

- pierwotny moduł odkształcenia  $E_1$  (podczas pierwotnego obciążenia badanej warstwy)
- wtórny moduł odkształcenia  $E_2$  (podczas wtórnego obciążenia badanej warstwy).

Wskaźnik odkształcenia  $I_0$  to stosunek wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  do pierwotnego modułu odkształcenia  $E_1$ .

Metodyka badania płytą VSS została ujęta w DODP (1998) i przedstawia się następująco:

Sposób wykonania badania:

- obciążenie wstępne od 0,00 do 0,05 MPa
- odciążenie wstępne od 0,05 do 0,00 MPa

I Cykl badania

- obciążenie od 0,00 do 0,55 MPa stopniami co 0,10 MPa, tj.

0,00 MPa, 0,05 MPa, 0,15 MPa, 0,25 MPa, 0,35 MPa, 0,45 MPa, 0,55 MPa

Czas trwania poszczególnych stopni obciążenia wynosi 1 minutę. Jeżeli różnica dwóch kolejnych odczytów na czujnikach nie przekroczy 0,02 mm, można przejść do następnego (wyższego) stopnia obciążenia jednostkowego.

- odciążanie od 0,55 do 0,00 MPa stopniami w sposób następujący:

0,55 MPa; 0,15 MPa; 0,05 MPa; 0,00 MPa

Czas trwania poszczególnych stopni odciążenia wynosi 1 minutę. Jeżeli różnica dwóch kolejnych odczytów na czujnikach nie przekroczy 0,02 mm, można przejść do następnego (niższego) stopnia odciążenia jednostkowego. Czas trwania ostatniego stopnia odciążenia wynosi 5 minut.

II Cykl badania

- obciążanie od 0,00 do 0,55 MPa stopniami jak w I cyklu
- odciążenie od 0,55 do 0,00 MPa stopniami jak w I cyklu

Obliczanie wyników:

- pierwotny i wtórny moduł odkształcenia

$$E_{1,2} = \frac{\Delta p \cdot D}{\Delta s} \cdot \frac{3}{4} \quad (5.1)$$

gdzie:

$\Delta p$  – przyrost obciążenia jednostkowego w I cyklu od 0,25 do 0,35 MPa

$\Delta s$  – przemieszczenie odpowiadające przyjętemu zakresowi obciążenia, cm

D – średnica płyty, 30 cm

Metodyka badania płytą VSS została również zawarta w normie BN-64/8931-02, Instrukcji (1998) oraz KPRNPP (2013) i przedstawia się następująco:

- obciążenie wstępne od 0,00 do 0,02 MPa

I Cykl badania

- obciążenie od 0,00 do 0,45 MPa stopniami co 0,05 MPa, tj.

0,00 MPa, 0,05 MPa, 0,10 MPa, 0,15 MPa, 0,20 MPa, 0,25 MPa, 0,30 MPa, 0,35 MPa, 0,40 MPa, 0,45 MPa

Czas trwania poszczególnych stopni obciążenia wynosi 2 minuty. Jeżeli różnica dwóch kolejnych odczytów na czujnikach nie przekroczy 0,02 mm, można przejść do następnego (wyższego) stopnia obciążenia jednostkowego.

- odciążanie od 0,45 do 0,00 MPa stopniami w sposób następujący:

0,45 MPa, 0,35 MPa, 0,25 MPa, 0,15 MPa, 0,05 MPa, 0,00 MPa

Czas trwania poszczególnych stopni odciążenia wynosi 2 minuty. Czas trwania ostatniego stopnia odciążenia wynosi 5 minut.

II Cykl badania

- obciążanie od 0,00 do 0,45 MPa stopniami jak w I cyklu

- odciążenie od 0,45 do 0,00 MPa stopniami jak w I cyklu

Obliczanie wyników:

- pierwotny i wtórny moduł odkształcenia wg BN-64/8931-02

$$M_E = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} \cdot D = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot D \quad (5.2)$$

gdzie:

$\Delta p$  – przyrost obciążenia jednostkowego w I cyklu od 0,25 do 0,35 MPa

$\Delta s$  – przemieszczenie odpowiadające przyjętemu zakresowi obciążenia

( $\Delta s = s_{0,35} - s_{0,25}$ ), cm

D – średnica płyty, tj. 30 cm (BN-64/8931-02)

- pierwotny i wtórny moduł odkształcenia wg KPRNPP (2013), załącznik B3

$$E_1, E_2 = \frac{3 \cdot \Delta p}{4 \cdot \Delta s} \cdot D \quad (5.3)$$

gdzie:

D – średnica płyty, mm

$\Delta p$  – różnica nacisków, kPa

$\Delta s$  – przyrost odkształcenia odpowiadający przyrostowi nacisków  $\Delta p$ , mm

Wskaźniki pierwotnego  $E_1$  i wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  należy podać z dokładnością do 1 MPa, a wartość wskaźnika odkształcenia  $I_0$  należy podać z dokładnością do jednego miejsca po przecinku (KPRNPP, 2013, załącznik B3, Rybak i Stilger-Szydło, 2010).

## 5.2. Lekka płyta dynamiczna

Badanie lekką płytą dynamiczną jest stosowane w Polsce jako alternatywa lub badanie uzupełniające do badania płytą statyczną VSS (Rybak i Stilger-Szydło, 2010). Badanie to pozwala na uzyskanie wartości dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$  badanej warstwy. Zaletą tego badania jest szybkość jego wykonania (ok. 2-3 min), dzięki czemu możemy w krótszym czasie sprawdzić większą powierzchnię, przy jednoczesnym zagęszczeniu siatki wykonywanych badań, w porównaniu z czasochłonnym badaniem płytą statyczną (Łupieżowiec i Syma, 2015). Płyta jest urządzeniem przenośnym, lekkim, obsługiwanym przez jedną osobę, łatwym w transporcie i obsłudze (Wyroślak i Ossowski, 2016). Nie wymaga korzystania z dodatkowego sprzętu; nie ma konieczności wstrzymania innych robót na czas pomiaru; natychmiast znany jest wynik badania. Lekka płyta dynamiczna jest zaliczana do sprzętu mobilnego - pomiar jest możliwy w trudno dostępnych miejscach, np. w kanałach, odwiertach, wąskich wykopach. Badanie można wykonywać dla niezwiązanych hydraulicznie warstw nośnych dla gruntów niespoistych o maksymalnej wielkości ziaren do 63 mm (Geolab, 2016, Merazet, 2016).

W Polsce od kilkunastu lat prowadzone są próby wykonania korelacji pomiędzy statycznym wtórnym modułem odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznym modułem odkształcenia  $E_{VD}$ . Dotychczas nie zaowocowało to wydaniem żadnego aktu normatywnego.

### 5.2.1 Budowa lekkiej płyty dynamicznej

Lekka płyta dynamiczna składa się z (rys. 5.1):

a) przewodnicy z ciężarkiem opadowym:

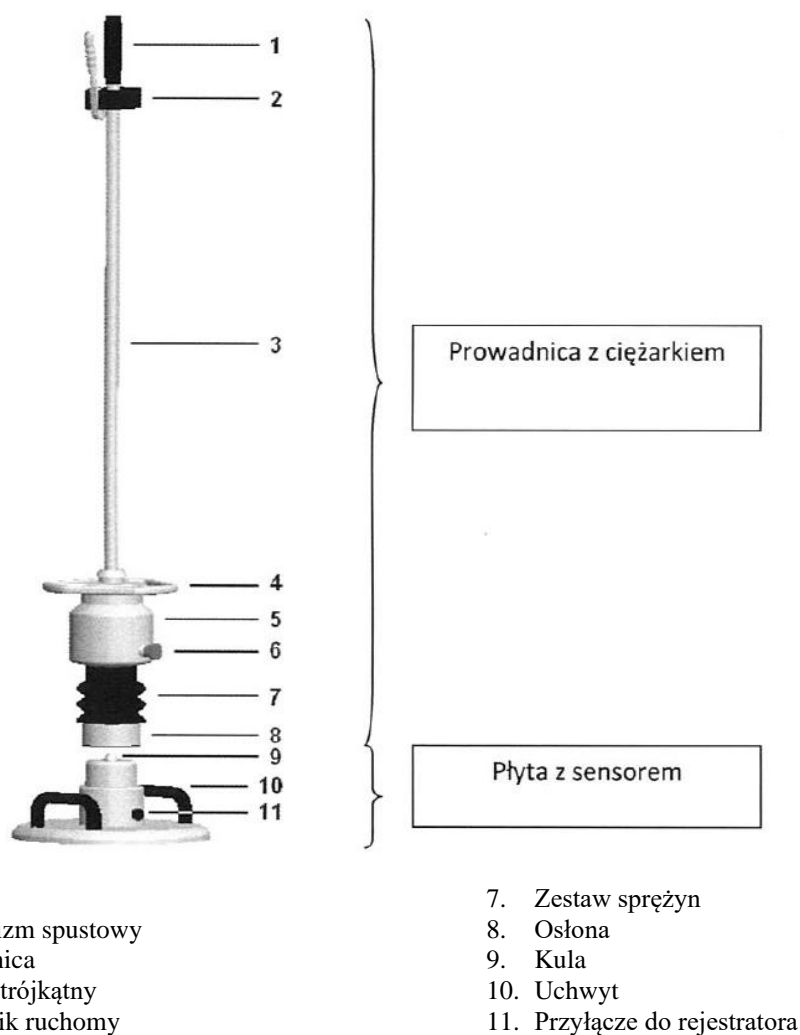
- masa ciężarka opadowego wynosi 10 kg,
- maksymalna siła uderzeniowa 7,07 kN,
- czas trwania uderzenia  $17,0 \pm 1,5$  ms.

b) płyty z sensorem:

- średnica płyty 300 mm,
- grubość płyty 20 mm,
- całkowita masa 15,0 kg.

c) rejestratora,

- zakres pomiarowy osiadania  $0,1 \div 2,0$  mm  $\pm$  0,02 mm,
- zakres wartości  $E_{VD} < 125$  MN/m<sup>2</sup>,
- zakres temperatur  $0 \div 40^{\circ}\text{C}$ .



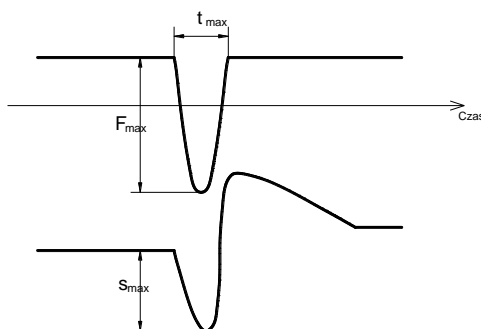
Rys. 5.1 Lekka płyta dynamiczna – budowa (Instrukcja ZORN, 2013)

## 5.2.2 Zasada działania lekkiej płyty dynamicznej

Zasada przeprowadzenia badania z wykorzystaniem płyty dynamicznej jest bardzo prosta. Na sztywną płytę stalową spada obciążnik opadowy. Najczęściej stosowane grubości płyty to 20 lub 17 mm, natomiast stalowy obciążnik o masie 10 kg jest zrzucany (opuszczany po stalowym przewodniku) z wysokości 0,83 m. Obciążana płyta jest wyposażona w miernik osiadania, który pozwala na pomiar maksymalnego ugięcia płyty spowodowanego uderzeniem obciążnika. Im podłoże (lub warstwa konstrukcyjna) jest bardziej odkształcalne, tym większe ugięcie zostanie zmierzone. Będzie to odzwierciedlał moduł odkształcenia; tutaj dla rozróżnienia nazywany dynamicznym modułem odkształcenia  $E_{VD}$ . Rozróżnienie to jest bardzo ważne, gdyż w geotechnice różne metody badań dają zwykle inne wyniki. W żadnym wypadku nie jest to błędem, gdyż właściwości ośrodka gruntowego są tak złożone, że nie można oczekiwać, że jego zachowanie będzie jak modelowego ośrodka liniowo-sprężystego. Zależność siły działającej na płytę po uderzeniu obciążnika oraz osiadania od czasu pokazano na rys. 5.2. Warto zwrócić uwagę, że czas oddziaływania  $t_{max}$  wynosi ok. 18 ms.

Opracowując wyniki badań lekką płytą dynamiczną zakłada się, że rozważany problem jest quasi-statyczny. Wobec tego, do dalszych obliczeń bierze się pod uwagę maksymalną wartość ugięcia, które występuje na skutek reakcji płyty na uderzenie. Wobec tego podstawą analizy będzie rozwiązanie zagadnienia osiadania półprzestrzeni sprężystej pod sztywnym obciążeniem obszaru o powierzchni  $A$ :

$$E = \frac{\omega_h B(1-\nu^2)q}{s} \quad (5.4)$$



Rys. 5.2 Zależność siły działającej na płytę po uderzeniu obciążnika oraz osiadania od czasu (Instrukcja ZORN, 2013)

W powyższej zależności  $E$  oznacza moduł odkształcenia ośrodka gruntowego,  $\omega_h$  – współczynnik kształtu,  $B$  – szerokość obciążanego obszaru,  $\nu$  – współczynnik

Poissona,  $q$  – działające obciążenie,  $s$  – zmierzone osiadanie pod obciążeniem. Ponieważ obciążany obszar to koło o średnicy  $D$ , to wartość współczynnika kształtu  $\omega_h = 0,79$ . Ponieważ dla gruntów gruboziarnistych i kruszyw współczynnik Poissona przyjmuje wartość ok. 0,25, to moduł odkształcenia może być szacowany ze wzoru:

$$E = \frac{0,79 \cdot (1 - 0,25^2) \cdot D \cdot q}{s} \approx \frac{0,75 \cdot D \cdot q}{s} \quad (5.5)$$

Powyższa zależność jest powszechnie wykorzystywana podczas opracowywania wyników próbnych obciążeń, w tym VSS (por. występujący w używanej zależności „współczynnik” 3/4). Może być ona również przedstawiona w postaci:

$$E = \frac{1,5 \cdot r \cdot q}{s} \quad (5.6)$$

gdzie  $r = 0,5 D$  – promień obciążanej płyty.

Aby oszacować moduł odkształcenia charakteryzujący badane podłoże korzystając ze wzoru (5.6), należy znać wartość maksymalnego nacisku działającego podczas badania, jak i osiadanie (rys. 5.2). Ta druga wielkość jest mierzona podczas testu poprzez odpowiednie czujniki będące na wyposażeniu przyrządu. Problem może stanowić realistyczne oszacowanie maksymalnego naprężenia, jakimi płyta działa na podłoże po wywołaniu zrzutu. Należałoby rozwiązać złożone zagadnienie brzegowe dynamiki. Ten problem został rozwiązany numerycznie. Uzyskany wynik posłużył do opracowania zależności pozwalającej na wyznaczenie modułu odkształcenia podłoża. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że uzyskane wyniki z całą pewnością zależą również od odkształcalności podłoża (a dokładnie od stosunku sztywności płyty do sztywności podłoża) oraz własności tłumiących ośrodka gruntowego, co w zasadzie nie jest brane pod uwagę. Obliczenia pozwoliły oszacować wartość  $q$  na ok. 100 kPa, co przy promieniu płyty równym 15 cm pozwala wyznaczyć zależność:

$$E_{VD} = \frac{22,5}{s[\text{mm}]} [\text{MPa}] \quad (5.7)$$

### 5.2.3 Metodyka badania

Badanie lekką płytą dynamiczną powinno być przeprowadzane zgodnie z jej procedurą. Badanie powinno być wykonywane, gdy temperatura powietrza mieści się w granicach od 0 do 40°C; warunkuje to prawidłową pracę sprzętu elektronicznego. Badana warstwa oraz warstwy pod nią nie mogą być zamrożone, temperatura badanej warstwy powinna być wyższa niż 0°C. Płytę obciążającą należy starannie ułożyć na badanej warstwie. Nie należy nią rzucać, ponieważ sensor przemieszczeń może ulec uszkodzeniu i będzie wskazywał błędne odczyty.



Fot. 5.7 Wykonywanie badania lekką płytą dynamiczną (zdjęcie autora)

Płyta na całej swojej powierzchni powinna przylegać do badanej warstwy. Jeżeli badana warstwa nie jest równa, należy wyrównać ją cienką warstwą suchego piasku kalibrowanego. Brak tego wyrównania będzie miał wpływ na uzyskiwane wyniki. Następnie należy podłączyć elektroniczny rejestrator i umieścić prowadnicę z ciężarkiem centralnie na kuli centrującej płyty. Należy podnieść ciężarek na wyznaczoną wysokość i zablokować mechanizmem spustowym. Ustawić w pionie prowadnicę, odblokować ciężarek i pozwolić mu swobodnie opaść na dół. Zabronione jest opuszczanie ciężarka z niższej wysokości, jak również zabronione są próby spowolnienia jego swobodnego opadania. Po przekazaniu energii na płytę obciążającą i odbiciu, samoczynnie podnoszący się ciężarek należy złapać, podnieść i zablokować. Wykonujemy trzy uderzenia wstępne zapewniające właściwy kontakt płyty z badaną warstwą. Nie należy zmieniać liczby uderzeń wstępnych, ponieważ spowoduje to uzyskanie błędnego wyniku. Seria pomiarowa składa się z trzech uderzeń. Należy wykonać kolejne uderzenie dopiero po pojawieniu się na wyświetlaczu komunikatu o gotowości do wykonania kolejnego obciążenia (fot. 5.7) (Sulewska, 1999, Rybak i Stilger-Szydło, 2010, Łupieżowiec i Syma, 2014b, Gosk, 2018).

### 5.3 Ugięciomierz Benkelmana

Do analizy jakości wykonania warstwy podbudowy stosuje się również badania belką Benkelmana. Belka Benkelmana jest nieinwazyjnym, przenośnym urządzeniem badawczym, które jest w stanie rejestrować ugięcia występujące pod aktualnie obciążonym punktem nawierzchni (Węgliński i Brzeziński, 2017). Pomiar ugięć belką Benkelmana opiera się na założeniu, że nośność badanej warstwy zależna jest od maksymalnego ugięcia



sprężystego tej warstwy. Im mniejsze maksymalne ugięcie sprężyste nawierzchni, tym większa nośność badanej warstwy. Maksymalne ugięcia dopuszczalne dla podbudowy przyjmuje się z normy PN-97/S-06102 (tablica. 5.1).

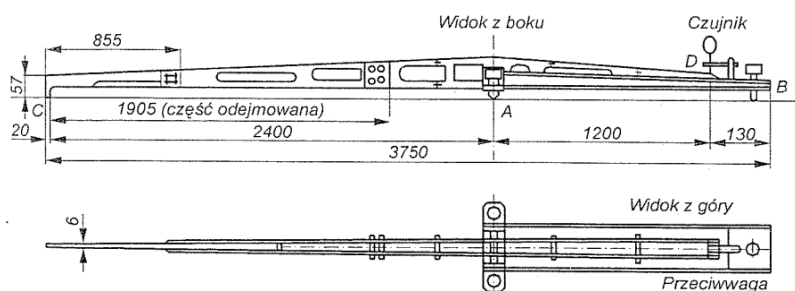
Tablica. 5.1 Maksymalne ugięcie sprężyste pod kołem w zależności od przyjętego wskaźnika nośności (PN-97/S-06102)

Podbudowa z kruszywa o wskaźniku $w_{noś}$ nie mniejszym niż [%]	Maksymalne ugięcie sprężyste pod kołem [mm]	
	40 kN	50 kN
60	1,40	1,60
80	1,25	1,40
120	1,10	1,80

Sposób wykonania badania opisany został w archiwalnej już normie branżowej BN-70/8931-06. Badanie polega na pomiarze ugięć podatnych nawierzchni drogowych za pomocą ugięciomierza belkowego pod statycznym naciskiem samochodowego koła bliźniaczego. Belka jest jakby dźwignią, która pod wpływem zmiany obciążenia wychyla się, na co reaguje czujnik z podziałką. Belkę umieszczamy pomiędzy kołami bliźniaczymi samochodu ciężarowego. Tylna oś powinna być obciążona 10 t (100 kN), co daje obciążenie na jedno koło bliźniacze 50 kN. Zerujemy czujnik, a następnie samochód powoli odjeżdża, nawierzchnia "podnosi się" – tym samym belka, jako dźwignia zmienia nacisk na czujnik; zapisujemy wynik odchylenia.

Ugięciomierz jest zbudowany z (rys 5.3):

- części stałej – podstawy A-B z zamocowanym w uchwycie czujnikiem typu zegarowego oraz poziomą osią obrotową w przekroju A,
- dźwigni C-D zawieszanej obrotowo na osi obrotowej poziomej, składającej się z dwóch ramion:
  - A-C o dł. 240 cm, zakończonego macką w punkcie C,
  - A-D o dł. 120 cm, na którym w końcu D opiera się nóżka czujnika (BN-70/8931-06).



Rys. 5.3 Schemat ugięciomierza Benkelmana (BN-70/8931-06)

## 6. Metodyka i program badań

### 6.1 Poletko doświadczalne

Badania na potrzeby niniejszej pracy zostały przeprowadzone na terenie województwa śląskiego, na budowach dróg wykonywanych przez firmę SKANSKA. Badania były prowadzone w latach 2014 – 2016. Dzięki uprzejmości dyrekcji firmy badania zostały wykonane sprzętem, którym dysponowało ówczesne laboratorium drogowe firmy SKANSKA z siedzibą w Zabrze Biskupicach. W opracowaniu nie zostały podane nazwy budow, a jedynie konstrukcja drogi oraz rodzaj materiału wykorzystanego do wykonania tej konstrukcji. Konstrukcje dróg były różne, lecz spełniały wymagania dla konkretnych kategorii ruchu.

Do wykonania badań na budowie zostały użyte cztery płyty dynamiczne firmy ZORN (fot. 6.1), trzy jednoczujnikowe płyty statyczne VSS firmy InfraTest i jedna trzyczujnikowa płyta statyczna VSS firmy Multiserw (fot. 6.2). Taka różnorodność wykorzystanego sprzętu oraz różne konstrukcje warstw drogowych miały umożliwić otrzymanie realnego, pozwalającego do wykorzystania na budowie przelicznika pomiędzy dynamicznym a statycznym modulem odkształcenia.

Dodatkowym atutem badań przeprowadzonych na potrzeby niniejszej pracy jest fakt, że były one wykonywane bezpośrednio na budowach.



Fot. 6.1 Płyty dynamiczne firmy ZORN (zdjęcie własne)



Fot. 6.2 Płyty statyczne VSS (zdjęcie własne)

Przeciw wagami użytymi na budowie był sprzęt budowlany typu walec stalowy, koparko-ładowarka lub samochód ciężarowy. Masa przeciwwagi w punkcie przyłożenia przegubu była większa niż 3,2 Mg.

Kruszywo zastosowane do wykonania badanej warstwy podbudowy było kruszywem z kopalni GZD Siewierz (Bąk i in. 2011). Było to kruszywo dolomitowe (dolomit triasowy) o frakcji 0/31,5 mm (tablica. 6.1). Kruszywo zostało przebadane i spełniało wymagania zawarte w rozdziale 4.2. Poszczególne nazwy warstw konstrukcji drogowej podbudów zostały zachowane, tak jak w projektach dróg. Różne nazewnictwo warstw podbudowy spowodowane jest odmienną interpretacją przepisów przez danego projektanta. Nie ma to wpływu na wykonane korelacje, dlatego w opracowaniu autor używa nazwy podbudowa, bez dodawania drugiego członu nazwy – zasadnicza, pomocnicza.

Każda warstwa podbudowy była zagęszczana w pierwszym etapie stalowymi gładkimi walcami wibracyjnymi, przy wilgotności warstwy bliskiej wilgotności optymalnej. Wilgotność optymalna została przyjęta na podstawie badań firmy SKANSKA w przedziale  $5,5 \div 6,6\%$ . Wałowanie odbywało się z użyciem wibracji, przy czym wibracja była używana tylko w jedną stronę. Podczas przejazdu powrotnego walce pracowały statycznie. Walec wykonywał po 5÷6 przejazdów po danym pasie warstwy. Po zagęszczeniu wstępnym, wjeżdżał na warstwę walec ogumiony, wykonując po 2÷3 przejazdy po danym pasie jazdy. Tak wykonane zagęszczenie warstwy gwarantowało uzyskanie odpowiednich parametrów odbiorczych. W nielicznych przypadkach przekroczenie wskaźnika odkształcenia powyżej wymaganej wartości  $I_0 \geq 2,2$  było spowodowane zbyt małą wilgotnością warstwy. Wówczas następowało skropienie warstwy

wodą oraz ponowne wykonanie 2÷3 przejazdów walcem ogumionym po danym pasie jazdy.

## 6.2 Sposób wykonania badań porównawczych w terenie

Pojedyncze badania płytą statyczną VSS (fot. 6.3), były wykonane zgodnie z zapisami w pierwszym rozdziale z rozdziałem 5.1.2, natomiast pojedyncze badania lekką płytą dynamiczną (fot. 5.9) były wykonane według wymogów opisanych w rozdziale 5.2.3.



Fot. 6.3. Badanie jednoczynnikową płytą statyczną VSS (zdjęcie własne)



Fot. 6.4 Schemat wykonania badań na budowie (zdjęcie własne)

Tablica. 6.1 Deklaracja właściwości użytkowych kruszywa 0/31,5 mm z kopalni GZD Siewierz (www.gzd.com.pl)

Zasadnicze charakterystyki	Właściwości użytkowe		Zharmonizowana specyfikacja techniczna
Wymiar i gęstość ziaren: wymiar ziaren d/D [mm] kategoria uziarnienia deklarowane przesiewy: D D/2 0,063 mm tolerancja uziarnienia gęstość ziaren $\rho_a$ [Mg/m <sup>3</sup> ] $\rho_{rd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ] $\rho_{ssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0/31,5 - 95% 70% 6% - 2,82 2,66 2,73	- G <sub>A</sub> 85 - - - G <sub>T</sub> A20 - - -	EN 13242:2002+A1:2007 normy badawcze: EN 933-1:2012 EN 933-1:2012 EN 1097-6:2013
	- 4,0 45	f <sub>9</sub> - -	EN 13242:2002+A1:2007 normy badawcze: EN 933-1:2012 EN 933-9:2009+A1:2013 EN 933-8:2012+A1:2015
Procent ziaren przekruszonych:	-	C <sub>90/3</sub>	EN 13242:2002+A1:2007
Odporność na rozdrabnianie/ /kruszenie:	-	LA <sub>30</sub>	EN 13242:2002+A1:2007 norma badawcza: EN 1097-2:2010
Nasiąkliwość/podciąganie: WA <sub>24</sub> [%]	2,1	-	EN 13242:2002+A1:2007 norma badawcza: EN 1097-6:2013
Skład/zawartość: siarczany rozpuszczalne w kwasie siarka całkowita składniki wpływające na wiązanie i twardnienie spoiw hydraulicznych	- - -	NPD NPD NPD	-
Stalność objętości:	-	NPD	-
Odporność na ścieranie:	-	M <sub>DE</sub> 25	EN 13242:2002+A1:2007 norma badawcza: EN 1097-1:2011
Trwałość a zamrażanie/ /rozmrzanie:	-	F4	EN 13242:2002+A1:2007 norma badawcza: EN 1367-1:2007

NPD – właściwości użytkowe nieustalone, skrót ang. No Performance Determined

M<sub>DE</sub> – współczynnik ścieralności, oznacza ubytek masy badanego kruszywa, wyrażony w [%]

F – mrozoodporność kruszywa grubego, oznacza ubytek masy badanego kruszywa, wyrażony w [%]

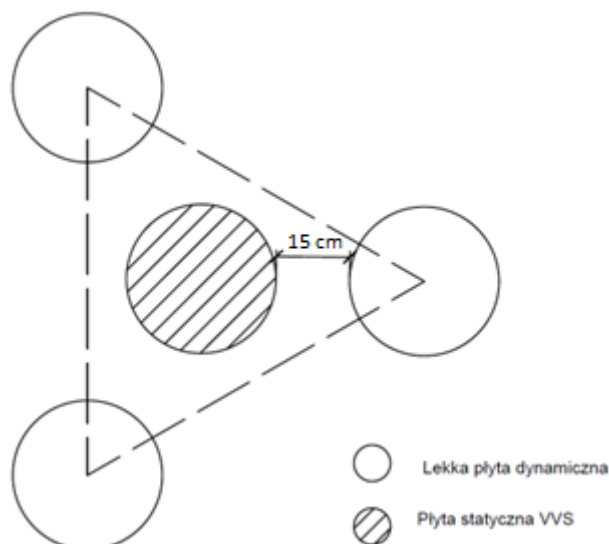
$\rho_a$  – gęstość objętościowa ziaren [Mg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{rd}$  – gęstość ziaren wysuszonych w suszarce [Mg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{ssd}$  – gęstość ziaren nasyconych i powierzchniowo osuszonych [Mg/m<sup>3</sup>]

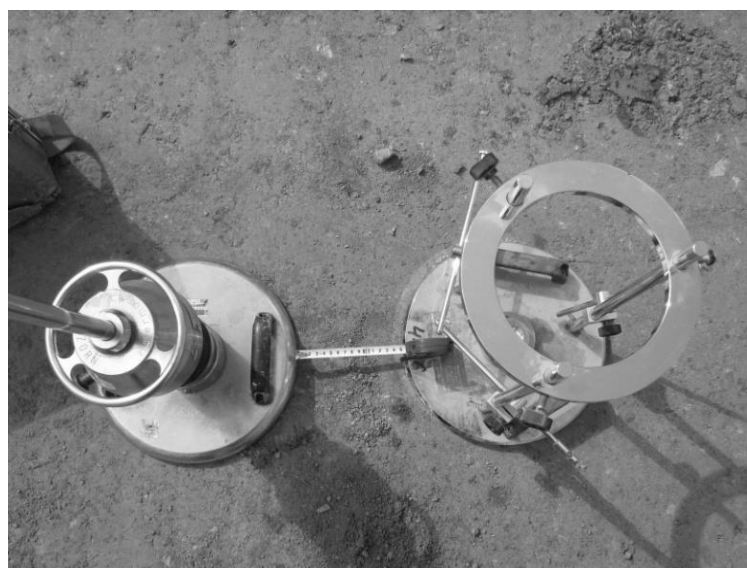
Przeprowadzone badania były badaniami odbiorowymi dla sprawdzenia jakości wykonanej podbudowy. Najpierw wykonano badanie płytą statyczną VSS. Po odjeździe

przeciwwagi (przeciwwaga odjeżdżała w kierunku przeciwnym do wykonywanych badań porównawczych, aby nie naruszyć badanego fragmentu warstwy), zostały wykonane trzy badania lekką płytą dynamiczną, w odległości 15 cm od płyty VSS (rys. 6.1), na rzucie trójkąta równobocznego, co przedstawia schemat na rys 6.1 i fot. 6.4.



Rys. 6.1 Schemat wykonania badań na poletku doświadczalnym

Pierwszym uzyskiwanym wynikiem był wtórny moduł odkształcenia  $E_2$  z badania płytą VSS. Określenie wartości modułu  $E_2$  zostało wykonane zgodnie z opisem w rozdziale 5.1.4, wg metodyki opisanej w KPRNPP (2013). Następnie z trzech badań lekką płytą dynamiczną, wykonanych jak pokazano na fot. 6.4, obliczono średnią arytmetyczną wartość dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$ . Uzyskane w ten sposób wyniki zostały zestawione ze sobą w celu porównania wartości modułów odkształcenia dynamicznego i statycznego.



Fot. 6.5 Odległość pomiędzy płytą statyczną i dynamiczną w czasie wykonywania badań (zdjęcie własne)

## 6.3 Dodatkowe badania wykorzystane w pracy

### 6.3.1 Analiza sitowa

Analiza sitowa (oznaczenie składu ziarnowego) polega na przesianiu próbki kruszywa wysuszonej w suszarce w temperaturze 105÷110°C przez sita o określonych wymiarach oczek i obliczaniu w procentach masy ziaren pozostających na kolejnych sitach w stosunku do całkowitej masy badanej próbki.

W niniejszej pracy zostały zastosowane sita o oczkach kwadratowych i następujących wymiarach: 31,5; 22,4; 16,0; 11,2; 8,0; 5,6; 4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063 mm.

Zawartość ziaren oblicza się wg wzoru:

$$s_i = \frac{m_{si}}{m_s} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

gdzie:

$m_{si}$  – masa suchych ziaren pozostałych na sicie [g],

$m_s$  – masa całej suchej próbki wziętej do analizy [g].

Mając wyznaczone wartości  $m_{si}$  wykonuje się wykres uziarnienia, który dla podbudowy powinien zawierać się pomiędzy krzywymi granicznymi zależnymi od rodzaju mieszanki, przedstawionymi na rysunkach 4.1 i 4.2 (Wiłun 2003, Pisarczyk 1991).

### 6.3.2 Wilgotność naturalna

Wilgotność naturalna jest to wilgotność jaką posiada grunt w stanie naturalnym w złożu lub w miejscu wbudowania. Wilgotność jest to stosunek masy wody zawartej w danej próbce gruntu do masy próbki wysuszonej w temperaturze 105÷110°C, wyrażony w procentach.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

gdzie:

$w$  – wilgotność [%],

$m_w$  – masa wody [g],

$m_s$  – masa gruntu wysuszonego [g].

## 6.4 Zestawienie wyników badań

Analiza zależności modułów odkształcenia konstrukcji drogowej w metodach statycznej i dynamicznej została podzielona wg kategorii ruchu na trzy grupy:

- kategoria ruchu KR1 – KR2,
- kategoria ruchu KR3 – KR4,
- kategoria ruchu KR5 – KR7.

Pierwsza grupa obejmuje ruch lekki - łącznie zostało wykonanych 100 porównań. Badania zostały wykonane dla 4 różnych konstrukcji drogowych, z czego dla:

- konstrukcji nr 1 wykonano 24 porównania; dla każdego porównania (jedno badanie płytą statyczną VSS oraz trzy lekką płytą dynamiczną) wykonano badanie wilgotności naturalnej (łącznie 96 badań),
- konstrukcji nr 2 wykonano 45 porównań,
- konstrukcji nr 3 wykonano 23 porównania,
- konstrukcji nr 4 wykonano 8 porównań.

Druga grupa obejmuje ruch średni - łącznie zostało wykonanych 100 porównań. Badania zostały wykonane dla 5 różnych konstrukcji drogowych, z czego dla:

- konstrukcji nr 1 wykonano 27 porównań,
- konstrukcji nr 2 wykonano 17 porównań,
- konstrukcji nr 3 wykonano 26 porównań
- konstrukcji nr 4 wykonano 13 porównań,
- konstrukcji nr 5 wykonano 17 porównań.

Trzecia grupa obejmuje ruch ciężki - łącznie zostało wykonanych 150 porównań. Badania zostały wykonane dla 7 różnych konstrukcji drogowych, z czego dla:

- konstrukcji nr 1 wykonano 44 porównania, dla 40 porównań (jedno badanie płytą statyczną VSS oraz trzy dla lekką płytą dynamiczną) wykonano badanie wilgotności naturalnej - łącznie 160 badań. Dla 30 porównań wykonano analizę sitowa z kruszywa pobranego z miejsca wykonania badania - razem 120 badań analiz sitowych,
- konstrukcji nr 2 wykonano 38 porównań,
- konstrukcji nr 3 wykonano 10 porównań
- konstrukcji nr 4 wykonano 11 porównań,
- konstrukcji nr 5 wykonano 25 porównań.
- konstrukcji nr 6 wykonano 14 porównań.
- konstrukcji nr 7 wykonano 8 porównań.



Grupa wyników 150 porównań została dodatkowo podzielona na dwie podgrupy:

- konstrukcje półsztywne, w których jedna z warstw była wykonana ze stabilizacją spoiwami hydraulicznymi 2,5 MPa (57 porównań),
- konstrukcje podatne (93 porównań).

#### **6.4.1 Analiza numeryczna**

Analiza numeryczna została wykonana w programie Z\_SOIL. W ramach podjętych rozważań, wykonano analizy numeryczne symulacji obciążenia podbudowy, zarówno płytą statyczną VSS, jak i płytą dynamiczną. Analizy zostały wykonane dla pierwszych rodzajów konstrukcji dla kategorii ruchu KR1 – KR2, KR3 – KR4 oraz KR5 – KR6. Analizy miały na celu przede wszystkim określenie zasięgu oddziaływania poszczególnych badań, co pozwala na ocenę poprawności wykonanych robót, a także może stanowić weryfikację wykorzystywanych zależności pozwalających na oszacowanie wartości modułów ( $E_1$ ,  $E_2$  oraz  $E_{VD}$ ) będącymi wynikami przeprowadzanych badań. Przeprowadzone analizy numeryczne będą również stanowić potwierdzenie prawidłowości w zakresie doboru modelu materiałowego oraz wartości przyjmowanych parametrów.

Zarówno w symulacji badania płytą VSS, jak i płytą dynamiczną, do analiz numerycznych przyjęto sprężysto-idealnie plastyczny model z powierzchnią Coulomba-Mohra. Parametrami opisującymi zachowanie się poszczególnych warstw gruntowych są moduł Younga  $E$  (moduł sprężystości) oraz współczynnik Poissona  $\nu$ . Oznacza to, że przyjęty model w fazie pracy sprężystej jest izotropowy. Charakterystyki wytrzymałościowe gruntów w przyjętym modelu są opisywane poprzez kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi$  oraz spójność  $c$  (tablica 6.2). Dodatkowo przyjęto, że grunt zachowuje się jak ośrodek jednoskładnikowy – analizuje się jedynie całkowite naprężenia w tym ośrodku, bez ich rozdziału na część przenoszoną przez szkielet gruntowy oraz przez wodę. Elementy symulujące pracę płyty (zarówno płyty VSS, jak i płyty dynamicznej) analizowano jako liniowo-sprężyste, a wartości parametrów przyjęto jak dla stali. Dodatkowo przyjęto uproszczenie w postaci założenia osiowej symetrii, którą była oś pionowa przechodząca przez środek płyty.

Analiza badania płytą statyczną polegała na symulacji realizacji ścieżki obciążenia pierwotnego (do wartości 450 kPa), następnie całkowitemu odciążeniu oraz ponownym zadaniu obciążenia (ścieżka obciążenia wtórnego) do wartości 350 kPa. Obciążenia były zadawane w małych krokach po 10 kPa. Zadanie kolejnego kroku obciążenia wiązało się

z wykonaniem procedury iteracyjnej pozwalającej na sprowadzenie punktów w przestrzeni naprężeń na powierzchnię plastyczności w przypadku każdorazowego przekroczenia warunku plastyczności. Przed zadaniem powyższych obciążeń wykonano generację pierwotnego stanu naprężenia, które wynika z ciężaru własnego gruntów budujących podłoże oraz ciężaru leżącej płyty VSS. Założono, że wartości naprężeń poziomych są zgodne ze sprężystym odkształcaniem się ośrodka gruntowego, co przedstawia zależność:

$$\sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z, \quad (6.3)$$

gdzie:  $\nu$  – współczynnik Poissona.

Tablica 6.2. Wartości parametrów przyjęte do analiz numerycznych

Strefa materiałowa	Moduł odkształcenia $E$ [MPa]	Współczynnik Poissona $\nu$ [-]	Spójność $c$ [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego $\phi$ [°]
Grunt rodzimy	40	0,30	18	18
Piasek	100	0,25	2	37
Łupek przepalony	100	0,25	2	37
Podbudowa zasadnicza	200	0,25	10	40
Stalowa płyta	205 000	0,30	Materiał liniowo-sprężysty	

Zastosowano standardowe geotechniczne warunki brzegowe. Polegają one na odebraniu swobody przemieszczeń w obydwu kierunkach we wszystkich punktach na dolnej krawędzi oraz odebraniu możliwości przemieszczeń poziomych na bocznych krawędziach modelu.

Wykonane analizy pozwoliły na opracowanie wykresu obciążenie – osiadanie ( $q - s$ ), na podstawie którego można było wyznaczyć wartości modułów odkształcenia odpowiadających ścieżce pierwotnej (pierwotny moduł  $E_1$ ) oraz ścieżce wtórnej (wtórny moduł  $E_2$ ), wg wzoru:

$$E_{1,2} = 0,75 \frac{\Delta q \cdot D}{\Delta s}, \quad (6.4)$$

gdzie:  $D = 300$  mm – średnica płyty,

$\Delta q$  – przyrost nacisków powodowanych przez podstawę płyty (w zależności od odbieranej warstwy konstrukcji lub podłoża) – na podstawie zadanych kroków przyrostu obciążenia,

$\Delta s$  – przyrost osiadań (wg krzywej obciążenia pierwotnego lub wtórego – w zależności od obliczanej wartości modułu) – na podstawie uzyskanych wyników analiz numerycznych.

Równie ważnym wynikiem analiz jest mapa przemieszczeń pionowych (osiadań). Dzięki temu jest możliwość oszacowania głębokości oddziaływania obciążenia przekazywanego poprzez stalową płytę na podłoże lub warstwy konstrukcji. Na tej podstawie można ocenić jak głęboko leżące warstwy mogą być odbierane wykorzystując dane badanie VSS.

Drugą z przeprowadzonych analiz numerycznych była symulacja badania płytą dynamiczną. W analizach rozważano zachowanie się podłoża gruntowego po uderzeniu bijaka w płytę spoczywającą na podłożu. W zdefiniowanym modelu numerycznym zostało to uwzględnione poprzez zadanie odpowiedniej prędkości początkowej elementom symulującym zachowanie się płyty dynamicznej, która to prędkość wynika z energii kinetycznej spadającego ubijaka z ustalonej wysokości (równej 0,83 m); w pozostałych węzłach zbudowanego modelu mają prędkość początkową równą 0. Jednocześnie założono jednorodne (tożsamościowo równe 0) przemieszczenia we wszystkich węzłach modelu. Przy symulacji badania płytą dynamiczną zastosowano identyczną, jak w przypadku badania płytą VSS, generację naprężeń pierwotnych, które w tym przypadku będą jednocześnie naprężeniami początkowymi (w chwili  $t_0$  oznaczającej początek wykonywanej analizy). W analizie dynamicznej należało jednak dokonać pewnej modyfikacji w zakresie warunków brzegowych, gdyż pozostawienie takich samych warunków brzegowych jak przy symulacji płyty VSS powodowałoby odbicie się fali powstałej po uderzeniu ubijaka w płytę od brzegów modelu, co dawałoby błędne wyniki analiz. Dlatego też usunięte zostały podpory w zamian za zdefiniowanie w odpowiadających węzłach sił reakcji wyznaczonych w trakcie generowania naprężeń pierwotnych (Truty, 2010). Dodatkowo na brzegach modelu (za wyjątkiem osi symetrii) zdefiniowano tłumiki lepkie (Lysmer i Kuhlemeyer, 1969), które pochłaniają energię drgań na brzegu modelu. Powyższe tłumiki symulują rozchodzenie się drgań w półprzestrzeni poza modelem o ograniczonych wymiarach, który definiuje się na potrzeby analiz MES. Przy rozwiązywaniu zagadnienia dynamicznego do całkowania równań ruchu przyjęto niejawną schemat Newmarka. Analizowano zachowanie się w czasie 0,03 s (30 ms) podłoża po uderzeniu bijaka w płytę stalową, a długość kroku całkowania wyniosła 0,1 ms.

Mapy osiadań przedstawiono w momencie występowania największych ic wartości, co nastąpiło w czasie 4 ms po zrzuconiu płyty. Mapa ta również może stanowić podstawę do oceny zasięgu oddziaływania analizowanego badania wgląd podłoża.

#### 6.4.2 Analiza statystyczna

W tablicach dla każdej konstrukcji drogi dla kategorii ruchu KR1 – KR2, KR3 – KR4 oraz KR5 – KR7 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ).

W poszczególnych rozdziałach zawarto analizę statystyczną wykonaną dla wartości modułów  $E_2$  i  $E_{VD}$  w zależności od kategorii ruchu i rodzaju konstrukcji nawierzchni drogowej. Analiza statystyczna obejmuje estymację punktową i przedziałową. Określa się statystyki położenia (średnią arytmetyczną) i rozproszenia (pomiar największy i najmniejszy, rozstęp, odchylenia standardowe pojedynczego pomiaru i średniej arytmetycznej, współczynnik zmienności) oraz przedziały ufności Neymana.

Wnioskowanie statystyczne w przypadku jednowymiarowej zmiennej losowej obejmuje estymację punktową i estymację przedziałową (Bobrowski i Maćkowiak-Łybacka, 1988; Brandt, 1974; Kassyk-Rokicka, 1976; Luszczewicz, 1979; Starzyńska, 2000).

Estymacja punktowa jednowymiarowej zmiennej losowej polega na podaniu statystyk położenia i rozproszenia (dyspersji) pomiarów. Klasyczną i najczęściej stosowaną miarą położenia - tendencji centralnej, jest wartość oczekiwana zmiennej losowej, powszechnie zwana średnią arytmetyczną:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6.4)$$

Jako miarę rozproszenia stosuje się rozstęp  $R$ , odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru  $s$  i współczynnik zmienności  $v$ . Wielkości te wyrażają się wzorami:

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (6.5)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (6.6)$$

$$v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (6.7)$$

gdzie  $n$  oznacza liczebność zbioru pomiarów.

Jako miarę niepewności przypadkowej wartości średniej z próby  $\bar{x}$  przyjmujemy zazwyczaj odchylenie standardowe średniej  $s_{\bar{x}}$  z próby:

$$s_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (6.8)$$

Średnia arytmetyczna  $\bar{x}$  jest estymatą nieznannej prawdziwej wartości średniej  $m$ . Narzędziem oceny tej prawdziwej wartości jest estymacja przedziałowa. Polega ona na konstrukcji, na podstawie wyników uzyskanych z próby losowej, przedziału liczbowego zwanego przedziałem ufności Neymana, który z określonym prawdopodobieństwem zawiera wartość estymowanego parametru (Bobrowski i Maćkowiak-Łybacka, 1988).

W przypadku estymowania wartości oczekiwanej  $E(\bar{x})=m$ , na podstawie estymatora  $\bar{x}$ , pochodzącego z małej próby, przedział ufności Neymana wyraża się równaniem:

$$P\{\bar{x} - t_{\alpha s} \cdot s_{\bar{x}} < m < \bar{x} + t_{\alpha s} \cdot s_{\bar{x}}\} = 1 - \alpha \quad (6.9)$$

Oznacza to, że przedział o granicach  $\bar{x} \pm t_{\alpha s} \cdot s_{\bar{x}}$  pokrywa wartość oczekiwaną  $m$  z prawdopodobieństwem  $P=1-\alpha$ .

Występujące we wzorze (6.9) wielkości oznaczają:

$1-\alpha$  - poziom ufności,

$\alpha$  - poziom istotności (prawdopodobieństwo popełnienia błędu I rodzaju, tj. odrzucenia hipotezy  $H_0$ , gdy jest ona prawdziwa),

$t_{\alpha s}$  - wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta o  $s=n-1$  stopniach swobody, odpowiadająca poziomowi istotności  $\alpha$ , przyjmowana z tablic statystycznych (Zieliński, 1972, 1999).

Zmienna losowa t-Studenta jest tak zwaną standaryzowaną zmienną losową i wyraża się wzorem postaci:

$$t = \frac{\bar{x} - m}{s_{\bar{x}}} \quad (6.10)$$

Wyznaczając przedział ufności estymowanej statystyki należy w pierwszej kolejności założyć poziom ufności  $P=(1-\alpha)$ . Zwykle przyjmuje się  $P=95\%$ . Następnie określa się wartość krytyczną  $t_{\alpha s}$ .

## 7. Kategoria ruchu KR1 – KR2

Dla kategorii ruchu KR1 – KR2 zostało wykonanych 100 porównań dla 4 różnych konstrukcji. Wszystkie z tych konstrukcji były konstrukcjami podatnymi o zbliżonej do siebie miąższości. Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 7.1.

Wartość wtórnego modułu odkształcenia dla podbudowy dla kategorii ruchu KR1 – KR2 powinna wynosić  $E_2 \geq 120$  MPa, a wartość wskaźnika odkształcenia  $I_0 \leq 2,2$ . Siedem z badań nie spełniło wymagania dla wtórnego modułu odkształcenia i uzyskało wartości  $E_2 \leq 120$  MPa, najmniejszym uzyskanym wynikiem było 113 MPa. Osiem wyników badań nie spełniło wymagań określonych dla wskaźnika odkształcenia.

Tablica. 7.1 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla 4 różnych konstrukcji drogowych dla kategorii ruchu KR1 – KR2

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	100
Pomiar największy	$x_{\max} =$	163,0
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	113,1
Rozstęp	$R =$	49,9
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	134,5
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	1,1
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	11,2
Współczynnik zmienności	$v =$	8,4
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=99$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	1,984
Przedział ufności Neymana $P\{132,234 < m < 136,695\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

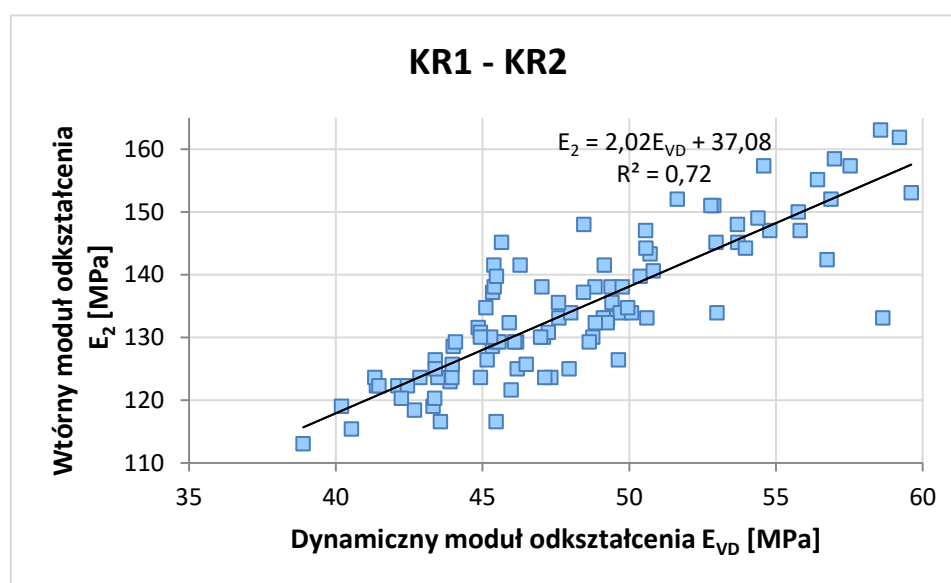
Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	100
Pomiar największy	$x_{\max} =$	59,6
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	38,9
Rozstęp	$R =$	20,7
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	48,2
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	0,5
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	4,8
Współczynnik zmienności	$v =$	9,9
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=99$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	1,984
Przedział ufności Neymana $P\{47,243 < m < 49,136\} = 0,95$		

Analizując wszystkie uzyskane wyniki współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,72$ , dla zależności:

$$E_2 = 2,02 \cdot E_{VD} + 37,08 \quad (7.1)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 41,1$  MPa.

W tabelicy 7.1 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla kategorii ruchu KR1 – KR2.



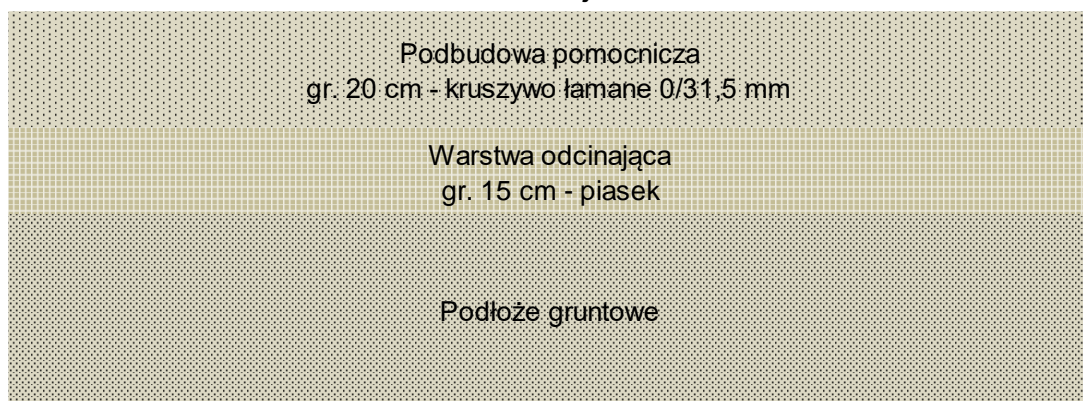
Rys.7.1 Zestawienie wszystkich wyników badań płytą statyczną i płytą dynamiczną dla kategorii ruchu KR1 – KR2

## 7.1 Konstrukcja nr 1

Dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 (rys. 7.2) zostały wykonane 24 porównania (tab. 7.2). Dla każdego z tych porównań zostały wykonane badania wilgotności naturalnej. Pobranie próbek do tego badania zostało wykonane po badaniu płytą statyczną lub lekką płytą dynamiczną. Kruszywo dla jednej próbki zostało pobrane z trzech miejsc: z góry warstwy, ze środka oraz ze spodu badanej warstwy. Wilgotność badanych próbek została przedstawiona w tabelicy 7.2. Wilgotność nie przekraczała normowych wymagań zagęszczenia warstwy kruszywa  $\pm 2\%$ , w związku z tym została pominięta w dalszych analizach.

Mięszość badanej konstrukcji wynosiła 35 cm. Cztery wyniki nie spełniły wymagań wtórnego modułu odkształcenia, najmniejszy z nich wynosił  $E_2 = 115$  MPa. Cztery wyniki nie spełniły wymagania wskaźnika odkształcenia, największy z nich wyniósł  $I_0 = 2,5$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys. 7.3.

## Kategoria ruchu KR1 - KR2 Konstrukcja nr 1



Rys.7.2 Przekrój konstrukcji nr 1 – kategoria ruchu KR1 – KR2

Tablica 7.2. Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 1 dla kategorii ruchu KR1 – KR2

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik	Optymalna wilgotność kruszyw a z w warstwy 5,5 - 6,4 %			
E <sub>1</sub> [MPa]	E <sub>2</sub> [MPa]	l <sub>0</sub> E <sub>2</sub> /E <sub>1</sub>	E <sub>VD1</sub> [MPa]	E <sub>VD2</sub> [MPa]	E <sub>VD3</sub> [MPa]	E <sub>VD sr 0,0</sub> [MPa]	x E <sub>2</sub> /E <sub>VD 0,0</sub>	Wilgotność naturalna w miejscu wykonywania badania			
								dla E <sub>VD1</sub> w <sub>n1</sub> [%]	dla E <sub>VD2</sub> w <sub>n2</sub> [%]	dla E <sub>VD3</sub> w <sub>n3</sub> [%]	dla E <sub>2</sub> w <sub>n4</sub> [%]
66	122	1,9	39,5	43,6	41,0	41,4	2,95	5,5	5,5	5,5	5,4
61	119	1,9	45,7	35,2	39,6	40,2	2,96	5,3	5,3	5,3	5,4
63	129	2,1	43,7	49,1	45,7	46,2	2,80	5,6	5,5	5,5	5,5
71	142	2,0	49,3	44,0	42,9	45,4	3,12	5,3	5,3	5,4	5,3
52	115	2,2	39,4	38,5	43,7	40,5	2,85	5,5	5,4	5,4	5,4
60	125	2,1	47,3	45,2	46,0	46,2	2,71	4,5	4,6	4,5	4,8
51	129	2,5	50,3	41,6	44,2	45,3	2,84	5,6	5,4	5,7	5,7
67	132	2,0	43,9	46,8	43,9	44,9	2,93	4,9	4,9	5,0	4,8
64	124	1,9	41,3	42,1	40,5	41,3	2,99	5,3	5,3	5,3	5,2
66	134	2,0	50,3	55,0	53,7	53,0	2,53	5,5	5,3	5,6	5,6
55	130	2,3	47,3	45,0	48,9	47,1	2,76	6,2	6,2	6,2	6,0
53	117	2,2	51,7	38,9	40,2	43,6	2,68	5,8	5,8	5,8	5,8
75	153	2,0	58,9	54,7	65,3	59,6	2,57	5,7	6,1	6,1	6,2
79	147	1,9	53,5	58,0	55,9	55,8	2,63	6,0	6,0	6,0	6,0
78	130	1,7	52,0	44,8	49,5	48,8	2,67	5,8	5,8	5,7	5,7
68	133	1,9	51,4	49,4	51,0	50,6	2,63	4,3	4,3	4,4	4,2
62	131	2,1	45,8	46,3	42,7	44,9	2,91	4,5	4,5	4,5	4,5
67	133	2,0	48,6	47,0	52,2	49,3	2,70	4,7	4,5	4,5	4,5
59	123	2,1	48,0	45,3	38,4	43,9	2,80	4,9	5,0	5,0	4,7
57	125	2,2	47,3	50,1	46,4	48,0	2,61	5,3	5,3	5,3	5,6
55	129	2,3	43,8	49,5	43,0	45,5	2,84	5,3	5,3	5,3	5,3
58	133	2,3	46,9	47,6	48,3	47,6	2,80	5,7	5,7	5,6	5,6
61	124	2,0	36,8	39,4	52,4	42,9	2,88	5,7	5,7	5,9	5,9
62	119	1,9	43,0	45,2	41,7	43,3	2,75	5,8	5,8	5,8	6,3

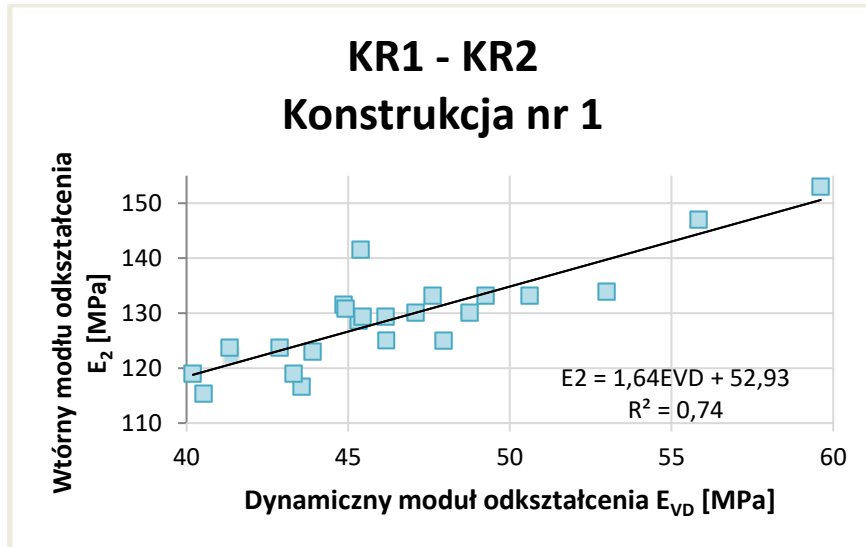
Dla konstrukcji nr 1 dla ruchu KR1 – KR2 zostały wykonane trzy zestawienia porównań, opisane trzema liniami trendu:

- liniową, dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,74$  (rys 7.3a),
- logarytmiczną, dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,73$  (rys 7.3b),
- kwadratową, dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,74$  (rys 7.3c).

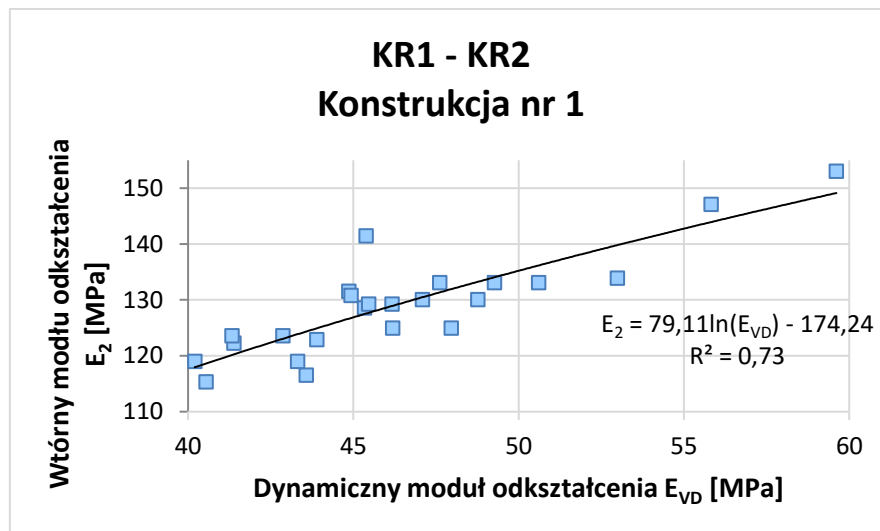
Do dalszych porównań dla ruchu KR1 – KR2 zostało przyjęte porównanie liniowe. Współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,74$ .



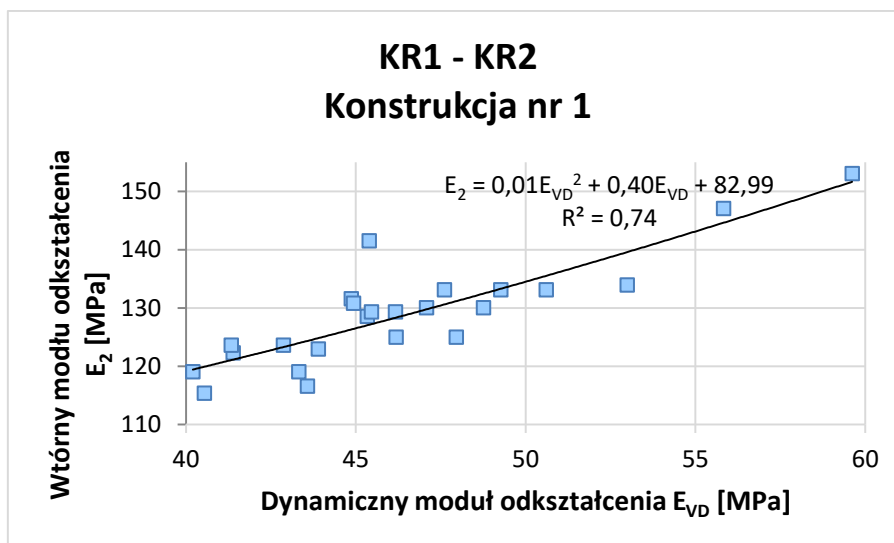
a)



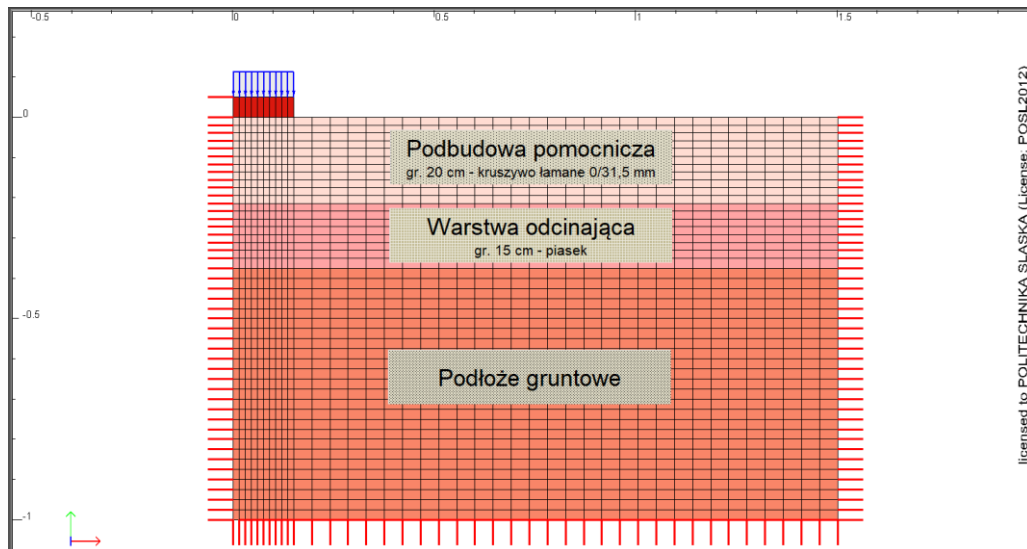
b)



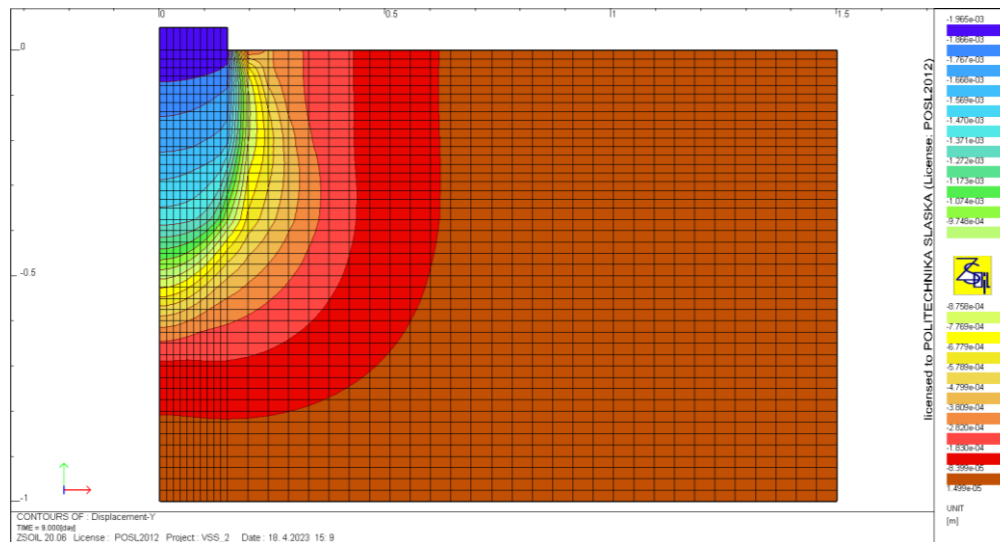
c)



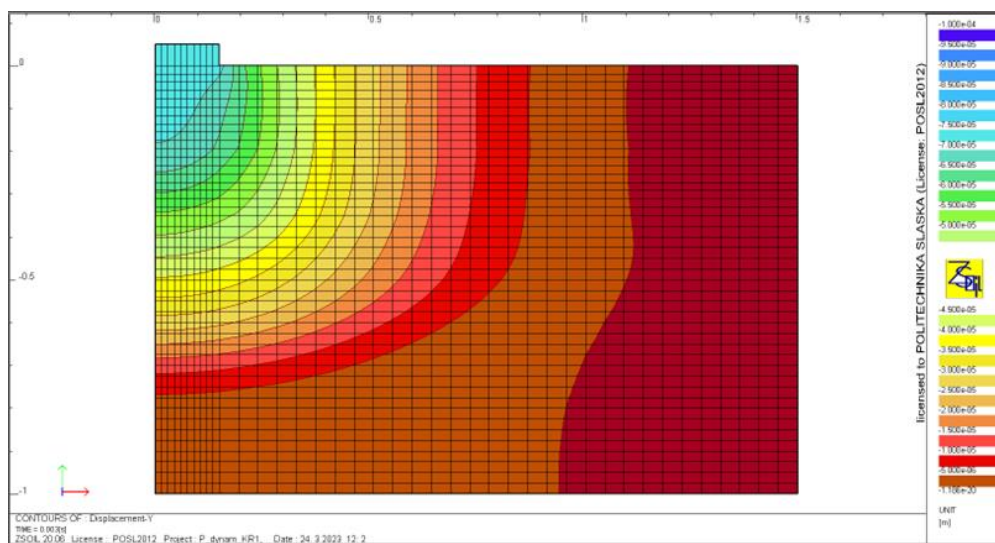
Rys.7.3 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 1 dla ruchu KR1 – KR2 a) liniowa linia trendu, b) logarytmiczna linia trendu, c) kwadratowa linia trendu



Rys. 7.4 Ruch KR1 – KR2 konstrukcja nr 1 – model (Z\_SOIL)



Rys. 7.5 Ruch KR1 – KR2 konstrukcja nr 1 – osiadania podczas badania VSS (Z\_SOIL)

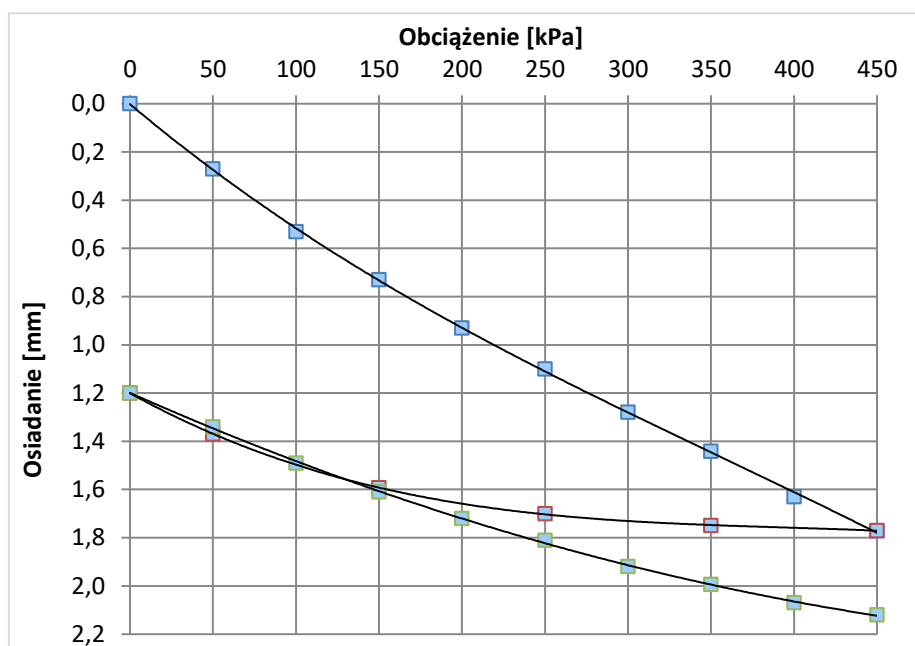


Rys. 7.6 Ruch KR1 – KR2 konstrukcja nr 1 – osiadania podczas badania lekką płytą dynamiczną (Z\_SOIL)

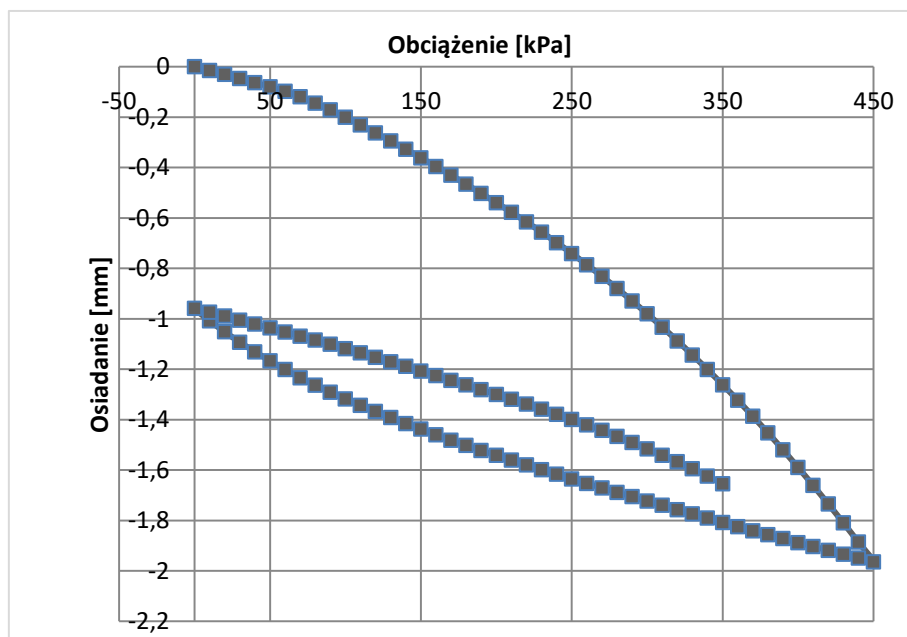
Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,64 \cdot E_{VD} + 52,93 \quad (7.2)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 120$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 40,9$  MPa.



Rys. 7.7 Ruch KR1 – KR2 konstrukcja nr 1 – osiadanie wg badania VSS



Rys. 7.8 Ruch KR1 – KR2 konstrukcja nr 1 – osiadanie wyznaczone w programie Z\_SOIL

## PROTOKÓŁ Z BADAŃ

97/2015

Oznaczanie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą (VSS)

Zleceniodawca : Skanska S.A.

Sprzęt : VSS czujniki nr : M-1602, M-1603, M-1604, ciśnieniomierz M-1605

Budowa :

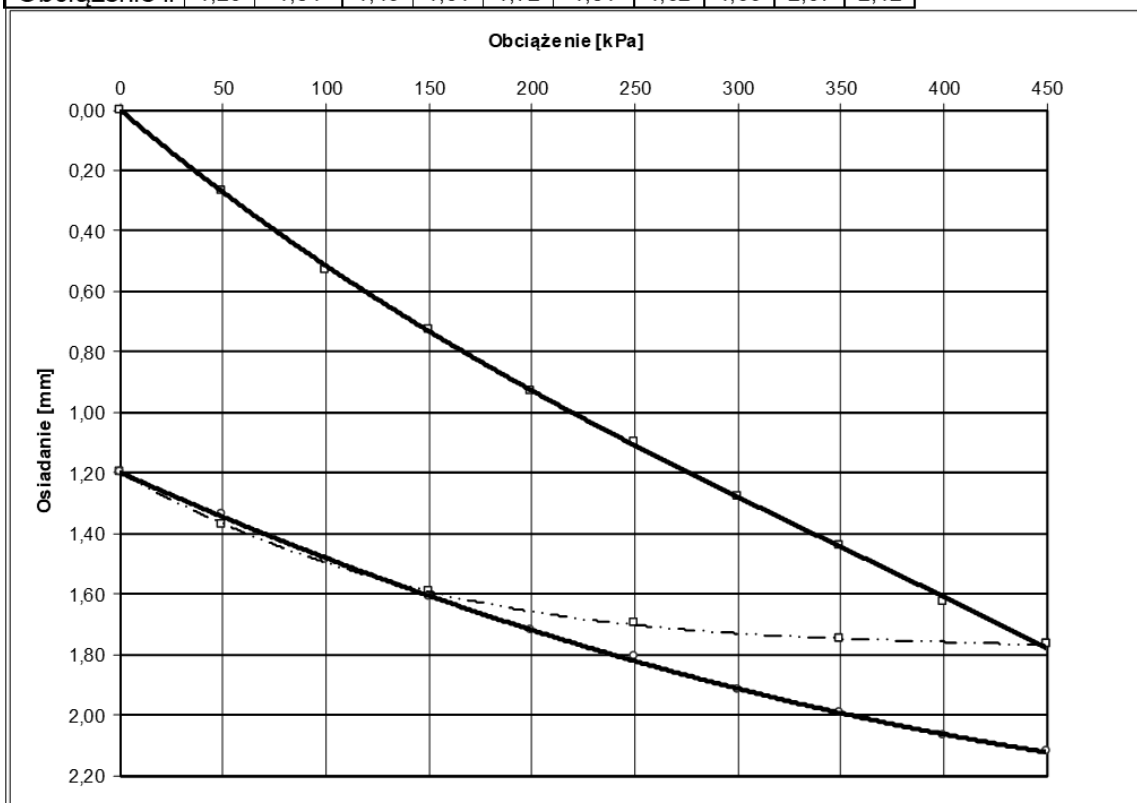
Punkt : km 0+135 - strona prawa 1m od krawędzi warstwy

warstwa podbudowy pomocniczej z kruszywa łamanego - mieszanka 0/31,5 GZD Siewierz

Data badania : 13.07.2015

Moduł pierwotny i wtórny - płyta  $\phi$  30 cm.

[kPa]	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Obciążenie I	0,00	0,27	0,53	0,73	0,93	1,10	1,28	1,44	1,63	1,77
Odciążenie I	1,20	1,37		1,59		1,70		1,75		1,77
Obciążenie II	1,20	1,34	1,49	1,61	1,72	1,81	1,92	1,99	2,07	2,12



Końcowe obciążenie doprowadza się do **0,45 MPa**

$$E_{1,2} = D \cdot (\Delta p / \Delta S) \cdot 0,75 \quad D - \text{średnica płyty, 30 cm}$$

$E_{1,2}$  - moduł odkształcenia (pierwotny, wtórny)

$\Delta p$  - przyrost obciążenia jednostkowego w zakresie od **0,25 do 0,35 MPa**

$\Delta S$  - przyrost odkształcenia odpowiadający przyjętemu zakresowi obciążeń jednostkowych, w mm

Moduł pierwotny :  $M_{E1} = 66$  MPa

Moduł wtórny :  $M_{E2} = 122$  MPa  $\geq 120$  MPa

Wskaźnik odkształcenia :

$$I_0 = 1,9 \leq 2,2$$

Rys. 7.9 Przykładowy protokół z badania VSS, Kategoria ruchu KR1 – KR2, konstrukcja nr 1

Tablica. 7.3 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR1 – KR2

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	24	1
Pomiar największy	$x_{\max} =$	153,1	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	115,4	MPa
Rozstęp	$R =$	37,7	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	129,1	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	1,8	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	8,7	MPa
Współczynnik zmienności	$v =$	6,8	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=23$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,069	1
Przedział ufności Neymana $P\{125,358 < m < 132,743\} = 0,95$			

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	24	1
Pomiar największy	$x_{\max} =$	59,6	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	40,2	MPa
Rozstęp	$R =$	19,4	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	46,5	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	1,0	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	4,7	MPa
Współczynnik zmienności	$v =$	10,1	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=23$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,069	1
Przedział ufności Neymana $P\{44,475 < m < 48,453\} = 0,95$			

W programie Z\_SOIL został wykonany model oddziaływania płyty statycznej VSS (rys. 7.4) oraz lekkiej płyty dynamicznej (rys. 7.5) na badane warstwy. Z analizy wyników, wynika, że oddziaływanie płyty sięga ok. 50 cm w głąb badanych warstw. W konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 badanie sięga podłoża gruntowego. Porównując osiadanie płyty statycznej wg modelu (rys. 7.8), i z badania płytą statyczną (rys. 7.7) można stwierdzić dla obu przypadków, że na początku następuje dogęszczenie badanej warstwy. Dla pierwotnego obciążenia wyniki osiadania uzyskane w programie Z\_SOIL, jak i podczas badania VSS, miały zbliżone wartości. Natomiast wartości odprężenia warstwy w badaniu VSS były mniejsze niż w modelu Z\_SOIL. Wpływ na te rozbieżności mógł mieć

brak całkowitego odprężenia konstrukcji podczas wykonywania badania w terenie. Okres 5 minut, który jest zakładany podczas odprężenia warstwy jest zbyt krótki dla całkowitego jej odprężenia. Dla wtórnego obciążenia wyniki osiadania uzyskane w programie, jak i podczas badania VSS, miały zbliżone wartości. Na rys. 7.9 przedstawiono przykładowy protokół z badania warstwy podbudowy dla kategorii ruchu KR1 – KR2.

W tabelicy 7.3 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR1 – KR2.

## 7.2 Konstrukcja nr 2

Dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 (rys. 7.10) zostały wykonane 45 porównania (tablica. 7.4). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 32 cm. Dwa wyniki nie spełniły wymagania wskaźnika odkształcenia; ich wartości wyniosły  $I_0 = 2,3$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys. 7.11.

Współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,69$ .



Rys.7.10 Przekrój konstrukcji nr 2 – kategoria ruchu KR1 – KR2

Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,15 \cdot E_{VD} + 32,24 \quad (7.3)$$

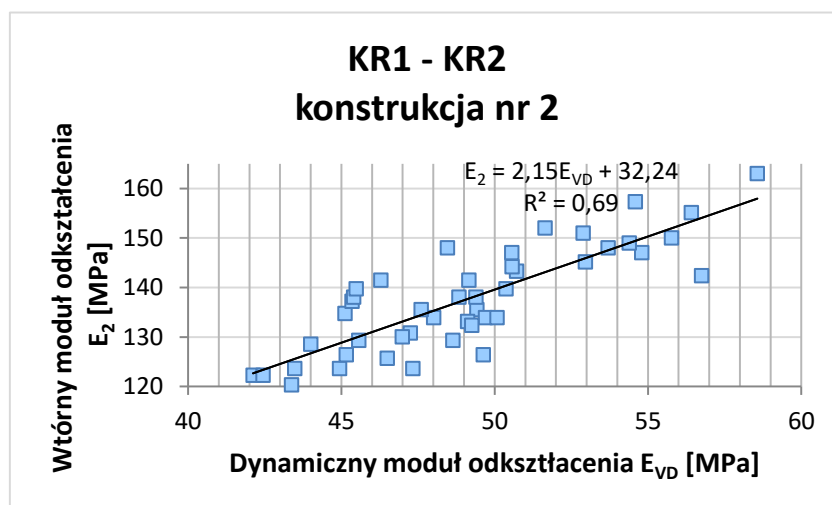
Tablica. 7.4 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 2 dla kategorii ruchu KR1 – KR2

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$l_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD\text{ sr } 0,0}$ [MPa]	$X$ $E_2/E_{VD\text{ sr } 0,0}$
61	124	2,0	40,1	48,4	42,0	43,5	2,84
71	129	1,8	43,5	45,7	42,7	44,0	2,92
70	131	1,9	48,3	50,1	43,4	47,2	2,77
67	142	2,1	47,7	46,2	45,0	46,3	3,06
68	136	2,0	48,9	45,7	53,7	49,4	2,74
65	140	2,2	48,9	51,2	51,0	50,4	2,77
60	126	2,1	46,8	53,7	48,4	49,6	2,55
56	120	2,1	42,6	45,5	41,9	43,4	2,77
53	124	2,3	44,9	49,4	47,7	47,3	2,61
69	129	1,9	46,8	49,0	50,1	48,6	2,66
70	135	1,9	42,1	43,7	49,5	45,1	2,99
69	147	2,1	54,6	57,1	52,7	54,8	2,68
73	142	2,0	58,5	55,0	56,7	56,7	2,51
67	134	2,0	50,6	50,0	48,5	49,7	2,69
56	124	2,2	45,8	42,8	46,3	44,9	2,75
62	122	2,0	49,5	37,9	39,0	42,1	2,90
60	133	2,2	47,3	50,7	49,4	49,1	2,71
66	130	2,0	46,3	49,0	45,6	47,0	2,77
73	138	1,9	53,4	46,5	48,2	49,4	2,80
75	148	2,0	55,3	52,8	53,0	53,7	2,76
79	151	1,9	52,2	51,8	54,6	52,9	2,86
75	163	2,2	57,4	60,3	58,0	58,6	2,78
73	157	2,2	54,8	56,4	52,5	54,6	2,88
70	142	2,0	50,0	48,5	49,0	49,2	2,88
64	134	2,1	53,4	44,8	45,8	48,0	2,79
59	122	2,1	45,3	40,1	42,0	42,4	2,88
67	137	2,0	49,3	44,5	42,2	45,3	3,03
83	145	1,7	54,9	50,3	53,7	53,0	2,74
79	143	1,8	49,3	52,7	50,1	50,7	2,83
70	138	2,0	45,0	47,2	44,0	45,4	3,04
71	134	1,9	43,6	49,4	57,3	50,1	2,67
75	147	2,0	47,5	51,0	53,2	50,6	2,91
69	152	2,2	54,7	50,1	50,0	51,6	2,94
74	155	2,1	57,0	53,7	58,5	56,4	2,75
75	150	2,0	53,4	53,6	60,3	55,8	2,69
73	140	1,9	48,5	42,2	45,7	45,5	3,07
68	132	2,0	46,0	53,4	48,3	49,3	2,69
64	129	2,0	52,1	40,8	43,8	45,6	2,84
66	126	1,9	43,0	45,2	47,3	45,2	2,80
68	138	2,0	47,3	50,1	49,0	48,8	2,83
59	126	2,1	48,0	43,9	47,6	46,5	2,70
73	144	2,0	51,4	50,3	50,0	50,6	2,85
66	149	2,3	50,2	58,3	54,7	54,4	2,74
67	136	2,0	48,3	47,6	46,9	47,6	2,85
73	148	2,0	51,1	45,8	48,4	48,5	3,05

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 120$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 40,9$  MPa.

W tablicy 7.5 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych

zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR1 – KR2.



Rys.7.11 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 2 dla ruchu KR1 – KR2

Tablica 7.5 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR1 – KR2

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 45$	1
Pomiar największy	$x_{\max} = 163,0$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} = 120,3$	MPa
Rozstęp	$R = 42,7$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 137,6$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 1,5$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 10,3$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 7,5$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=44$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,015$	1
Przedział ufności Neymana $P\{134,520 < m < 140,686\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 45$	1
Pomiar największy	$x_{\max} = 58,6$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} = 42,1$	MPa
Rozstęp	$R = 16,5$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 49,1$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 0,6$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 4,0$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 8,2$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=44$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,015$	1
Przedział ufności Neymana $P\{47,867 < m < 50,296\} = 0,95$		

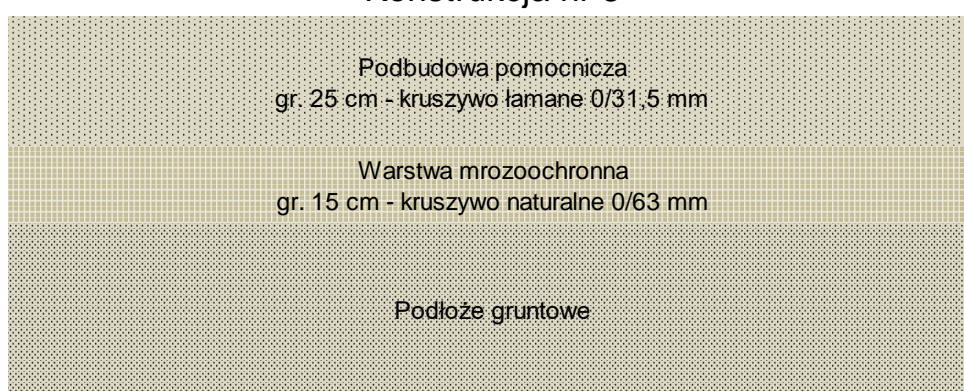


### 7.3 Konstrukcja nr 3

Dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 (rys. 7.12) zostały wykonane 23 porównania (tablica 7.6). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 40 cm. Trzy wyniki nie spełniły wymagań wtórnego modułu odkształcenia, najmniejszy z nich wyniósł  $E_2 = 113$  MPa. Jeden wynik nie spełnił wymagania wskaźnika odkształcenia i wyniósł  $I_0 = 2,3$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 7.13.

Współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,75$ .

#### Kategoria ruchu KR1 - KR2 Konstrukcja nr 3



Rys.7.12 Przekrój konstrukcji nr 3 – kategoria ruchu KR1 – KR2

Tablica. 7.6 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 3 dla kategorii ruchu KR1 – KR2

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$I_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD sr 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD 0,0}$
67	141	2,1	56,0	52,7	43,9	50,8	2,77
60	126	2,1	45,8	39,4	45,0	43,4	2,91
57	122	2,1	44,0	48,3	45,7	46,0	2,64
53	117	2,2	46,3	50,7	39,4	45,5	2,56
51	118	2,3	41,0	38,5	48,6	42,7	2,77
61	122	2,0	45,3	34,9	44,2	41,5	2,95
60	129	2,2	52,7	41,8	43,7	46,1	2,81
70	135	1,9	48,5	49,0	52,4	49,9	2,70
76	158	2,1	57,3	54,4	59,3	57,0	2,78
66	130	2,0	48,8	42,6	44,5	45,3	2,87
52	113	2,2	38,4	40,3	37,9	38,9	2,91
66	129	2,0	41,2	45,3	45,7	44,1	2,93
75	152	2,0	58,9	57,2	54,6	56,9	2,67
82	162	2,0	60,0	58,6	59,1	59,2	2,73
70	145	2,1	55,5	52,1	53,5	53,7	2,70
64	130	2,0	46,3	40,2	48,3	44,9	2,89
65	120	1,9	42,2	43,7	40,8	42,2	2,85
64	124	1,9	42,5	44,8	44,6	44,0	2,81
63	132	2,1	46,3	48,6	42,9	45,9	2,88
68	138	2,0	44,2	47,5	49,3	47,0	2,94
59	125	2,1	42,0	45,2	43,0	43,4	2,88
63	124	2,0	43,5	50,6	47,3	47,1	2,62
61	133	2,2	55,0	62,7	58,3	58,6	2,27

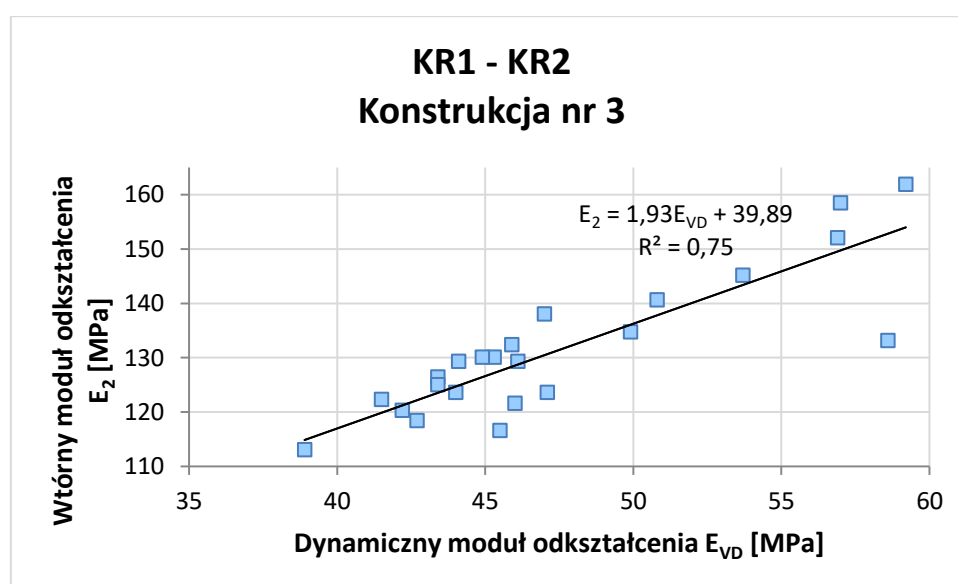
Tablica. 7.7 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR1 – KR2

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	23	1
Pomiar największy	$x_{\max} =$	161,9	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	113,1	MPa
Rozstęp	$R =$	48,8	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	131,6	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	2,6	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	12,5	MPa
Współczynnik zmienności	$v =$	9,5	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=22$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,074	1
Przedział ufności Neymana $P\{126,143 < m < 136,994\} = 0,95$			

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	23	1
Pomiar największy	$x_{\max} =$	59,2	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	38,9	MPa
Rozstęp	$R =$	20,3	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	47,6	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	1,2	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	5,8	MPa
Współczynnik zmienności	$v =$	12,2	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=22$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,074	1
Przedział ufności Neymana $P\{45,070 < m < 50,069\} = 0,95$			



Rys.7.13 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 3 dla ruchu KR1 – KR2

Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,93 \cdot E_{VD} + 39,89 \quad (7.4)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 120$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 41,6$  MPa.

W tablicy 7.7 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR1 – KR2.

## 7.4 Konstrukcja nr 4

Dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 (rys. 7.14) zostało wykonane 8 porównań (tab. 7.8). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 35 cm. Warstwa podbudowy była oddzielona od warstwy odsączającej geowłókniną. Jeden wynik nie spełnił wymagania dla wskaźnika odkształcenia i wyniósł  $I_0 = 2,3$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 7.15.

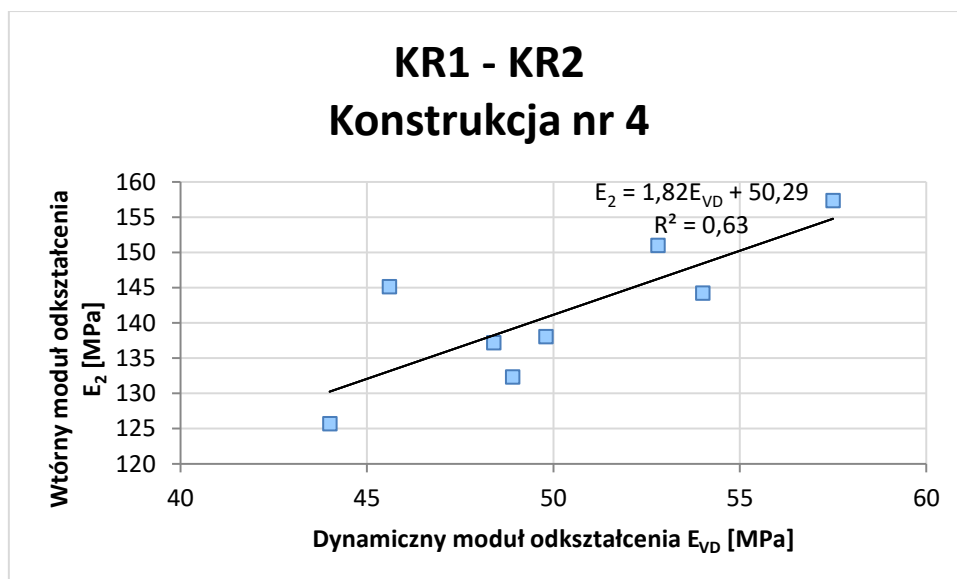
Współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,63$ .



Rys.7.14 Przekrój konstrukcji nr 4 – kategoria ruchu KR1 – KR2

Tablica. 7.8 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 4 dla kategorii ruchu KR1 – KR2

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$I_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD \text{ sr } 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD 0,0}$
75	144	1,9	53,2	56,0	52,7	54,0	2,67
67	138	2,1	49,8	48,4	51,1	49,8	2,77
58	126	2,2	44,5	42,9	44,6	44,0	2,86
66	137	2,1	49,0	47,0	49,3	48,4	2,83
68	151	2,2	54,7	53,5	50,2	52,8	2,86
66	145	2,2	45,1	43,4	48,4	45,6	3,18
57	132	2,3	50,3	49,5	46,8	48,9	2,71
76	157	2,1	57,8	52,5	62,3	57,5	2,73



Rys.7.15 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 4 dla ruchu KR1 – KR2

Tablica. 7.9 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR1 – KR2

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 8$	1
Pomiar największy	$x_{max} = 157,3$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{min} = 125,7$	MPa
Rozstęp	$R = 31,6$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 141,4$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 3,3$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 9,5$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 6,7$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=7$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,365$	1
Przedział ufności Neymana $P\{133,457 < m < 149,300\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 8$	1
Pomiar największy	$x_{max} = 57,5$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{min} = 44,0$	MPa
Rozstęp	$R = 13,5$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 50,1$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 1,6$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 4,5$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 8,9$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=7$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,365$	1
Przedział ufności Neymana $P\{46,397 < m < 53,853\} = 0,95$		

Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,82 \cdot E_{VD} + 50,29 \quad (7.5)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 120$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 38,4$  MPa.

W tabelicy 7.9 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR1 – KR2.

## 7.5 Podsumowanie

Współczynnik determinacji dla wszystkich 100 przykładów wynosi  $R^2 = 0,72$  i jest zadowalający. Współczynnik ten różni się w zależności od miąższości konstrukcji, i tak dla:

- gr. 32 cm (konstrukcja nr 2) wynosi  $R^2 = 0,69$
- gr. 35 cm (konstrukcja nr 1) wynosi  $R^2 = 0,74$
- gr. 35 cm (konstrukcja nr 4) wynosi  $R^2 = 0,63$
- gr. 40 cm (konstrukcja nr 3) wynosi  $R^2 = 0,75$

Dla konstrukcji drogi nr 4 została zastosowana geowłóknina, która mogła mieć wpływ na uzyskaną wartość współczynnika determinacji, który jest niższy i odstaje od pozostałych wartości. Wykonanie tylko 8 porównań nie pozwala na dokładniejszą analizę powyższego problemu. Jeśli zastosowanie geowłókniny do warstw konstrukcyjnych zostanie wprowadzone na większą skalę należy wykonać dodatkowy zestaw badań porównawczych dla uzyskania zależności statycznego modułu odkształcenia  $E_2$  z dynamicznym modułem odkształcenia  $E_{VD}$  dla konstrukcji z zastosowaną geowłókniną.

Odrzucając wynik dla konstrukcji nr 4 można przyjąć, że im grubsza konstrukcja tym wyższa wartość współczynnika determinacji. Dla konstrukcji nr 2 o grubości 32 cm niższa wartość współczynnika determinacji może być spowodowana wpływem podłoża gruntowego na wykonywane badania.

Wyniki badań opisane w tablicach 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 autor wykorzystał do analizy, która jest najczęściej wykonywana w czasie budowy danego odcinka drogi i polega na porównaniu wartości dynamicznego modułu odkształcenia i wartości wtórnego modułu

odkształcenia poprzez podzielenie średnich arytmetycznych wszystkich uzyskanych wyników badań:  $X = \frac{\Sigma E_2}{\Sigma E_{VD\ sr}}$ .

Dla każdej konstrukcji drogi dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano współczynnik  $X_i$ :

- dla konstrukcji nr 1 otrzymano  $X_1 = 2,7878$
- dla konstrukcji nr 2 otrzymano  $X_2 = 2,8078$
- dla konstrukcji nr 3 otrzymano  $X_3 = 2,7766$
- dla konstrukcji nr 4 otrzymano  $X_4 = 2,8277$
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano  $X_{KR1-KR2} = 2,7975$

Współczynnik  $X$  umożliwił uzyskanie minimalnej wartości dynamicznego modułu odkształcenia  $\overline{E_{VD}}$  z badania lekką płytą dynamiczną dla wartości  $E_2$ , i tak:

- dla konstrukcji nr 1,  $E_2 = 120$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 43,1$  MPa  
( $E_{VD} \cdot X_1 = E_2$  to  $43,1$  MPa  $\cdot 2,7878 = 120$  MPa)
- dla konstrukcji nr 2,  $E_2 = 120$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 42,8$  MPa
- dla konstrukcji nr 3,  $E_2 = 120$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 43,3$  MPa
- dla konstrukcji nr 4,  $E_2 = 120$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 42,5$  MPa
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR1 – KR2  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 42,9$  MPa

Zestawiając minimalne wartości  $E_{VD}$  uzyskane wyżej przedstawionymi sposobami dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymujemy:

- dla konstrukcji nr 1 – wzór (7.2)  $E_{VD} = 40,9$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 43,1$  MPa
- dla konstrukcji nr 2 – wzór (7.3)  $E_{VD} = 40,9$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 42,8$  MPa
- dla konstrukcji nr 3 – wzór (7.4)  $E_{VD} = 41,6$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 43,3$  MPa
- dla konstrukcji nr 4 – wzór (7.5)  $E_{VD} = 38,8$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 42,5$  MPa
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR1 – KR2 – wzór (7.1)  $E_{VD} = 41,1$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 42,9$  MPa.

## 8 Kategoria ruchu KR3 – KR4

Dla kategorii ruchu KR3 – KR4 zostało wykonanych 100 porównań dla 5 różnych konstrukcji. Wszystkie konstrukcje zaliczamy do konstrukcji podatnych o zbliżonej do siebie miąższości. Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 8.1.

Wymaganie dla wtórnego modułu odkształcenia na podbudowie dla ruchu KR3 – KR4 wynosi  $E_2 \geq 140$  MPa, a dla wskaźnika odkształcenia  $I_0 \leq 2,2$ .

Tablica. 8.1 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla 5 różnych konstrukcji drogowych dla kategorii ruchu KR3 – KR4

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów $n =$	100	1
Pomiar największy $x_{\max} =$	194,0	MPa
Pomiar najmniejszy $x_{\min} =$	128,6	MPa
Rozstęp $R =$	65,4	MPa
Średnia arytmetyczna $\bar{x} =$	157,0	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej $s_{\bar{x}} =$	1,2	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru $s =$	12,4	MPa
Współczynnik zmienności $v =$	7,9	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=99$ i $P=95\%$ $t_{\alpha s} =$	1,984	1
Przedział ufności Neymana $P\{154,544 < m < 159,480\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

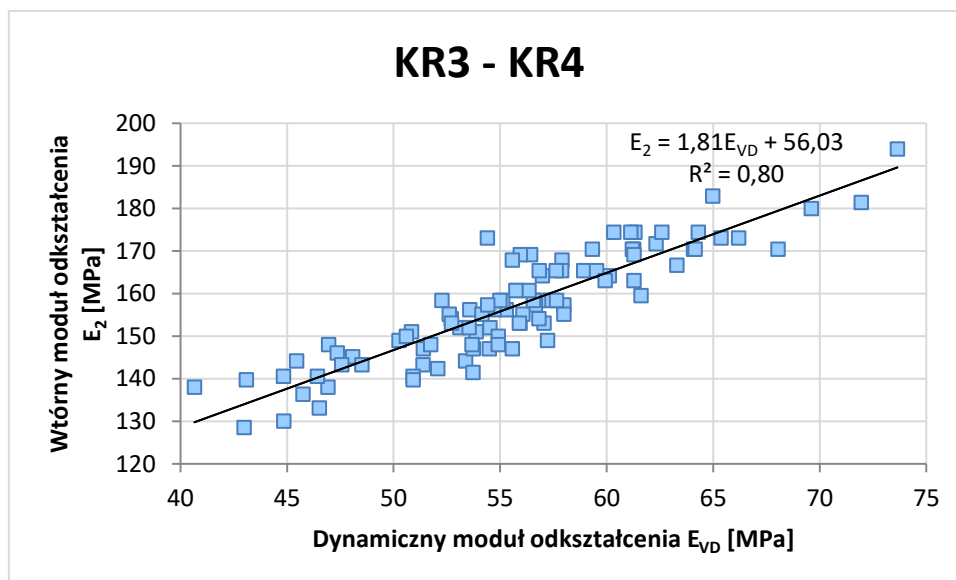
Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów $n =$	100	1
Pomiar największy $x_{\max} =$	73,6	MPa
Pomiar najmniejszy $x_{\min} =$	40,7	MPa
Rozstęp $R =$	32,9	MPa
Średnia arytmetyczna $\bar{x} =$	55,7	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej $s_{\bar{x}} =$	0,6	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru $s =$	6,2	MPa
Współczynnik zmienności $v =$	11,1	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=99$ i $P=95\%$ $t_{\alpha s} =$	1,984	1
Przedział ufności Neymana $P\{54,441 < m < 56,895\} = 0,95$		

Sześć badań nie spełniło wymagania wtórnego modułu odkształcenia i uzyskało  $E_2 \leq 140$  MPa, najmniejszy uzyskany wynik to 129 MPa. Osiem wyników nie spełniło wymagania wskaźnika odkształcenia; największy z nich przyjmuje wartość  $I_0 = 2,8$ .

Analizując wszystkie uzyskane wyniki, współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,80$ .

Dla podbudowy podatnej dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,81 \cdot E_{VD} + 56,03 \quad (8.1)$$



Rys.8.1 Zestawienie wszystkich porównań dla ruchu KR3 – KR4

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 140$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 46,4$  MPa.

W tabelicy 8.1 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla kategorii ruchu KR3 – KR4.

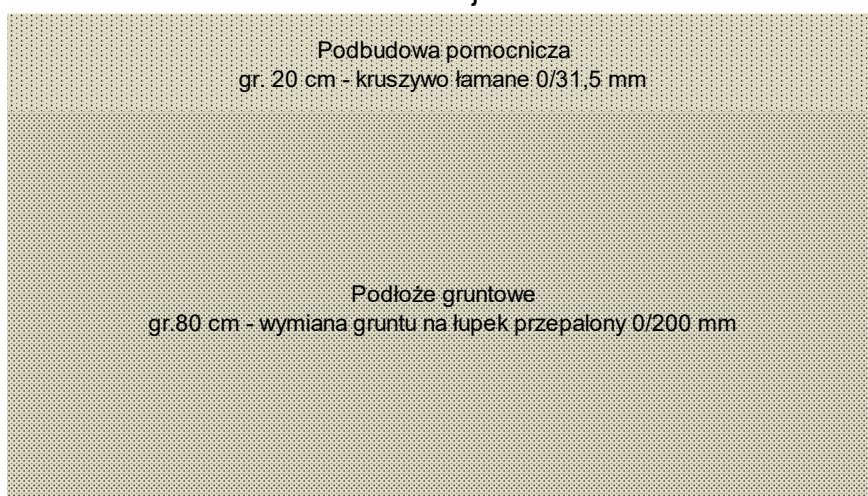
## 8.1 Konstrukcja nr 1

Dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR3 – KR4 (rys. 8.2) zostały wykonane 27 porównania (tablica 8.2). Dla każdego z tych porównań zostały wykonane badania wilgotności naturalnej. Próbki pobrano po wykonaniu badania płytą statyczną lub lekką płytą dynamiczną. Kruszywo dla jednej próbki zostało pobrane z trzech miejsc: z góry warstwy, ze środka oraz ze spodu badanej warstwy. Wilgotność badanych próbek została przedstawiona w tabelicy 8.2. Jedno z porównań zostało wykonane na warstwie podbudowy o wilgotności kruszywa mniejszej o 2,2% od wilgotności optymalnej. Pomimo mniejszej wilgotności badanej warstwy uzyskano wynik spełniający wymagania dla podbudowy



o kategorii ruchu KR3 – KR4 ( $E_2 = 141$  MPa,  $I_0 = 1,8$ ). Wilgotność pozostałych próbek nie przekraczała normowych wymagań zagęszczenia warstwy kruszywa  $\pm 2\%$ , w związku z tym została pominięta w dalszych analizach. Na podstawie jednego wyniku uzyskanego na warstwie podbudowy o wilgotności kruszywa niemieszcząc się w przedziale  $\pm 2\%$  wilgotności optymalnej nie można wyciągnąć wniosków o wpływie wilgotności na wykonywane badania.

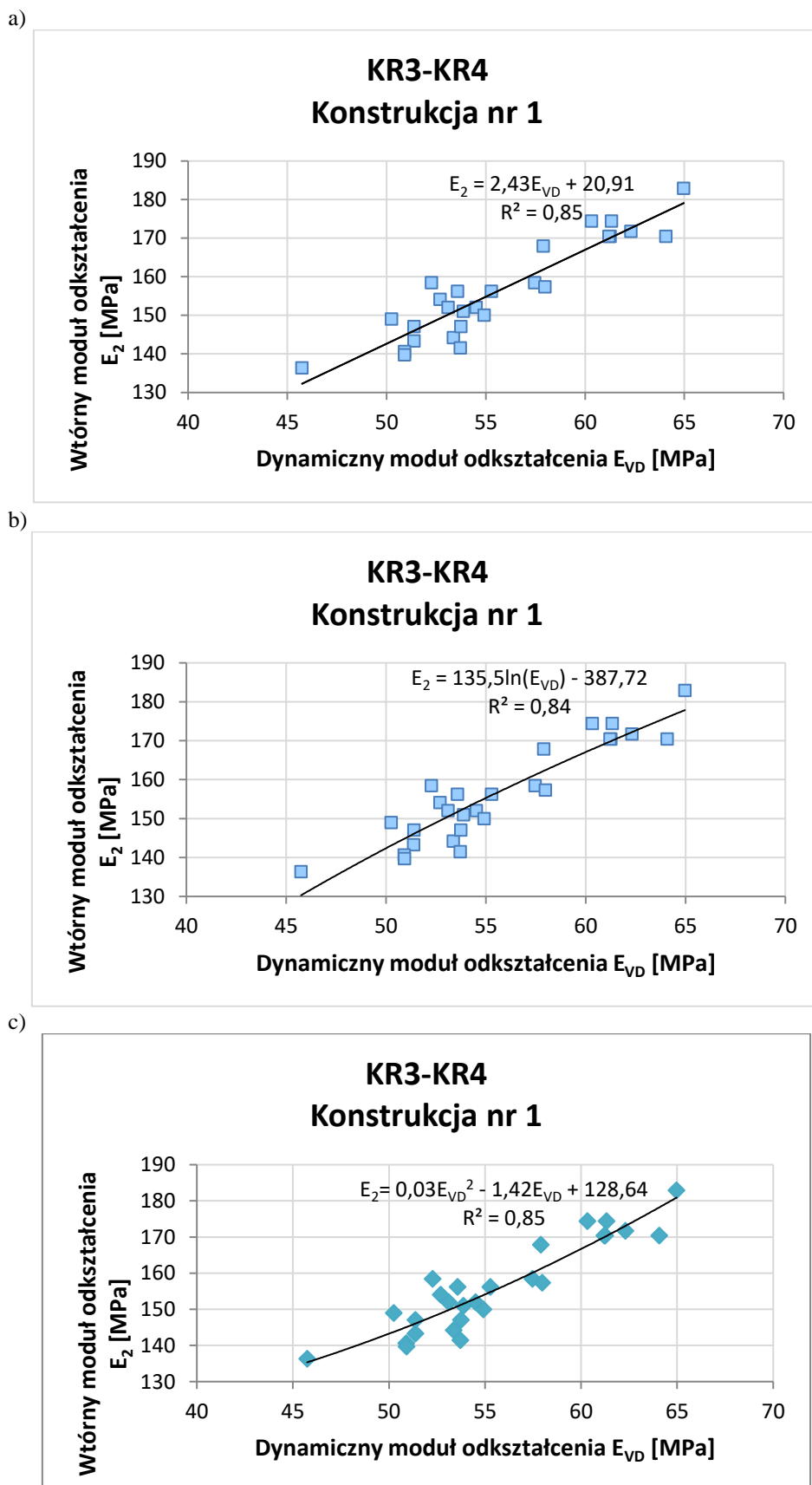
### Kategoria ruchu KR3 - KR4 Konstrukcja nr 1



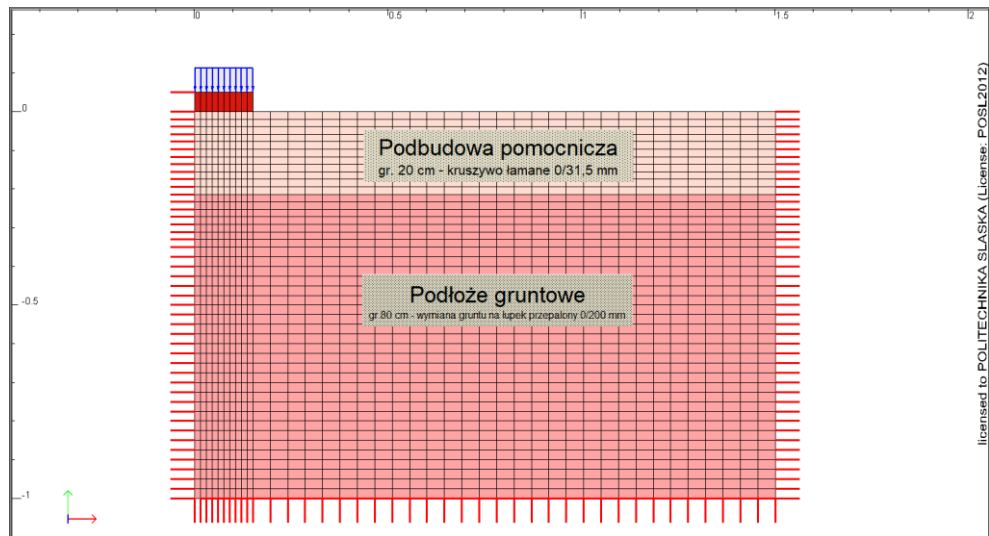
Rys.8.2 Przekrój konstrukcji nr 1 – kategoria ruchu KR3 – KR4

Tablica 8.2 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 1 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

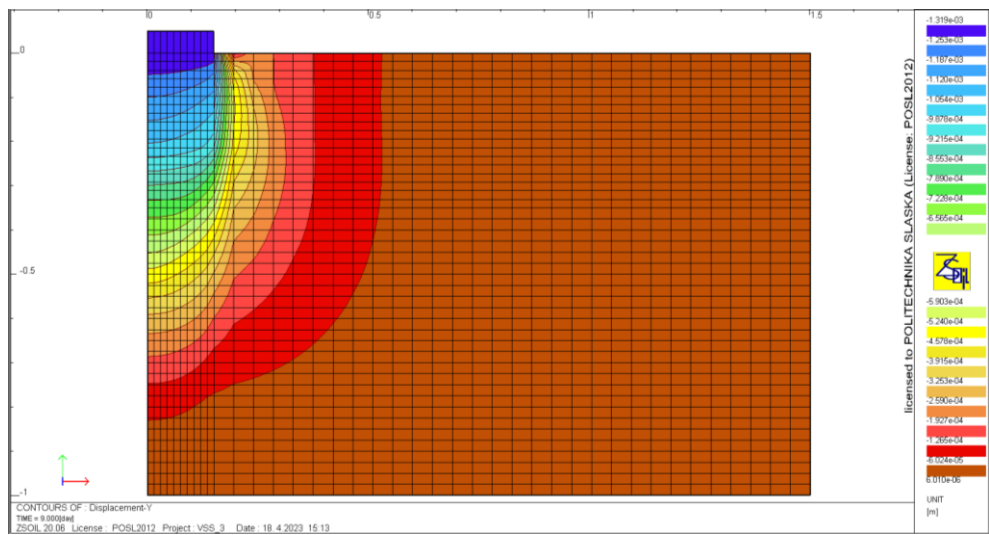
płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna					korelacja przelicznik	Optymalna wilgotność kruszywa z warstwy 5,5 - 6,4 %			
E <sub>1</sub> [MPa]	E <sub>2</sub> [MPa]	I <sub>0</sub> E <sub>2</sub> /E <sub>1</sub>	E <sub>VD1</sub> [MPa]	E <sub>VD2</sub> [MPa]	E <sub>VD3</sub> [MPa]	E <sub>VD śr 0</sub> [MPa]	E <sub>VD śr 0,0</sub> [MPa]	x E <sub>2</sub> /E <sub>VD 0,0</sub>	Wilgotność naturalna w miejscu w ykonywania badania			
									dla E <sub>VD1</sub> w <sub>n1</sub> [%]	dla E <sub>VD2</sub> w <sub>n2</sub> [%]	dla E <sub>VD3</sub> w <sub>n3</sub> [%]	dla E <sub>2</sub> w <sub>n4</sub> [%]
66	143	2,2	52,4	50,0	51,7	51	51,4	2,79	4,2	4,4	4,4	4,5
66	154	2,3	54,7	50,2	53,1	53	52,7	2,92	6,0	6,1	6,0	6,0
93	170	1,8	60,7	64,2	67,3	64	64,1	2,66	5,4	5,7	5,8	5,7
78	141	1,8	51,2	50,3	51,2	51	50,9	2,76	3,4	3,3	3,3	3,3
80	156	2,0	55,2	57,1	53,5	55	55,3	2,83	4,7	4,7	4,6	4,7
97	174	1,8	62,4	60,2	58,4	60	60,3	2,89	5,0	5,0	5,1	5,0
91	170	1,9	59,6	63,5	60,6	61	61,3	2,78	5,6	5,7	5,4	5,4
90	158	1,8	58,4	54,7	59,3	58	57,5	2,76	5,3	4,9	5,3	5,2
77	151	2,0	53,5	55,7	52,4	54	53,9	2,80	6,0	6,1	6,1	5,8
75	144	1,9	51,2	50,6	58,3	53	53,4	2,70	5,5	5,5	5,3	5,5
69	140	2,0	49,6	54,3	48,9	51	50,9	2,74	5,3	5,2	5,6	5,3
64	136	2,1	45,7	48,3	43,2	46	45,7	2,98	5,6	5,5	5,6	5,8
66	147	2,2	53,4	50,2	50,5	51	51,4	2,86	4,8	4,9	5,3	5,3
71	152	2,1	49,6	53,7	60,2	55	54,5	2,79	5,6	5,6	5,6	5,6
75	150	2,0	50,3	60,0	54,4	55	54,9	2,73	5,8	5,6	5,5	5,6
68	147	2,2	48,5	56,7	56,0	54	53,7	2,74	4,7	4,8	4,3	4,7
71	142	2,0	53,2	51,1	56,8	54	53,7	2,63	5,3	5,3	5,3	5,5
79	168	2,1	58,4	57,0	58,3	58	57,9	2,90	5,3	5,3	5,0	5,2
89	172	1,9	60,3	59,4	67,3	62	62,3	2,76	5,5	5,7	5,5	5,4
86	157	1,8	58,4	55,6	59,9	58	58,0	2,71	5,7	5,7	5,7	5,6
72	149	2,1	52,3	50,6	47,8	50	50,2	2,97	5,4	5,7	5,8	5,5
76	156	2,1	56,7	51,7	52,3	54	53,6	2,92	5,4	5,4	5,4	5,4
75	152	2,0	53,3	51,3	54,7	53	53,1	2,86	5,6	5,6	5,6	5,8
81	170	2,1	60,7	58,7	64,2	61	61,2	2,78	5,3	5,4	5,4	5,3
92	183	2,0	65,7	63,2	66,0	65	65,0	2,82	6,1	5,6	5,8	5,5
95	174	1,8	61,1	59,6	63,3	61	61,3	2,84	5,5	5,5	5,5	5,2
89	158	1,8	54,6	52,2	50,0	52	52,3	3,03	5,6	5,4	5,4	5,7



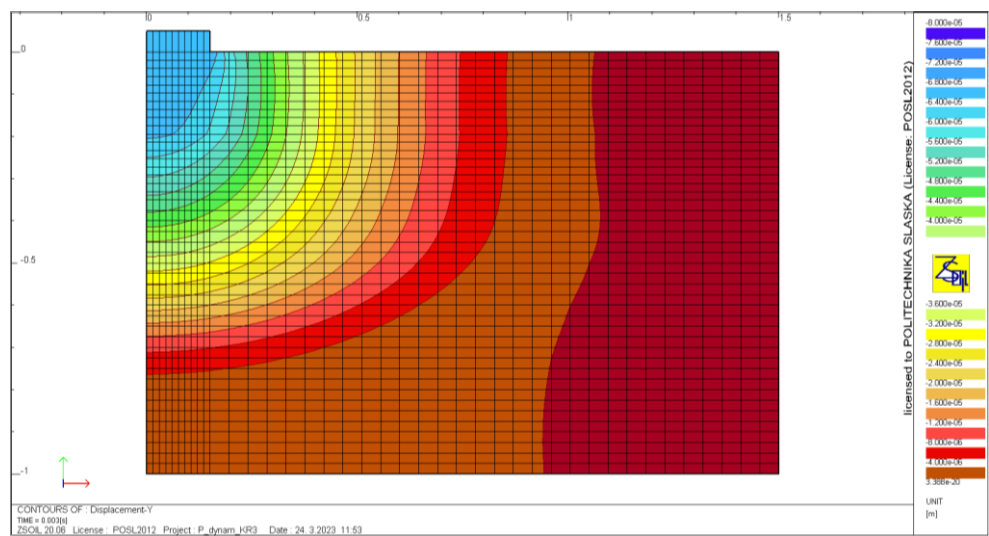
Rys.8.3 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 1 dla ruchu KR3 – KR4 a) liniowa linia trendu, b) logarytmiczna linia trendu, c) kwadratowa linia trendu



Rys.8.4 Ruch KR3 – KR4 konstrukcja nr 1 – model (Z\_SOIL)

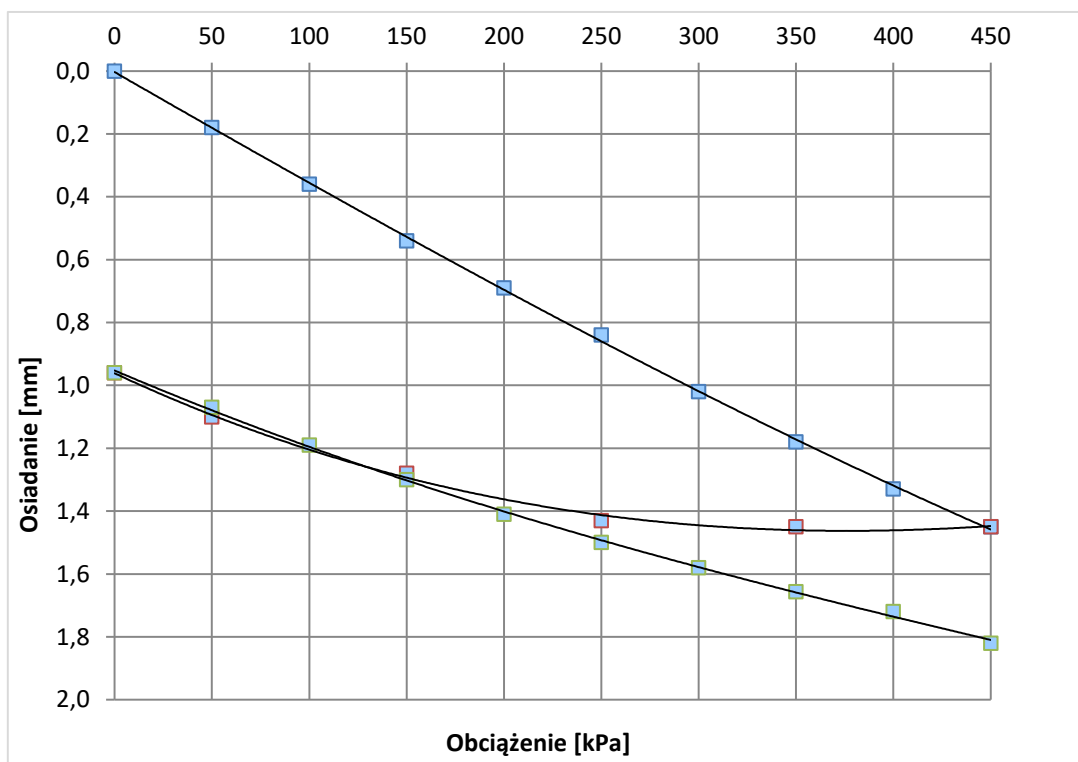


Rys.8.5 Ruch KR3 – KR4 konstrukcja nr 1 – osiadania podczas badania VSS (Z\_SOIL)

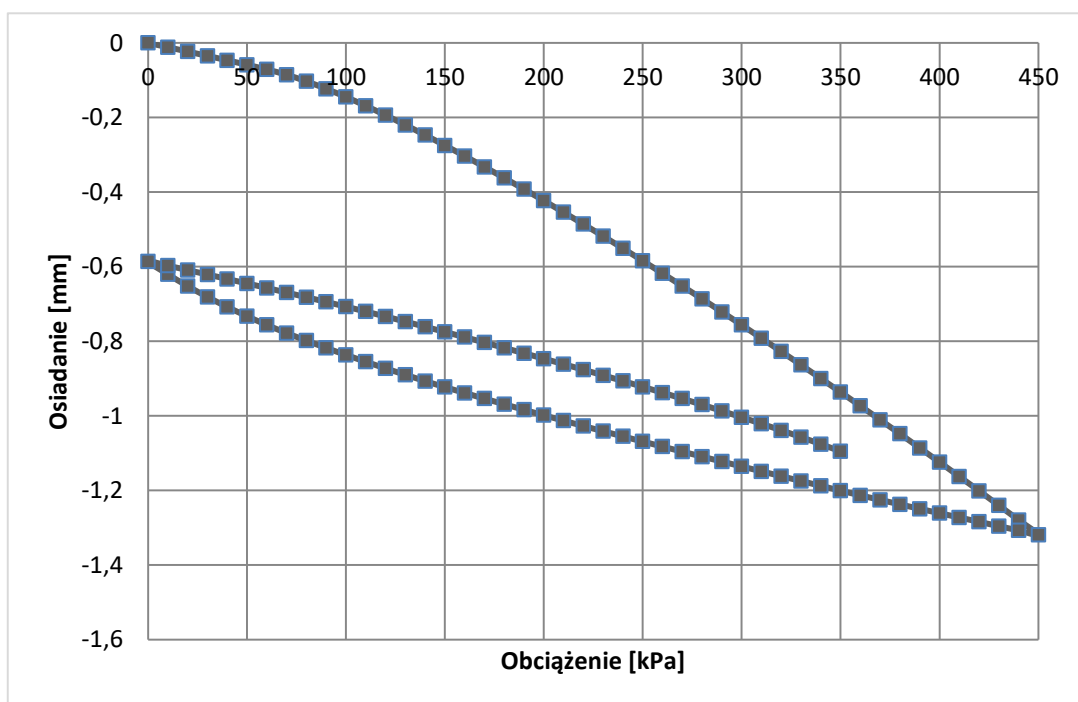


Rys.8.6 Ruch KR3 – KR4 konstrukcja nr 1 – osiadania podczas badania lekką płytą dynamiczną (Z\_SOIL)

Mięszość badanej konstrukcji wynosiła 100 cm (rys. 8.2, 8.4). Jeden wynik nie spełnił wymagań wtórnego modułu odkształcenia i wyniósł  $E_2 = 136$  MPa. Jeden wynik nie spełnił wymagania wskaźnika odkształcenia i wyniósł  $I_0 = 2,3$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 8.3.



Rys.8.7 Ruch KR3 – KR4 konstrukcja nr 1 – osiadanie wg badania VSS



Rys.8.8 Ruch KR3 – KR4 konstrukcja nr 1 – osiadanie wg programu Z\_SOIL

## PROTOKÓŁ Z BADAŃ

Oznaczanie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą (VSS)

Zleceniodawca : Skanska S.A.

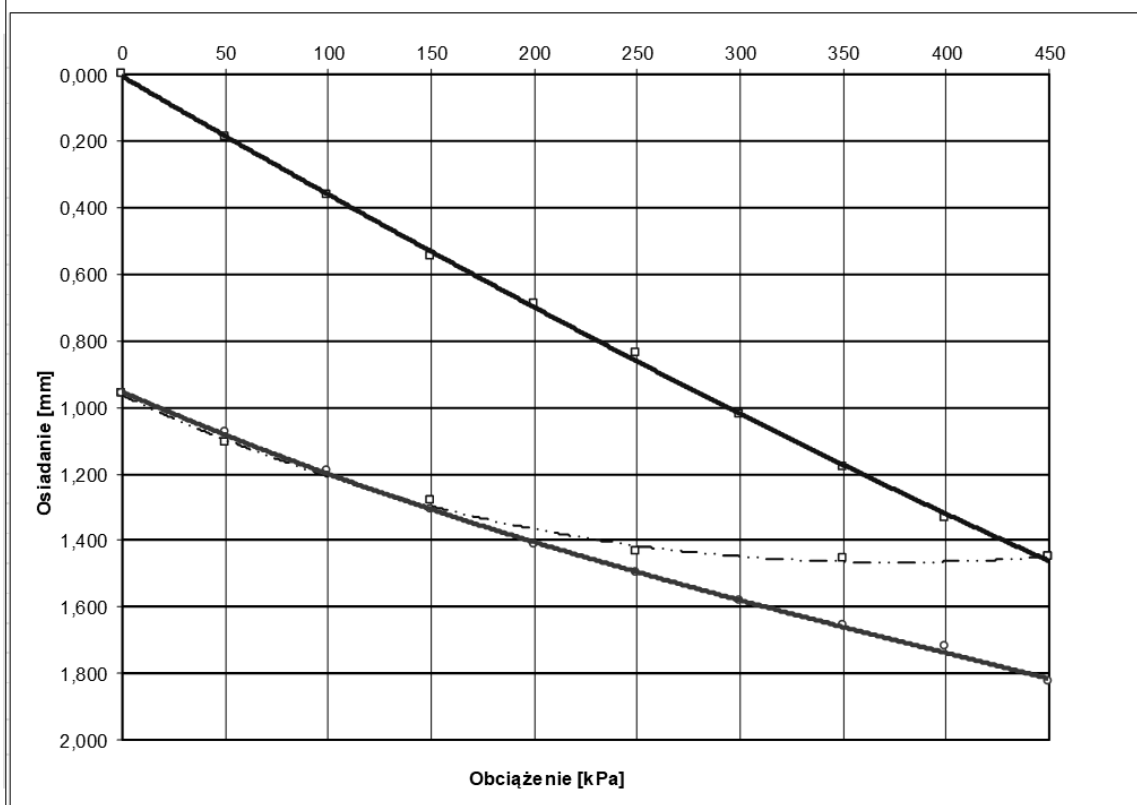
Punkt : km 0+060 - strona prawa 1,5m od krawędzi warstwy

warstwa podbudowy pomocniczej z kruszywa łamanego - mieszanka 0/31,5 GZD Siewierz

Data badania : 22.06.2014

Moduł pierwotny i wtórny - płyta  $\phi$  30 cm.

[kPa]	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Obciążenie I	0,000	0,189	0,363	0,547	0,690	0,840	1,022	1,181	1,334	1,451
Odciążenie I	0,961	1,105		1,282		1,432		1,454		1,451
Obciążenie II	0,961	1,074	1,191	1,309	1,413	1,500	1,582	1,657	1,722	1,825



Końcowe obciążenie doprowadza się do **0,45 MPa**

$$E_{1,2} = D \cdot (\Delta p / \Delta S) \cdot 0,75 \quad D - \text{średnica płyty, } 30 \text{ cm}$$

$E_{1,2}$  - moduł odkształcenia (pierwotny, wtórny)

$\Delta p$  - przyrost obciążenia jednostkowego w zakresie od **0,25 do 0,35 MPa**

$\Delta S$  - przyrost odkształcenia odpowiadający przyjętemu zakresowi obciążeń jednostkowych, w mm

Moduł pierwotny :  $M_{E1} = 66 \text{ MPa}$

Moduł wtórny :  $M_{E2} = 143 \text{ MPa} \geq 120 \text{ MPa}$

Wskaźnik odkształcenia :

$$I_0 = 2,2 \leq 2,2$$

Rys. 8.9 Przykładowy protokół z badania VSS, Kategoria ruchu KR3 – KR4, konstrukcja nr 1

Dla konstrukcji nr 1 dla ruchu KR3 – KR4 zostały wykonane trzy zestawienia porównań, opisane trzema liniami trendu:

- linową, dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,85$  (rys 8.3a),
- logarytmiczną, dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,84$  (rys 8.3b),
- kwadratową, dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,85$  (rys 8.3c).

Do dalszych porównań dla ruchu KR3 – KR4 zostało przyjęte porównanie linowe. Współczynnik determinacji jest dobry i wynosi  $R^2 = 0,85$ .

Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 1, dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,43 \cdot E_{VD} + 20,91 \quad (8.2)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 140$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 49,0$  MPa. W programie Z\_SOIL został wykonany model oddziaływania płyty statycznej VSS (rys. 8.5) oraz lekkiej płyty dynamicznej (rys 8.6) na badane warstwy. Z analizy wyników można stwierdzić, że oddziaływanie badania sięga ok 50 cm włąb badanych warstw. Porównując osiadanie płyty statycznej z programu Z\_SOIL (rys. 8.8), z wynikami badania płytą statyczną (rys. 8.7) można stwierdzić, że na początku wykonywania badania następuje dogęszczenie warstwy. Dla pierwotnego obciążenia wyniki osiadania uzyskane w programie, jak i podczas badania VSS miały zbliżone wartości. Natomiast wartości odprężenia warstwy w badaniu VSS były mniejsze niż w modelu Z\_SOIL. Wpływ na te rozbieżności mógł mieć brak całkowitego odprężenia konstrukcji podczas wykonywania badania w terenie. Czas 5 minut, który jest przyjmowany podczas odprężenia warstwy jest zbyt krótki dla całkowitego jej odprężenia. Dla wtórnego obciążenia wielkości osiadania uzyskane w modelu Z\_SOIL, jak i podczas badania VSS miały zbliżone wartości. Na rys. 8.9 przedstawiono przykładowy protokół za badania warstwy podbudowy dla kategorii ruchu KR3 – KR4.

W tablicy 8.3 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR3 – KR4.

Tablica 8.3 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	n =	27	1
Pomiar największy	$x_{\max}$ =	182,9	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min}$ =	136,4	MPa
Rozstęp	R =	46,5	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$ =	156,2	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}}$ =	2,4	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	s =	12,3	MPa
Współczynnik zmienności	v =	7,9	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla s=n-1=26 i P=95%	$t_{\alpha s}$ =	2,056	1
Przedział ufności Neymana P{151,329<m<161,488}=0,95			

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	n =	27	1
Pomiar największy	$x_{\max}$ =	65,0	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min}$ =	45,7	MPa
Rozstęp	R =	19,3	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$ =	55,6	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}}$ =	0,9	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	s =	4,8	MPa
Współczynnik zmienności	v =	8,6	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla s=n-1=26 i P=95%	$t_{\alpha s}$ =	2,056	1
Przedział ufności Neymana P{53,687<m<57,456}=0,95			

## 8.2 Konstrukcja nr 2

Dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR3 – KR4 (rys. 8.10) zostało wykonane 17 porównań (tablica. 8.4). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 60 cm. Trzy wyniki nie spełniły wymagań wtórnego modułu odkształcenia – najmniejszy z nich wyniósł  $E_2 = 130$  MPa. Cztery wyniki nie spełniły wymagania wskaźnika odkształcenia – największy z nich wyniósł  $I_0 = 2,8$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 8.11. Współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,75$ .

Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,82 \cdot E_{VD} + 54,66 \quad (8.3)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 140$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 46,9$  MPa.

W tablicy 8.5 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych

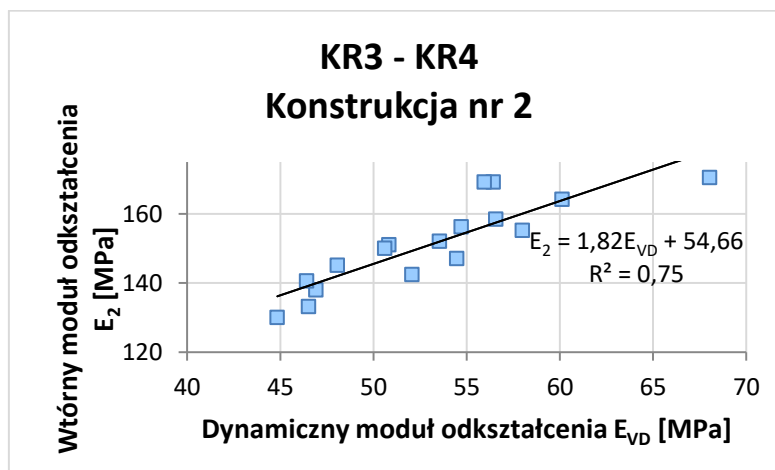
zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR3 – KR4.



Rys.8.10 Przekrój konstrukcji nr 2 – kategoria ruchu KR3 – KR4

Tablica. 8.4 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 2 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$l_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD\text{ śr } 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD\ 0,0}$
66	138	2,1	43,6	42,5	54,7	46,9	2,94
82	145	1,8	51,1	45,3	47,8	48,1	3,02
64	151	2,4	49,5	50,6	52,4	50,8	2,97
79	150	1,9	47,8	48,2	55,8	50,6	2,96
77	147	1,9	54,3	52,7	56,4	54,5	2,70
87	152	1,7	53,1	57,3	50,1	53,5	2,84
59	164	2,8	56,7	63,7	60,0	60,1	2,73
69	169	2,5	55,3	55,1	58,9	56,4	3,00
76	158	2,1	53,2	50,7	65,8	56,6	2,80
72	142	2,0	48,9	55,2	52,1	52,1	2,74
70	141	2,0	45,6	43,4	50,2	46,4	3,03
88	169	1,9	53,4	55,1	59,4	55,9	3,02
80	155	1,9	55,7	53,4	64,8	58,0	2,68
87	170	2,0	67,4	70,3	66,4	68,0	2,51
72	133	1,8	46,4	43,8	49,3	46,5	2,86
57	130	2,3	43,2	45,8	45,6	44,8	2,90
77	156	2,0	56,4	50,3	57,4	54,7	2,86



Rys.8.11 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 2 dla ruchu KR3 – KR4



Tablica 8.5 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka	
Liczba pomiarów	$n =$	17	1
Pomiar największy	$x_{\max} =$	170,5	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	130,1	MPa
Rozstęp	$R =$	40,4	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	151,3	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	2,9	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	12,0	MPa
Współczynnik zmienności	$v =$	7,9	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=16$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,120	1
Przedział ufności Neymana $P\{145,140 < m < 157,498\} = 0,95$			

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka	
Liczba pomiarów	$n =$	17	1
Pomiar największy	$x_{\max} =$	68,0	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	44,8	MPa
Rozstęp	$R =$	23,2	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	53,2	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	1,4	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	5,9	MPa
Współczynnik zmienności	$v =$	11,2	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=16$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,120	1
Przedział ufności Neymana $P\{50,126 < m < 56,234\} = 0,95$			

### 8.3 Konstrukcja nr 3

Dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR3 – KR4 (rys. 8.12) zostały wykonane 26 porównania (tablica 8.6). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 45 cm. Dwa wyniki nie spełniły wymagań wtórnego modułu odkształcenia; mniejszy z nich wyniósł  $E_2 = 129$  MPa. Jeden wynik nie spełnił wymagania wskaźnika odkształcenia i wyniósł  $I_0 = 2,4$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 8.13.

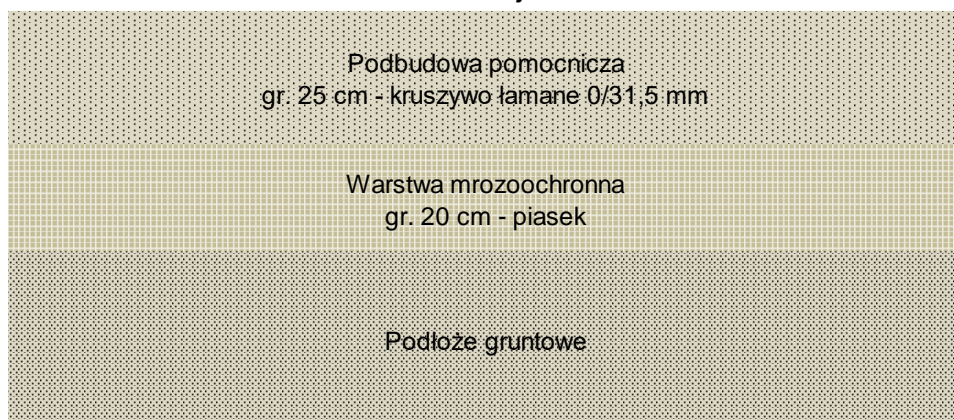
Współczynnik determinacji jest dobry i wynosi  $R^2 = 0,86$ .

Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 3, dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,67 \cdot E_{VD} + 61,77 \quad (8.4)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 140$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 46,9$  MPa.

## Kategoria ruchu KR3 - KR4 Konstrukcja nr 3

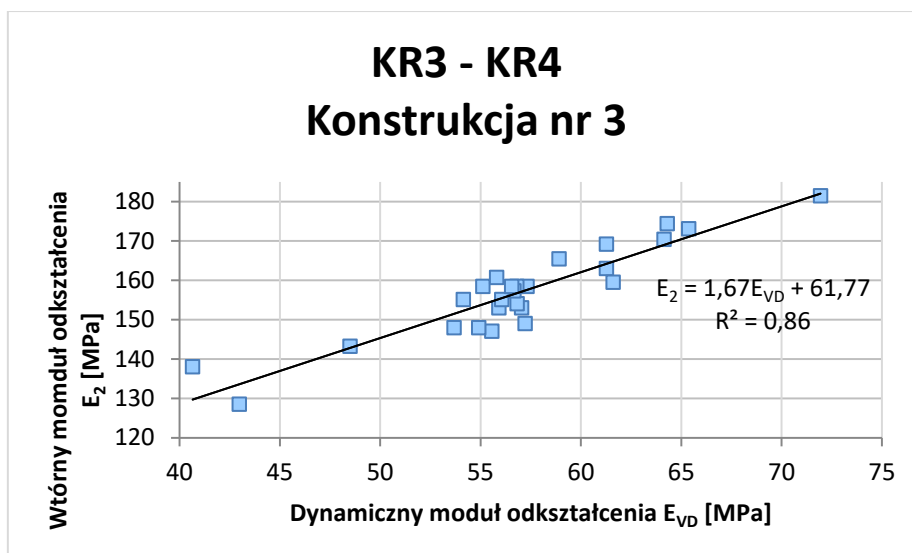


Rys.8.12 Przekrój konstrukcji nr 3 – kategoria ruchu KR3 – KR4

Tablica. 8.6 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 3 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$l_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD sr 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD 0,0}$
81	163	2,0	66,2	57,4	60,3	61,3	2,66
85	160	1,9	63,6	60,0	61,2	61,6	2,59
69	148	2,1	55,0	51,8	54,3	53,7	2,76
64	143	2,2	48,6	45,5	51,5	48,5	2,95
82	174	2,1	63,4	62,2	67,3	64,3	2,71
83	165	2,0	60,0	57,8	59,0	58,9	2,81
75	158	2,1	55,4	56,2	53,8	55,1	2,87
75	153	2,0	57,9	58,5	51,3	55,9	2,74
68	149	2,2	52,6	60,7	58,4	57,2	2,60
72	147	2,0	59,4	52,3	55,0	55,6	2,65
63	129	2,1	39,5	47,3	42,1	43,0	2,99
75	148	2,0	55,5	52,8	56,4	54,9	2,70
78	153	2,0	57,4	54,1	59,6	57,1	2,68
75	158	2,1	54,9	56,8	60,3	57,3	2,76
81	169	2,1	60,3	63,6	60,0	61,3	2,76
76	158	2,1	54,8	58,9	56,7	56,8	2,79
87	154	1,8	56,8	58,5	55,1	56,8	2,71
90	181	2,0	71,3	69,4	75,2	71,9	2,52
94	170	1,8	63,6	66,7	62,1	64,1	2,66
80	157	2,0	56,4	55,2	58,3	56,7	2,78
76	155	2,1	55,3	58,7	54,2	56,1	2,77
63	138	2,2	40,1	39,6	42,3	40,7	3,40
83	161	1,9	54,2	49,7	63,5	55,8	2,88
66	155	2,4	52,3	50,8	59,4	54,1	2,87
77	158	2,0	59,4	53,7	56,6	56,6	2,80
82	173	2,1	65,3	68,3	62,5	65,4	2,65

W tablicy 8.7 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR3 – KR4.



Rys.8.13 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 3 dla ruchu KR3 – KR4

Tablica 8.7 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	26
Pomiar największy	$x_{\max} =$	181,5
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	128,6
Rozstęp	$R =$	52,9
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	157,0
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	2,2
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	11,3
Współczynnik zmienności	$v =$	7,2
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=25$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,060
Przedział ufności Neymana $P\{152,397 < m < 161,534\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	26
Pomiar największy	$x_{\max} =$	71,9
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	40,7
Rozstęp	$R =$	31,2
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	56,9
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	1,3
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	6,4
Współczynnik zmienności	$v =$	11,3
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=25$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,060
Przedział ufności Neymana $P\{54,355 < m < 59,537\} = 0,95$		

## 8.4 Konstrukcja nr 4

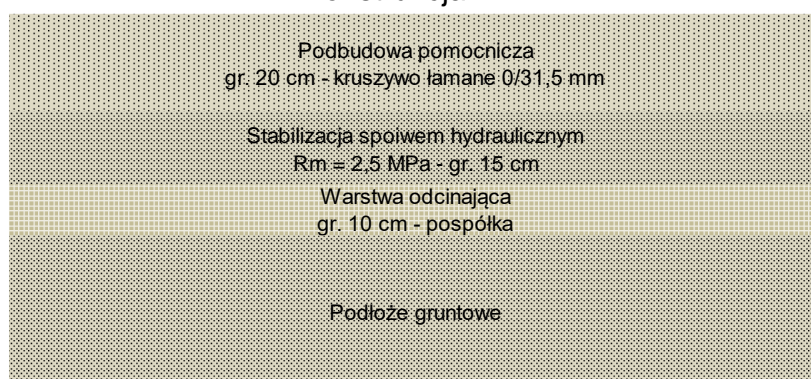
Dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR3 – KR4 (rys. 8.14) zostały wykonane 13 porównania (tablica 8.8). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 45 cm. Jeden wynik nie spełnił wymagania wskaźnika odkształcenia i wyniósł  $I_0 = 2,3$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 8.15.

Współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,62$ .

Dla podbudowy półsztywnej konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,80 \cdot E_{VD} + 60,94 \quad (8.5)$$

### Kategoria ruchu KR3 - KR4 Konstrukcja nr 4

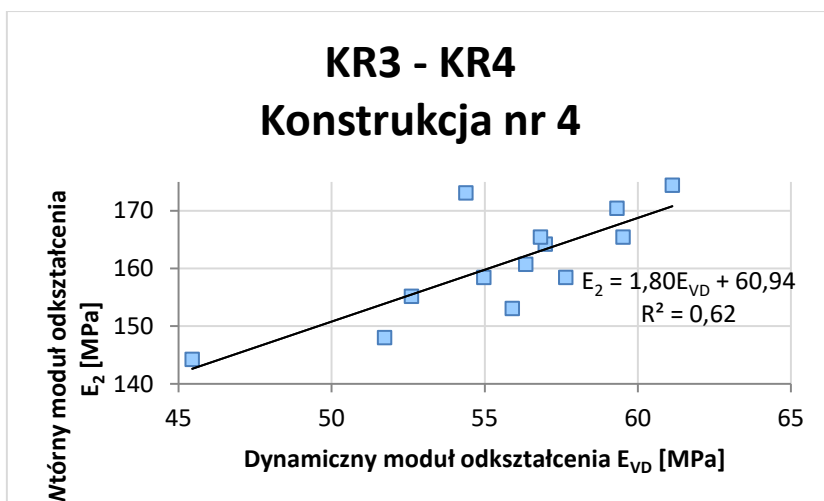


Rys.8.14 Przekrój konstrukcji nr 4 – kategoria ruchu KR3 – KR4

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 140$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 44,0$  MPa.

Tablica. 8.8 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 4 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$I_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD \text{ sr } 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD 0,0}$
83	164	2,0	59,4	54,5	57,0	57,0	2,88
89	170	1,9	57,9	63,7	56,3	59,3	2,87
83	165	2,0	55,3	59,7	55,5	56,8	2,91
85	174	2,0	63,2	60,9	59,3	61,1	2,85
81	173	2,1	52,8	55,7	54,6	54,4	3,18
80	165	2,1	58,4	59,7	60,4	59,5	2,78
76	161	2,1	54,8	54,6	59,6	56,3	2,85
64	148	2,3	49,8	54,0	51,4	51,7	2,86
70	144	2,1	45,3	43,6	47,4	45,4	3,17
77	155	2,0	49,0	52,6	56,3	52,6	2,95
78	158	2,0	53,1	54,6	57,2	55,0	2,88
71	153	2,1	54,5	52,6	60,6	55,9	2,74
72	158	2,2	55,7	59,0	58,3	57,6	2,75



Rys.8.15 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 4 dla ruchu KR3 – KR4

W tabelicy 8.9 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR3 – KR4.

Tablica 8.9 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	13
Pomiar największy	$x_{max} =$	174,4
Pomiar najmniejszy	$x_{min} =$	144,2
Rozstęp	$R =$	30,2
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	160,9
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	2,4
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	8,8
Współczynnik zmienności	$v =$	5,5
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=12$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,179
Przedział ufności Neymana $P\{155,528 < m < 166,190\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	13
Pomiar największy	$x_{max} =$	61,1
Pomiar najmniejszy	$x_{min} =$	45,4
Rozstęp	$R =$	15,7
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	55,6
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	1,1
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	4,1
Współczynnik zmienności	$v =$	7,3
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=12$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,179
Przedział ufności Neymana $P\{53,154 < m < 58,049\} = 0,95$		

Konstrukcja nr 4 dla kategorii ruchu KR3 - KR4 jest konstrukcją półsztywną, ponieważ została zastosowana warstwa stabilizowana spoiwem hydraulicznym. Warstwa ta została wykonana 20 cm poniżej poziomu wykonywanych badań. Ma ona bezpośredni wpływ na wykonywane badania, stąd brak możliwości otrzymania zadowalającej korelacji, o czym świadczy niska wartość współczynnika determinacji.

## 8.5 Konstrukcja nr 5

Dla konstrukcji nr 5 dla kategorii ruchu KR3 – KR4 (rys. 8.16) zostało wykonane 17 porównań (tablica 8.10). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 50 cm. Jeden wynik nie spełnił wymagania wskaźnika odkształcenia i wyniósł  $I_0 = 2,4$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 8.17.

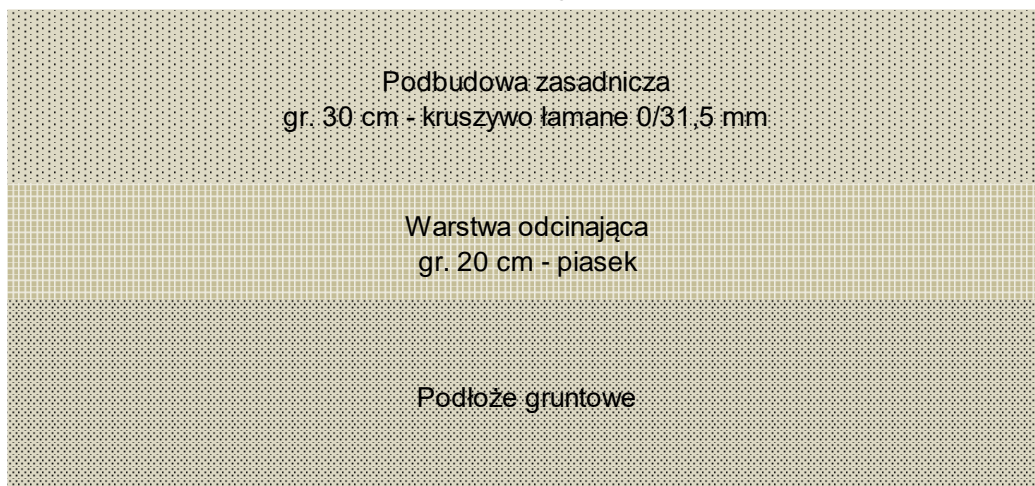
Współczynnik determinacji jest bardzo dobry i wynosi  $R^2 = 0,94$ .

Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 5 dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,64 \cdot E_{VD} + 68,85 \quad (8.6)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 140$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 43,4$  MPa.

### Kategoria ruchu KR3 - KR4 Konstrukcja nr 5



Rys.8.16 Przekrój konstrukcji nr 5 – kategoria ruchu KR3 – KR4

Tablica. 8.10 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 5 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
E <sub>1</sub> [MPa]	E <sub>2</sub> [MPa]	l <sub>0</sub> E <sub>2</sub> /E <sub>1</sub>	E <sub>VD1</sub> [MPa]	E <sub>VD2</sub> [MPa]	E <sub>VD3</sub> [MPa]	E <sub>VD śr 0,0</sub> [MPa]	x E <sub>2</sub> /E <sub>VD 0,0</sub>
86	167	1,9	60,3	65,7	63,9	63,3	2,63
69	163	2,4	59,3	59,4	61,1	59,9	2,72
83	173	2,1	65,6	68,4	64,6	66,2	2,61
94	180	1,9	70,3	68,7	69,8	69,6	2,59
97	194	2,0	73,4	70,2	77,3	73,6	2,63
80	165	2,1	56,3	60,1	57,3	57,9	2,86
93	174	1,9	65,3	62,2	60,2	62,6	2,79
83	168	2,0	55,7	52,6	58,4	55,6	3,02
68	148	2,2	48,3	50,2	42,3	46,9	3,15
75	141	1,9	45,3	44,7	44,5	44,8	3,14
81	146	1,8	44,7	47,9	49,5	47,4	3,09
74	143	1,9	49,3	46,4	47,0	47,6	3,01
72	140	1,9	46,5	43,3	39,5	43,1	3,24
75	153	2,0	53,5	51,8	52,8	52,7	2,90
82	161	2,0	55,1	52,7	59,4	55,7	2,88
87	157	1,8	52,4	57,4	53,4	54,4	2,89
78	165	2,1	58,4	60,1	54,4	57,6	2,87

Tablica 8.11 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 5 dla kategorii ruchu KR3 – KR4

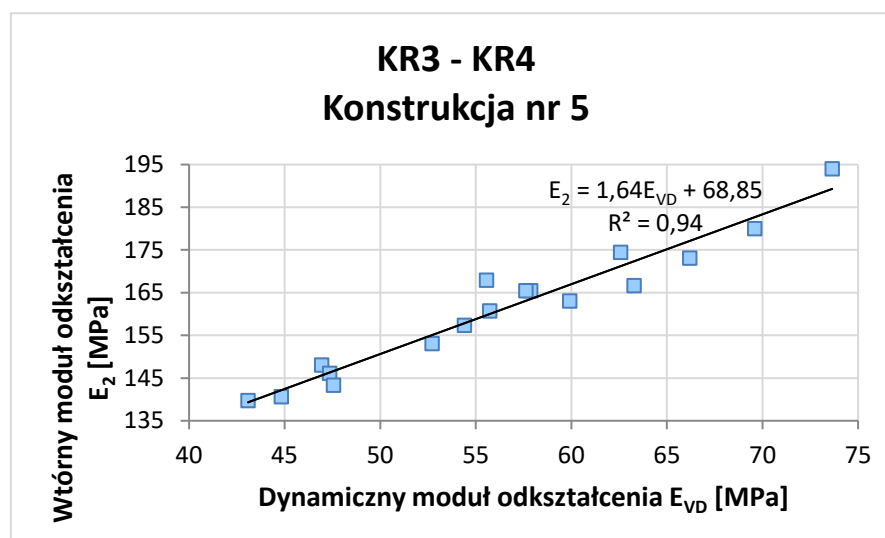
a) wtórny moduł odkształcenia E<sub>2</sub>

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	n = 17	1
Pomiar największy	x <sub>max</sub> = 194,0	MPa
Pomiar najmniejszy	x <sub>min</sub> = 139,8	MPa
Rozstęp	R = 54,2	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$ = 161,1	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	s <sub><math>\bar{x}</math></sub> = 3,5	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	s = 14,4	MPa
Współczynnik zmienności	v = 8,9	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla s=n-1=16 i P=95%	t <sub>0,95</sub> = 2,120	1
Przedział ufności Neymana P{153,707<m<168,517}=0,95		

b) dynamiczny moduł odkształcenia E<sub>VD</sub>

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	n = 17	1
Pomiar największy	x <sub>max</sub> = 73,6	MPa
Pomiar najmniejszy	x <sub>min</sub> = 43,1	MPa
Rozstęp	R = 30,5	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$ = 56,4	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	s <sub><math>\bar{x}</math></sub> = 2,1	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	s = 8,8	MPa
Współczynnik zmienności	v = 15,7	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla s=n-1=16 i P=95%	t <sub>0,95</sub> = 2,120	1
Przedział ufności Neymana P{51,866<m<60,950}=0,95		

W tabelicy 8.11 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 5 dla kategorii ruchu KR3 – KR4.



Rys.8.17 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 5 dla ruchu KR3 – KR4

## 8.6 Podsumowanie

Współczynnik determinacji dla wszystkich 100 przykładów wynosi  $R^2 = 0,80$  i jest zadowalający. Nie biorąc pod uwagę 13 porównań dla konstrukcji nr 4, czyli dla konstrukcji półsztywnej, współczynnik determinacji wynosi  $R^2 = 0,83$ .

Współczynnik  $R^2$  w zależności od miąższości konstrukcji:

- gr. 45 cm (konstrukcja nr 4) wynosi  $R^2 = 0,62$
- gr. 50 cm (konstrukcja nr 5) wynosi  $R^2 = 0,94$
- gr. 55 cm (konstrukcja nr 3) wynosi  $R^2 = 0,86$
- gr. 60 cm (konstrukcja nr 2) wynosi  $R^2 = 0,75$
- gr. 100 cm (konstrukcja nr 1) wynosi  $R^2 = 0,85$

Nie można wyznaczyć zależności pomiędzy współczynnikiem determinacji a grubością konstrukcji nawierzchni. Może to być spowodowane tym, iż wszystkie konstrukcje posiadają miąższość minimum 45 cm. Na tej głębokości wpływ podłoża na wykonywane badania jest niewielki. Dla konstrukcji nr 2 na głębokości 60 cm zastosowano geowłókninę. Zgodnie z modelem wykonanym w programie Z\_SOIL, oddziaływanie badania sięga około 50 cm włąb badanych warstw. Wynika z tego, że geowłóknina zastosowana w konstrukcji nr 2 nie miała wpływu na wyniki badań.



Dla konstrukcji nr 4, która stanowi konstrukcję półsztywną został osiągnięty niższy współczynnik determinacji  $R^2 = 0,62$ . Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że na warstwach półsztywnych wykonanie porównania i zastosowanie płyty dynamicznej może być utrudnione i uzyskane wyniki mogą nie odzwierciedlać nośności badanej warstwy.

Wyniki badań opisane w tablicach 8.2, 8.4, 8.6, 8.8, 8.10 autor wykorzystał do analizy, która jest najczęściej wykonywana w czasie budowy danego odcinka drogi i polega na porównaniu wartości dynamicznego modułu odkształcenia i wartości wtórnego modułu odkształcenia poprzez podzielenie średnich wartości arytmetycznych dla wszystkich uzyskanych wyników badań:  $X = \frac{\sum E_2}{\sum E_{VD\ sr}}$ .

Dla każdej konstrukcji drogi dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano współczynnik  $X_i$ :

- dla konstrukcji nr 1 otrzymano  $X_1 = 2,8137$
- dla konstrukcji nr 2 otrzymano  $X_2 = 2,8562$
- dla konstrukcji nr 3 otrzymano  $X_3 = 2,7715$
- dla konstrukcji nr 4 otrzymano  $X_4 = 2,8991$
- dla konstrukcji nr 5 otrzymano  $X_5 = 2,8846$
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano  $X_{KR3-KR4} = 2,8331$

Współczynnik  $X$  umożliwił uzyskanie minimalnej wartości dynamicznego modułu odkształcenia  $\overline{E_{VD}}$  z badania lekką płytą dynamiczną dla każdej wartości  $E_2$ , i tak:

- dla konstrukcji nr 1,  $E_2 = 140$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 49,8$  MPa  
( $E_{VD} \cdot X_1 = E_2$  to  $49,8$  MPa  $\cdot 2,8137 = 140$  MPa)
- dla konstrukcji nr 2,  $E_2 = 140$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 49,1$  MPa
- dla konstrukcji nr 3,  $E_2 = 140$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 50,6$  MPa
- dla konstrukcji nr 4,  $E_2 = 140$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 48,3$  MPa
- dla konstrukcji nr 5,  $E_2 = 140$  MPa  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 48,6$  MPa
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR3 – KR4  $\rightarrow \overline{E_{VD}} = 49,5$  MPa

Zestawiając minimalne wartości  $E_{VD}$  uzyskane wyżej przedstawionymi sposobami otrzymujemy:

- dla konstrukcji nr 1 – wzór (8.2)  $E_{VD} = 49,0$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 49,8$  MPa
- dla konstrukcji nr 2 – wzór (8.3)  $E_{VD} = 46,9$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 49,1$  MPa

- dla konstrukcji nr 3 – wzór (8.4)  $E_{VD} = 46,9$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 50,6$  MPa
- dla konstrukcji nr 4 – wzór (8.5)  $E_{VD} = 44,0$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 48,3$  MPa
- dla konstrukcji nr 5 – wzór (8.6)  $E_{VD} = 43,4$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 48,6$  MPa
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR3 – KR4 – wzór (8.1)  $E_{VD} = 46,4$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 49,5$  MPa.

## 9. Kategoria ruchu KR5 – KR7

Dla kategorii ruchu KR5 – KR7 zostało wykonanych 150 porównań dla 7 różnych konstrukcji. Trzy rodzaje konstrukcji były konstrukcjami półsztywnymi (konstrukcje nr 2,4,7), a pozostałe konstrukcjami podatnymi (konstrukcje nr 1,3,5,6).

Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys. 9.1.

Tablica. 9.1 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla 7 różnych konstrukcji drogowych dla kategorii ruchu KR5 – KR7

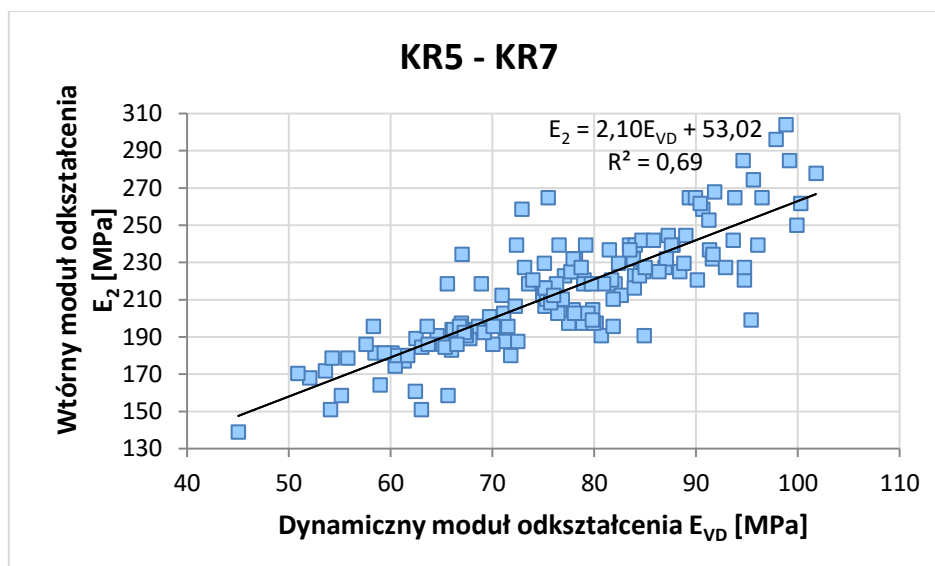
a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów $n =$	150	1
Pomiar największy $x_{\max} =$	304,1	MPa
Pomiar najmniejszy $x_{\min} =$	138,9	MPa
Rozstęp $R =$	165,2	MPa
Średnia arytmetyczna $\bar{x} =$	214,4	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej $s_{\bar{x}} =$	2,5	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru $s =$	30,6	MPa
Współczynnik zmienności $v =$	14,3	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=149$ i $P=95\%$ $t_{\alpha s} =$	1,965	1
Przedział ufności Neymana $P\{209,499 < m < 219,305\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów $n =$	150	1
Pomiar największy $x_{\max} =$	101,8	MPa
Pomiar najmniejszy $x_{\min} =$	45,0	MPa
Rozstęp $R =$	56,8	MPa
Średnia arytmetyczna $\bar{x} =$	76,9	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej $s_{\bar{x}} =$	1,0	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru $s =$	12,1	MPa
Współczynnik zmienności $v =$	15,8	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=149$ i $P=95\%$ $t_{\alpha s} =$	1,965	1
Przedział ufności Neymana $P\{74,919 < m < 78,811\} = 0,95$		

W tablicy 9.1 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla kategorii ruchu KR5 – KR7.



Rys.9.1 Zestawienie wszystkich porównań dla ruchu KR5 – KR7

Wymaganie dla wartości wtórnego modułu odkształcenia na podbudowie dla ruchu KR5 – KR7 wynosi  $E_2 \geq 180$  MPa, a dla wskaźnika odkształcenia  $I_0 \leq 2,2$ .

Dwanaście badań nie spełniło wymagania dla wtórnego modułu odkształcenia i uzyskało wartości  $E_2 \leq 180$  MPa; najmniejszy uzyskany wynik to 139 MPa. Dwadzieścia wyników nie spełniło wymagania dla wskaźnika odkształcenia; największa wartość  $I_0 = 2,5$ . Dla pełniejszego obrazu wykonanego porównania, wyniki nie zostały pominięte w analizie.

Analizując wszystkie uzyskane wyniki, wartość współczynnika determinacji jest zadowalająca i wynosi  $R^2 = 0,69$ .

Dla podbudowy dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano:

$$E_2 = 2,10 \cdot E_{VD} + 53,02 \quad (9.1)$$

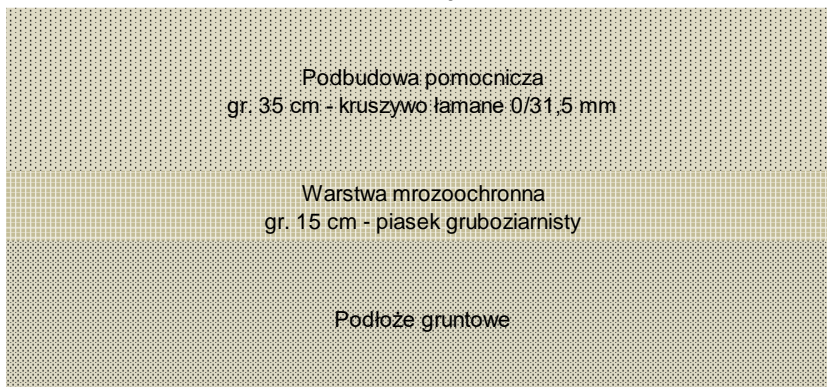
Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, należy otrzymać wartość dynamicznego modułu odkształcenia o wartości minimalnej  $E_{VD} = 60,5$  MPa.

## 9.1 Konstrukcja nr 1

Dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 (rys. 9.2) zostały wykonane 44 porównania (tablica. 9.2). Dla wszystkich porównań zostały wykonane badania wilgotności naturalnej. Próbkę została pobrana po wykonaniu badania płytą statyczną lub lekką płytą dynamiczną. Kruszywo dla jednej próbki zostało pobrane z trzech miejsc:

z góry warstwy, ze środka oraz ze spodu badanej warstwy. Wilgotność badanych próbek została przedstawiona w tablicy 9.3.

### Kategoria ruchu KR5 - KR7 Konstrukcja nr 1



Rys.9.2 Przekrój konstrukcji nr 1 – kategoria ruchu KR5 – KR7

Tablica.9.2 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 1 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

płyta statyczna			lekką płytą dynamiczną				korelacja przelicznik	Optymalna wilgotność kruszywa z warstwy 5,5 - 6,4 %			
E <sub>1</sub> [MPa]	E <sub>2</sub> [MPa]	I <sub>0</sub> E <sub>2</sub> /E <sub>1</sub>	E <sub>VD1</sub> [MPa]	E <sub>VD2</sub> [MPa]	E <sub>VD3</sub> [MPa]	E <sub>VD sr 0,0</sub> [MPa]	x E <sub>2</sub> /E <sub>VD 0,0</sub>	Wilgotność naturalna w miejscu wykonywania badania			
								dla E <sub>VD1</sub> w <sub>n1</sub> [%]	dla E <sub>VD2</sub> w <sub>n2</sub> [%]	dla E <sub>VD3</sub> w <sub>n3</sub> [%]	dla E <sub>2</sub> w <sub>n4</sub> [%]
89	181	2,0	57,3	62,7	60,3	60,1	3,02	5,6	5,5	5,6	5,6
105	191	1,8	64,3	67,8	61,5	64,5	2,95	5,0	5,0	4,8	4,9
114	225	2,0	88,4	74,7	72,4	78,5	2,87	5,3	5,4	5,4	5,5
112	212	1,9	73,4	70,1	69,3	70,9	2,99	5,0	5,1	5,0	5,0
113	218	1,9	79,4	84,1	82,6	82,0	2,66	5,9	5,7	5,6	5,3
126	259	2,1	89,9	94,3	87,8	90,6	2,85	5,2	5,3	5,2	5,0
115	223	1,9	78,3	72,7	80,2	77,1	2,89	5,9	5,9	5,7	5,7
107	189	1,8	63,5	60,1	63,8	62,5	3,03	6,1	6,1	6,2	6,0
106	177	1,7	64,7	59,3	60,0	61,3	2,89	6,5	6,5	6,5	6,4
103	188	1,8	73,6	70,1	70,0	71,2	2,63	5,9	6,2	6,0	6,1
106	201	1,9	85,6	74,1	75,3	78,3	2,56	5,4	5,6	5,6	5,8
112	206	1,8	78,4	69,8	77,2	75,1	2,75	5,0	5,1	5,5	5,0
113	221	2,0	81,3	75,7	80,0	79,0	2,79	4,7	4,8	4,9	4,9
121	239	2,0	86,9	80,4	83,1	83,5	2,87	6,1	6,0	6,0	6,0
104	212	2,0	80,1	78,4	89,4	82,6	2,57	5,7	5,7	5,7	5,6
102	205	2,0	78,4	75,7	85,4	79,8	2,56	5,7	5,7	5,7	5,7
91	180	2,0	73,4	78,5	63,5	71,8	2,51	5,5	5,5	5,3	5,4
100	194	1,9	70,0	70,4	64,7	68,4	2,84	5,6	5,3	5,4	5,6
119	227	1,9	76,8	87,5	89,3	84,5	2,69	4,7	4,8	4,7	4,6
111	218	2,0	81,0	80,3	75,6	79,0	2,77	5,0	5,0	5,0	4,9
115	230	2,0	81,5	80,3	85,3	82,4	2,79	4,6	4,5	4,7	4,6
97	186	1,9	69,4	70,3	70,3	70,0	2,66	6,2	6,3	6,3	6,3
103	196	1,9	75,1	69,3	70,1	71,5	2,74	6,1	6,1	6	6,1
113	218	1,9	79,4	75,4	74,0	76,3	2,86	5,2	5,4	5,2	5,2
107	223	2,1	80,2	87,4	84,3	84,0	2,65	4,8	4,7	4,7	4,8
95	188	2,0	73,2	73,0	71,2	72,5	2,59	6,5	6,4	6,5	6,7
93	197	2,1	75,3	80,2	81,1	78,8	2,50	6,3	6,4	6,3	6,3
71	158	2,2	53,4	55,7	56,3	55,1	2,87	8,5	8,2	8,5	8,3
79	164	2,1	58,3	60,2	58,3	58,9	2,79	8,1	8,0	8,2	8,1
69	151	2,2	55,3	50,2	56,8	54,1	2,79	8,4	8,4	8,5	8,4
68	161	2,4	59,0	64,7	63,6	62,4	2,57	8,3	8,1	8,4	8,3
103	237	2,3	90,2	92,5	91,2	91,3	2,59	3,5	3,5	3,6	3,8
111	268	2,4	84,7	99,3	91,5	91,8	2,92	3,6	3,6	3,6	3,5
122	285	2,3	102,1	100,7	94,7	99,2	2,87	3,2	3,2	3,3	3,2
103	221	2,1	83,6	92,5	94,3	90,1	2,45	3,9	3,8	3,8	3,9
107	232	2,2	91,3	90,0	93,5	91,6	2,53	3,8	3,6	3,7	3,8
97	239	2,5	88,6	84,5	90,1	87,7	2,73	3,7	3,6	3,8	3,7
109	253	2,3	90,4	92,3	91,1	91,3	2,77	3,4	3,5	3,4	3,4
105	225	2,1	86,4	88,5	90,2	88,4	2,55	3,8	3,9	3,8	3,8
107	245	2,3	89,4	80,2	97,4	89,0	2,75	3,4	3,5	3,5	3,3
90	158	1,8	69,4	63,3	64,1	65,6	2,41	-	-	-	-
84	151	1,8	64,3	65,0	59,6	63,0	2,40	-	-	-	-
96	197	2,1	68,4	66,4	66,0	66,9	2,95	-	-	-	-
102	189	1,9	64,6	70,2	68,5	67,8	2,79	-	-	-	-

Mięszość badanej konstrukcji wynosiła 50 cm (rys. 9.2, 9.4). Pięć wyników nie spełniło wymagań dla wartości wtórnego modułu odkształcenia; najmniejsza wartość  $E_2 = 151$  MPa. Siedem wyników nie spełniło wymagania dla wskaźnika odkształcenia; największa wartość  $I_0 = 2,5$ . Jeden z wyników, który uzyskano przy wilgotności badanej warstwy większej od wilgotności optymalnej o ok 2%, nie spełnił wymagań dla wtórnego modułu odkształcenia oraz wskaźnika odkształcenia ( $E_2 = 161$  MPa,  $I_0 = 2,4$ ). Dodatkowo, trzy wyniki niespełniające wymagań wtórnego modułu odkształcenia ( $E_2 = 151, 158, 164$  MPa) uzyskano dla warstwy o wilgotności przekroczonej o ok 2% od wilgotności optymalnej. Sześć z wyników, w których nie uzyskano poprawnego wskaźnika odkształcenia ( $I_0 = 2,3 \div 2,5$ ) było wykonanych na warstwie o wilgotności ok 2% mniejszej od wilgotności optymalnej. Pozostałe wyniki były wykonywane dla warstwy, dla której wilgotność była zbliżona do wilgotności optymalnej.

Z powyższych analiz wynika, że wykonywanie badań dla warstwy, dla której wilgotność różni się od wilgotności optymalnej o ok  $\pm 2\%$  ma wpływ na otrzymywane wyniki. Dla warstwy zawilgoconej trudniej o uzyskanie odpowiedniej wartości wtórnego modułu odkształcenia (uzyskane wyniki  $E_2$  od 151 MPa do 164 MPa, przy wymaganiu  $\geq 180$  MPa). Na warstwie „przesuszonej” można spodziewać się przekroczenia wymagań wskaźnika odkształcenia (uzyskane wyniki  $I_0$  są w przedziale od 2,3 do 2,5, przy wymaganiu  $\leq 2,2$ ). Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 9.3 oraz w tablicy 9.2.

Dla kategorii ruchu KR5 – KR7 zostało wykonanych 120 analiz sitowych kruszywa, które wykorzystano w 30 porównaniach. Wszystkie wyniki analiz sitowych potwierdziły, że zostały spełnione graniczne wymagania mieszanki niezwiązanej dla kruszywa o frakcji 0/31,5 mm dla podbudów.

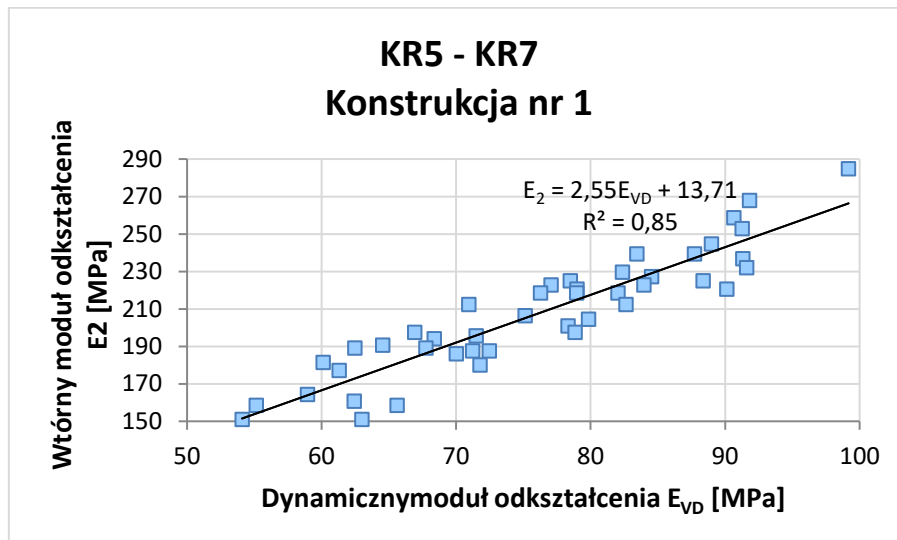
Dla konstrukcji nr 1 dla ruchu KR5 – KR7 zostały wykonane trzy zestawienia porównań, opisane trzema liniami trendu:

- linową, dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,85$  (rys 9.3a),
- logarytmiczną, dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,83$  (rys 9.3b),
- kwadratową dla której uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,85$  (rys 9.3c).

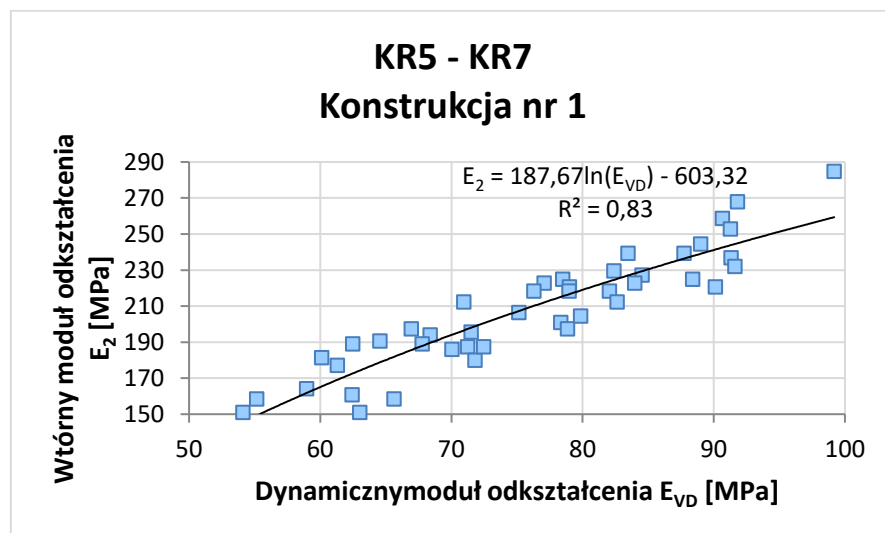
Do dalszych porównań dla ruchu KR3 – KR4 zostało przyjęte porównanie linowe.

Wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,85$ , co świadczy że porównanie wyników jest dobre.

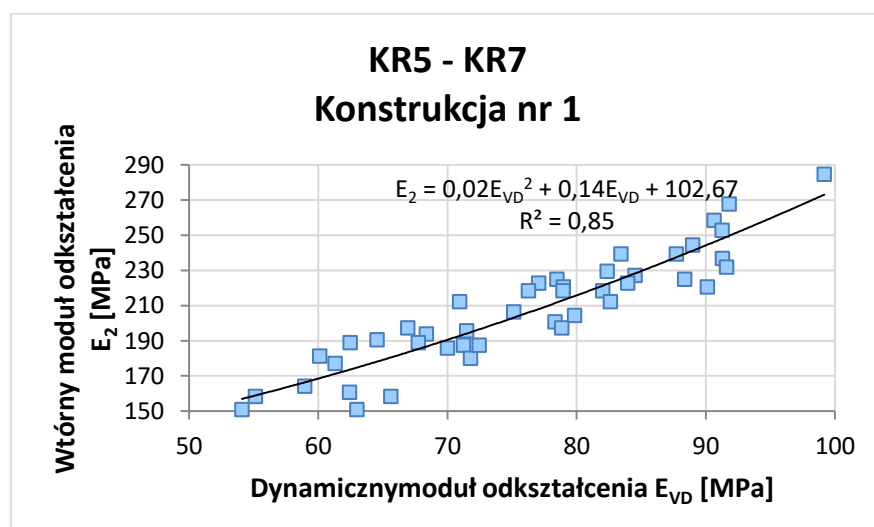
a)



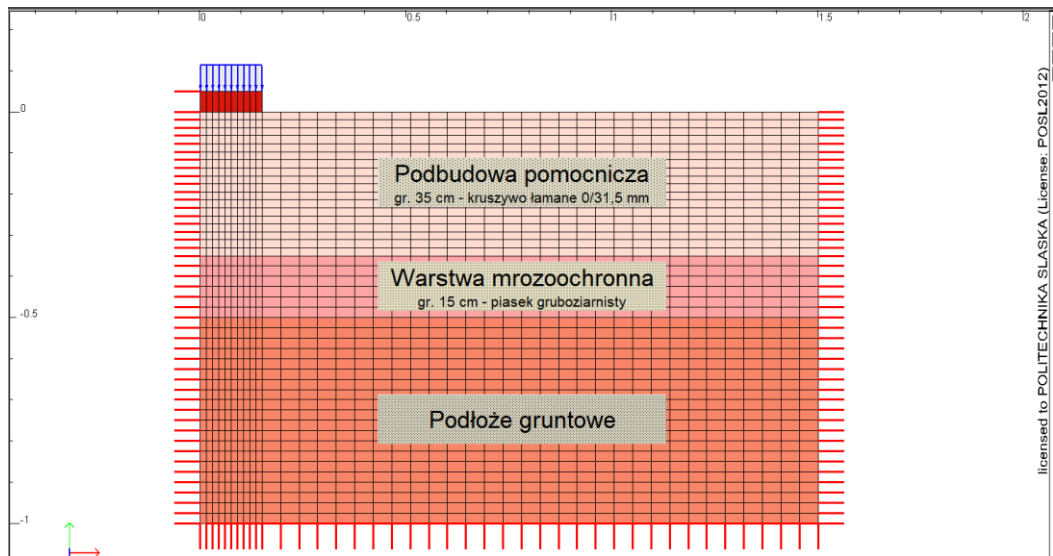
b)



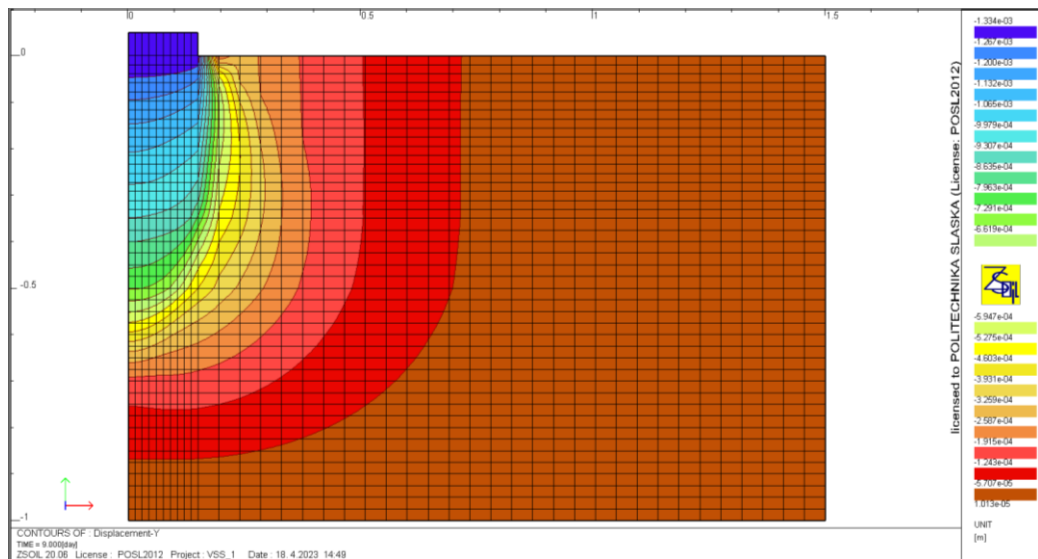
c)



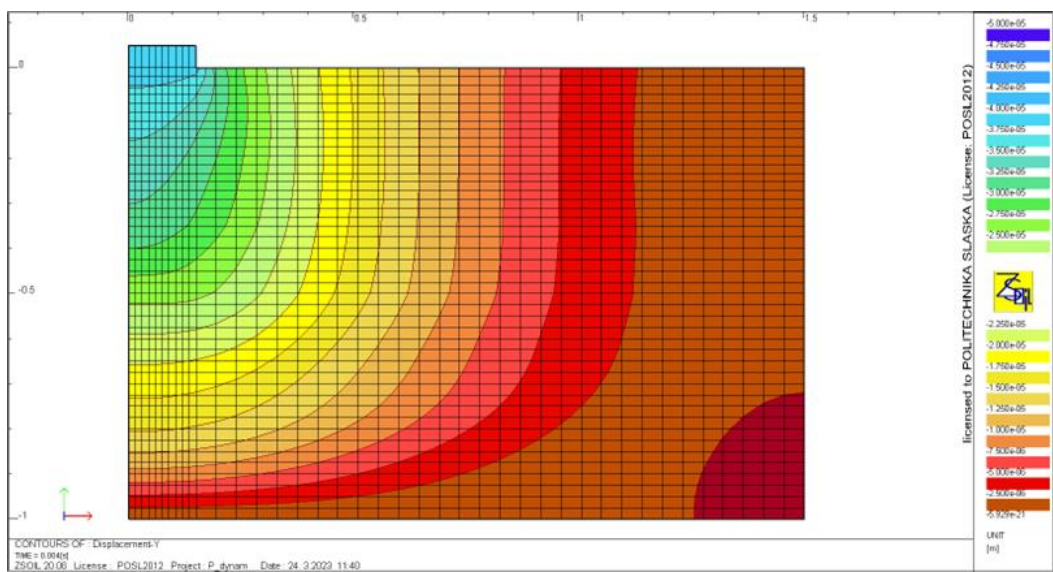
Rys.9.3 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 1 dla ruchu KR5 – KR7 a) liniowa linia trendu, b) logarytmiczna linia trendu, c) kwadratowa linia trendu



Rys.9.4 Kategoria ruchu KR5 – KR7 konstrukcja nr 1 – model (Z\_SOIL)



Rys.9.5 Kategoria ruchu KR5 – KR7 konstrukcja nr 1 – osiadania podczas badania VSS (Z\_SOIL)



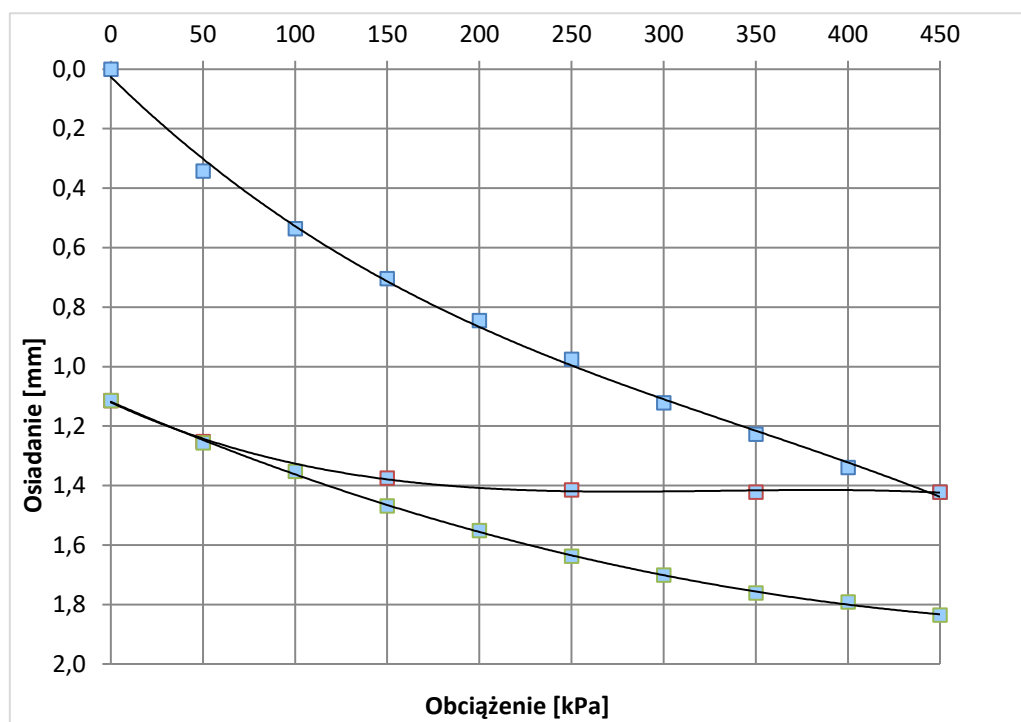
Rys.9.6 Kategoria ruchu KR5 – KR7 konstrukcja nr 1 – osiadania podczas badania płytą dynamiczną (Z\_SOIL)



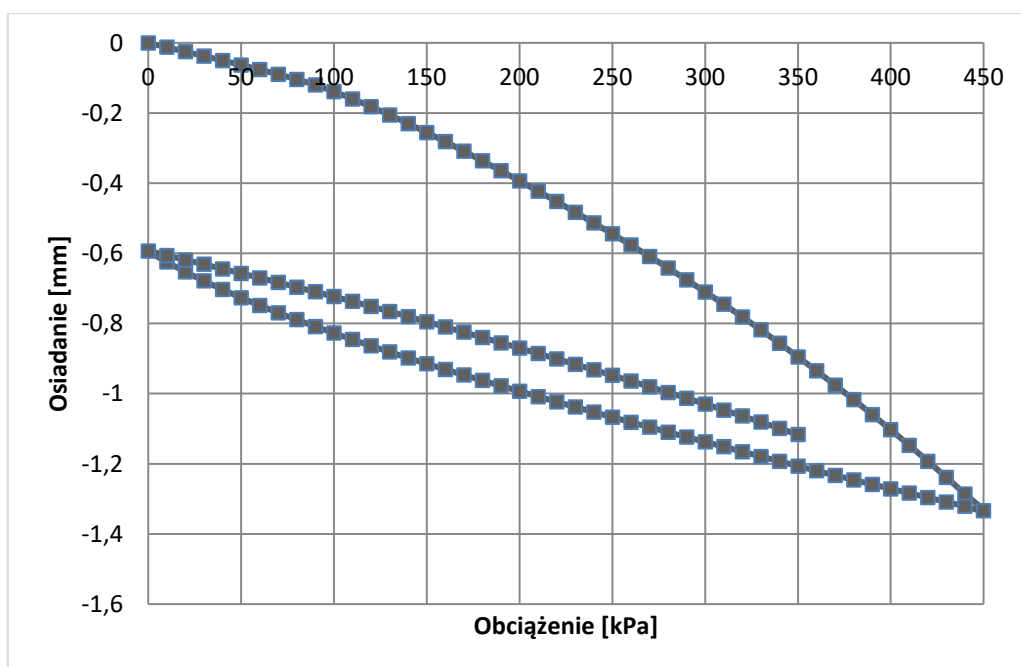
Dla podbudowy podatnej dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,55 \cdot E_{VD} + 13,71 \quad (9.2)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, minimalna wartość dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD} = 65,3$  MPa.



Rys.9.7 Kategoria ruchu KR5 – KR7 konstrukcja nr 1 – osiadanie wg badania VSS



Rys.9.8 Kategoria ruchu KR5 – KR7 konstrukcja nr 1 – osiadanie wg programu Z\_SOIL

## PROTOKÓŁ Z BADAŃ

Oznaczanie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą (VSS)

Zleceniodawca : Skanska S.A.

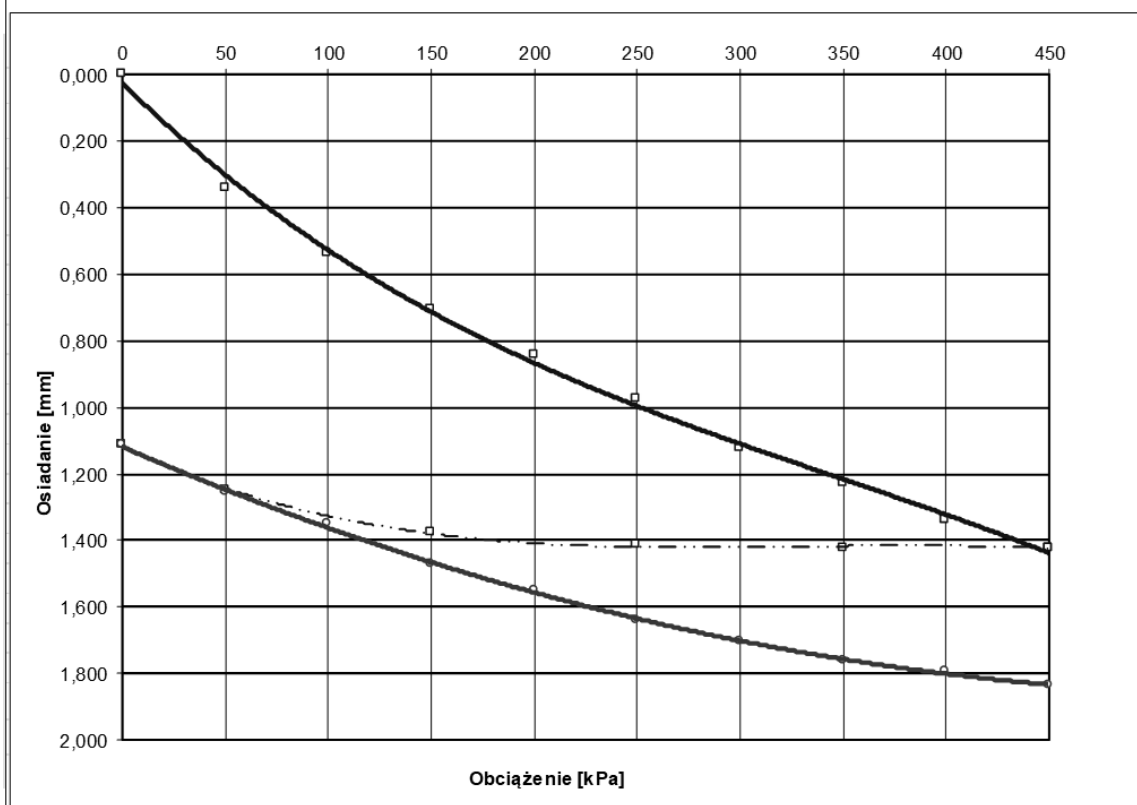
Punkt : km 0+725 - strona oś

warstwa podbudowy pomocniczej z kruszywa łamanego - mieszanka 0/31,5 GZD Siewierz

Data badania : 12.05.2015

Moduł pierwotny i wtórny - płyta  $\phi$  30 cm.

[kPa]	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Obciążenie I	0,000	0,343	0,537	0,704	0,845	0,976	1,122	1,228	1,339	1,422
Odciążenie I	1,115	1,252		1,375		1,415		1,422		1,422
Obciążenie II	1,115	1,257	1,352	1,469	1,552	1,638	1,701	1,762	1,792	1,836



Końcowe obciążenie doprowadza się do **0,45 MPa**

$$E_{1,2} = D \cdot (\Delta p / \Delta S) \cdot 0,75 \quad D - \text{średnica płyty, } 30 \text{ cm}$$

$E_{1,2}$  - moduł odkształcenia (pierwotny, wtórny)

$\Delta p$  - przyrost obciążenia jednostkowego w zakresie od **0,25 do 0,35 MPa**

$\Delta S$  - przyrost odkształcenia odpowiadający przyjętemu zakresowi obciążeń jednostkowych, w mm

Moduł pierwotny :  $M_{E1} = 89 \text{ MPa}$

Moduł wtórny :  $M_{E2} = 181 \text{ MPa} \geq 120 \text{ MPa}$

Wskaźnik odkształcenia :

$$I_0 = 2,0 \leq 2,2$$

Rys. 9.9 Przykładowy protokół z badania VSS, Kategoria ruchu KR5 – KR7, konstrukcja nr 1

W programie Z\_SOIL został wykonany model oddziaływania płyty statycznej VSS (rys. 9.5) oraz lekkiej płyty dynamicznej (rys 9.6) na badane warstwy. Z analizy wyników, wynika, że oddziaływanie badania sięga ok. 50 cm włąb badanych warstw. Został również wykonany model oddziaływania lekkiej płyty dynamicznej na badaną warstwę; oddziaływanie płyty dynamicznej sięga również do głębokości ok 50 cm. Porównując osiadanie płyty statycznej z programu Z\_SOIL (rys. 9.8), z wynikami osiadań z płyty statycznej (rys. 9.7) można stwierdzić, że na początku następuje dogęszczenie badanej warstwy. Dla pierwotnego obciążenia wyniki osiadania uzyskane w programie Z\_SOIL, jak i podczas badania VSS, miały zbliżone wartości. Natomiast wartości odprężenia warstwy w badaniu VSS były mniejsze niż dla analizy numerycznej. Wpływ na te rozbieżności mógł mieć brak całkowitego odprężenia konstrukcji podczas wykonywania badania w terenie. Okres 5 minut, który jest wymagany podczas odprężenia warstwy jest zbyt krótki dla całkowitego jej odprężenia. Dla wtórnego obciążenia wyniki osiadania uzyskane w analizie, jak i podczas badania VSS miały zbliżone wartości.

Tablica 9.3 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	44
Pomiar największy	$x_{\max} =$	296,1
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	138,9
Rozstęp	$R =$	157,2
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	207,7
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	2,5
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	16,8
Współczynnik zmienności	$v =$	8,1
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=43$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,017
Przedział ufności Neymana $P\{202,563 < m < 212,806\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	44
Pomiar największy	$x_{\max} =$	99,2
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	54,1
Rozstęp	$R =$	45,1
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	76,2
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	0,9
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	6,1
Współczynnik zmienności	$v =$	8,0
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=43$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,017
Przedział ufności Neymana $P\{74,299 < m < 78,003\} = 0,95$		

Na rys. 9.9 przedstawiono przykładowy protokół z badania warstwy podbudowy dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

W tablicy 9.3 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 1 dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

## 9.2 Konstrukcja nr 2

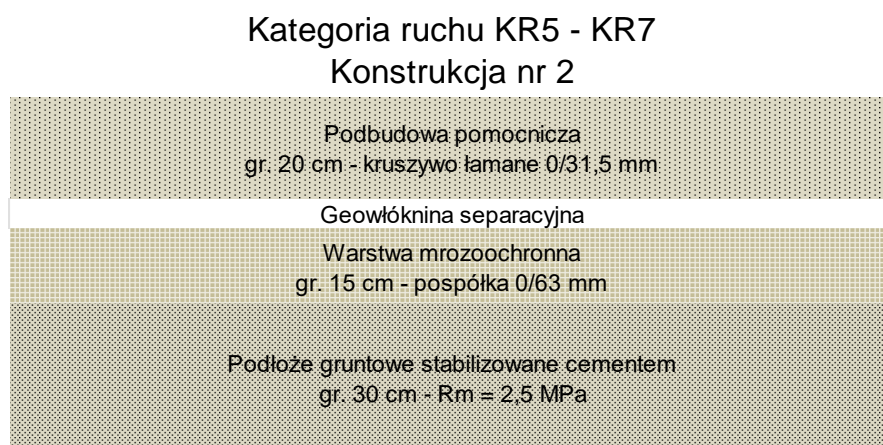
Dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 (rys. 9.10) wykonano 38 porównań (tablica 9.4). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 35 cm. Podłoże gruntowe pod konstrukcję zostało wykonane jako warstwa stabilizowana cementem. Jeden wynik nie spełnił wymagań dla wartości wtórnego modułu odkształcenia i wyniósł  $E_2 = 174$  MPa. Dwa wyniki nie spełniły wymagania dla wskaźnika odkształcenia; największa wartość  $I_0 = 2,3$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 9.11.

Wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,56$  jest wartością niezadowalającą. Wynika z tego, że na warstwie konstrukcji półsztywnej, jaką jest konstrukcja nr 2, uzyskanie zadowalającego i możliwego do wykorzystania w terenie wzoru pozwalającego na uzyskania informacji czy badana warstwa jest wykonana poprawnie jest niemożliwe.

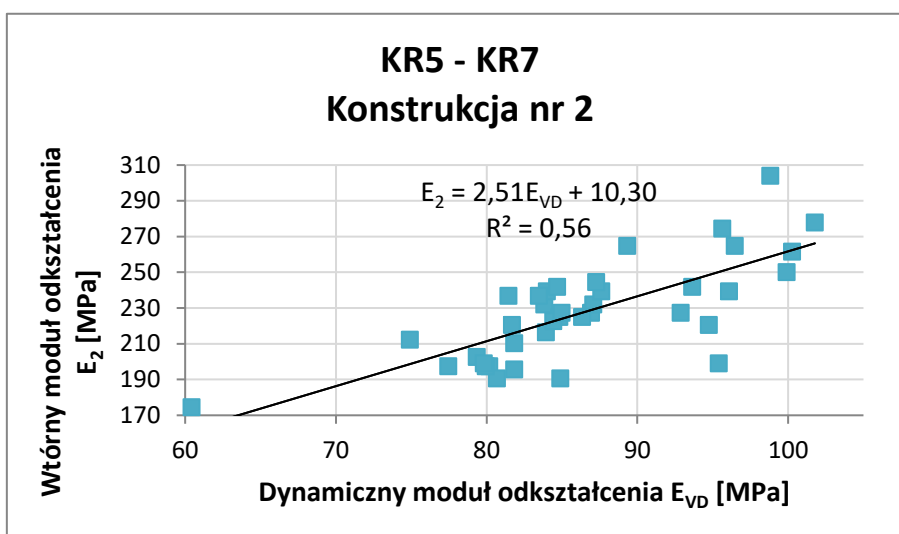
Dla podbudowy półsztywnej dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,51 \cdot E_{VD} + 10,30 \quad (9.3)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, minimalna wartość  $E_{VD} = 67,7$  MPa. Wartość  $E_{VD}$  jest jedynie wartością poglądową, niezalecaną do stosowania z powodu niezadowalającego dopasowania wyników badań.



Rys.9.10 Przekrój konstrukcji nr 2 – kategoria ruchu KR5 – KR7



Rys.9.11 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 2 dla ruchu KR5 – KR7

Tablica. 9.4 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 2 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
E <sub>1</sub> [MPa]	E <sub>2</sub> [MPa]	l <sub>0</sub> E <sub>2</sub> /E <sub>1</sub>	E <sub>VD1</sub> [MPa]	E <sub>VD2</sub> [MPa]	E <sub>VD3</sub> [MPa]	E <sub>VD</sub> śr 0,0 [MPa]	x E <sub>2</sub> /E <sub>VD 0,0</sub>
115	232	2,0	79,6	88,4	83,5	83,8	2,77
110	197	1,8	75,4	79,8	85,3	80,2	2,46
114	221	1,9	80,3	83,6	81,1	81,7	2,70
113	216	1,9	83,6	85,1	83,0	83,9	2,58
108	174	1,6	62,1	60,3	58,9	60,4	2,89
113	239	2,1	84,6	81,1	86,3	84,0	2,85
133	265	2,0	92,5	91,0	84,6	89,3	2,96
136	274	2,0	90,2	97,5	99,1	95,6	2,87
116	242	2,1	86,5	83,6	83,9	84,7	2,86
112	237	2,1	82,1	88,2	80,1	83,5	2,84
120	227	1,9	89,3	85,6	86,0	86,9	2,61
110	191	1,7	80,1	78,9	83,1	80,7	2,36
108	210	2,0	83,0	82,5	80,0	81,8	2,57
107	225	2,1	84,5	85,0	85,0	84,8	2,65
100	197	2,0	77,4	79,4	75,6	77,5	2,55
114	212	1,9	79,7	74,7	70,4	74,9	2,83
129	237	1,8	83,7	80,6	80,0	81,5	2,91
116	232	2,0	88,2	89,6	83,3	87,1	2,66
151	304	2,0	98,4	101,4	96,7	98,8	3,08
157	278	1,8	103,2	100,1	102,0	101,8	2,73
144	265	1,8	95,6	94,4	99,4	96,5	2,74
130	250	1,9	97,4	99,3	103,1	99,9	2,50
137	239	1,7	94,7	97,3	96,3	96,1	2,49
110	227	2,1	92,5	90,0	96,2	92,9	2,45
105	221	2,1	96,4	92,1	95,7	94,8	2,33
115	262	2,3	102,4	100,0	98,4	100,3	2,61
107	242	2,3	96,4	94,3	90,2	93,6	2,58
100	199	2,0	95,7	93,4	97,1	95,4	2,09
94	191	2,0	86,5	84,4	83,7	84,9	2,25
105	223	2,1	85,1	86,6	81,5	84,4	2,64
112	225	2,0	84,5	89,3	85,2	86,3	2,61
103	196	1,9	81,3	80,7	83,4	81,8	2,39
100	203	2,0	84,2	79,3	74,6	79,4	2,55
111	239	2,2	85,3	89,3	88,2	87,6	2,73
113	245	2,2	90,2	86,5	85,0	87,3	2,80
110	227	2,1	84,5	86,3	84,2	85,0	2,67
105	197	1,9	79,3	84,5	76,0	79,9	2,47
107	199	1,9	79,4	76,8	83,2	79,8	2,49

Tablica 9.5 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów $n =$	38	1
Pomiar największy $x_{\max} =$	304,1	MPa
Pomiar najmniejszy $x_{\min} =$	174,4	MPa
Rozstęp $R =$	129,7	MPa
Średnia arytmetyczna $\bar{x} =$	227,9	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej $s_{\bar{x}} =$	3,7	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru $s =$	22,6	MPa
Współczynnik zmienności $v =$	9,9	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=37$ i $P=95\%$ $t_{\alpha s} =$	2,026	1
Przedział ufności Neymana $P\{220,470 < m < 235,346\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

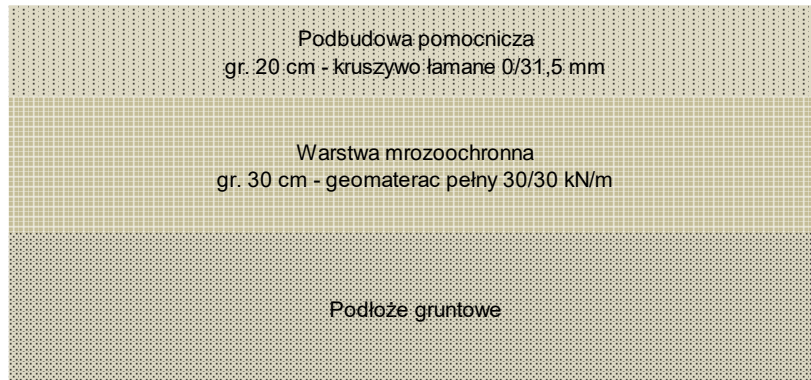
Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów $n =$	38	1
Pomiar największy $x_{\max} =$	101,8	MPa
Pomiar najmniejszy $x_{\min} =$	60,4	MPa
Rozstęp $R =$	41,4	MPa
Średnia arytmetyczna $\bar{x} =$	86,5	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej $s_{\bar{x}} =$	0,7	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru $s =$	4,1	MPa
Współczynnik zmienności $v =$	4,8	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=37$ i $P=95\%$ $t_{\alpha s} =$	2,026	1
Przedział ufności Neymana $P\{85,196 < m < 87,902\} = 0,95$		

W tablicy 9.5 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 2 dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

### 9.3 Konstrukcja nr 3

Dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 (rys. 9.12) zostało wykonanych 10 porównań (tablica 9.6). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 50 cm. Jeden wynik nie spełnił wymagań dla wartości wtórnego modułu odkształcenia i wyniósł  $E_2 = 139$  MPa. Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys. 9.13.

Kategoria ruchu KR5 - KR7  
Konstrukcja nr 3



Rys.9.12 Przekrój konstrukcji nr 3 – kategoria ruchu KR5 – KR7

Tablica.9.6 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 3 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

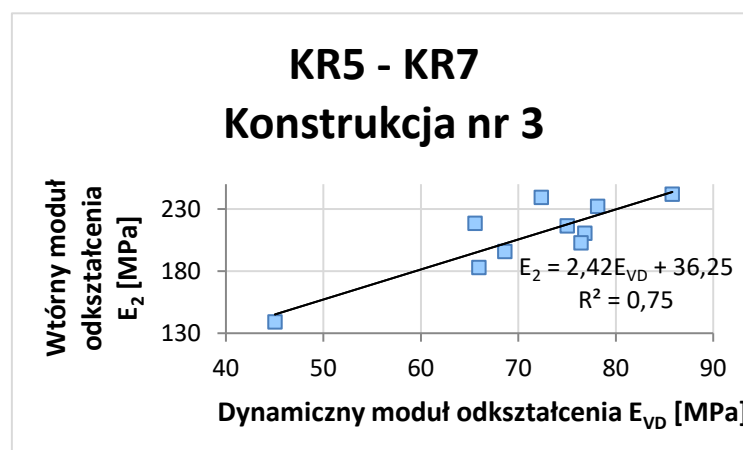
płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$l_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD\ sr\ 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD\ 0,0}$
100	196	1,9	71,2	64,5	70,1	68,6	2,85
136	239	1,8	70,6	71,2	75,3	72,4	3,31
114	218	1,9	67,3	61,0	68,4	65,6	3,33
105	210	2,0	78,4	75,2	77,0	76,8	2,74
135	242	1,8	84,5	83,6	89,3	85,8	2,82
102	216	2,1	80,1	69,5	75,5	75,0	2,88
97	203	2,1	63,6	84,5	81,2	76,4	2,65
124	232	1,9	79,4	76,7	78,3	78,1	2,97
105	183	1,7	64,5	59,9	73,4	66,0	2,77
69	139	2,0	38,9	51,2	45,0	45,0	3,08

Wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,75$  jest wartością zadowalającą.

Dla podbudowy podatnej konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,42 \cdot E_{VD} + 36,25 \quad (9.4)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, minimalna wartość dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD} = 59,5$  MPa.



Rys.9.13 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 3 dla ruchu KR5 – KR7

Tablica 9.7 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	n =	10	1
Pomiar największy	$x_{\max}$ =	241,9	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min}$ =	138,9	MPa
Rozstęp	R =	103,0	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$ =	207,8	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}}$ =	2,4	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	s =	7,5	MPa
Współczynnik zmienności	v =	3,6	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla s=n-1=9 i P=95%	$t_{\alpha s}$ =	2,262	1
Przedział ufności Neymana $P\{202,454 < m < 213,246\} = 0,95$			

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	n =	10	1
Pomiar największy	$x_{\max}$ =	85,8	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min}$ =	45,0	MPa
Rozstęp	R =	40,8	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$ =	71,0	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}}$ =	0,9	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	s =	2,7	MPa
Współczynnik zmienności	v =	3,8	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla s=n-1=9 i P=95%	$t_{\alpha s}$ =	2,262	1
Przedział ufności Neymana $P\{69,043 < m < 72,906\} = 0,95$			

W tablicy 9.7 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 3 dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

## 9.4 Konstrukcja nr 4

Dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 (rys. 9.14) zostało wykonanych 11 porównań (tablica 9.8). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 38 cm. Podłoże gruntowe pod konstrukcję zostało przygotowane jako warstwa stabilizowana cementem. Trzy wyniki nie spełniły wymagań dla wartości wskaźnika odkształcenia; największa wartość  $I_0 = 2,4$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 9.15.

Wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,63$  jest wartością zadowalającą.

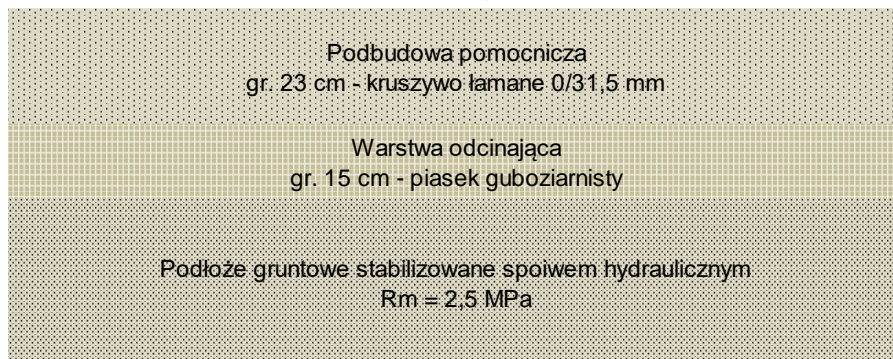
Dla podbudowy półsztywnej konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,17 \cdot E_{VD} + 63,25 \quad (9.5)$$



Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, minimalna wartość dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD} = 53,9$  MPa.

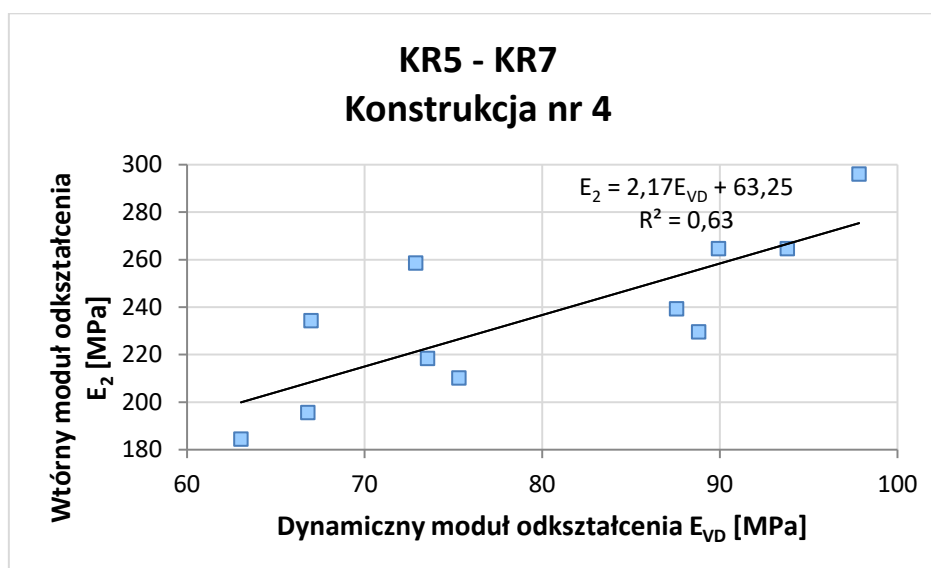
### Kategoria ruchu KR5 - KR7 Konstrukcja nr 4



Rys.9.14 Przekrój konstrukcji nr 4 – kategoria ruchu KR5 – KR7

Tablica. 9.8 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 4 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$l_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD}$ śr 0,0 [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD 0,0}$
115	230	2,0	86,8	89,5	90,1	88,8	2,59
115	239	2,1	89,1	85,7	88,0	87,6	2,73
102	210	2,1	78,4	73,4	74,2	75,3	2,79
111	265	2,4	89,6	96,7	95,1	93,8	2,82
93	184	2,0	65,4	62,5	61,2	63,0	2,93
114	234	2,1	68,9	67,4	64,6	67,0	3,50
148	259	1,7	74,7	70,5	73,5	72,9	3,55
82	196	2,4	65,3	71,8	63,3	66,8	2,93
129	296	2,3	96,7	102,3	94,5	97,8	3,03
167	265	1,6	90,2	94,0	85,6	89,9	2,94
122	218	1,8	76,7	73,8	70,2	73,5	2,97



Rys.9.15 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 4 dla ruchu KR5 – KR7

Tablica 9.9 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 11$	1
Pomiar największy	$x_{\max} = 296,1$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} = 184,4$	MPa
Rozstęp	$R = 111,7$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 236,0$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 3,2$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 10,7$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 4,6$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=10$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,228$	1
Przedział ufności Neymana $P\{228,803 < m < 243,236\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 11$	1
Pomiar największy	$x_{\max} = 97,8$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} = 63,0$	MPa
Rozstęp	$R = 34,8$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 79,7$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 1,0$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 3,2$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 4,0$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=10$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,228$	1
Przedział ufności Neymana $P\{77,562 < m < 81,806\} = 0,95$		

W tablicy 9.9 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 4 dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

## 9.5 Konstrukcja nr 5

Dla konstrukcji nr 5 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 (rys. 9.16) zostało wykonanych 25 porównań (tablica 9.10). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 55 cm. Dwa wyniki nie spełniły wymagań dla wartości wtórnego modułu odkształcenia; mniejsza wartość  $E_2 = 170$  MPa. Trzy wyniki nie spełniły wymagań dla wskaźnika odkształcenia i wyniosły  $I_0 = 2,3$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 9.17.

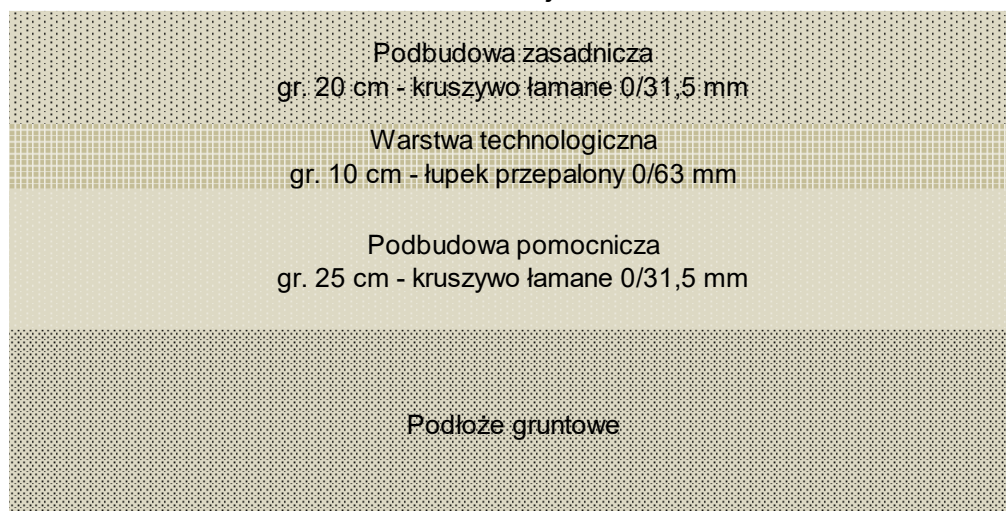
Współczynnik determinacji jest dobry i wynosi  $R^2 = 0,81$ .

Dla podbudowy półsztywnej konstrukcji nr 5 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,08 \cdot E_{VD} + 59,47 \quad (9.6)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, minimalna wartość dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD} = 58,0$  MPa.

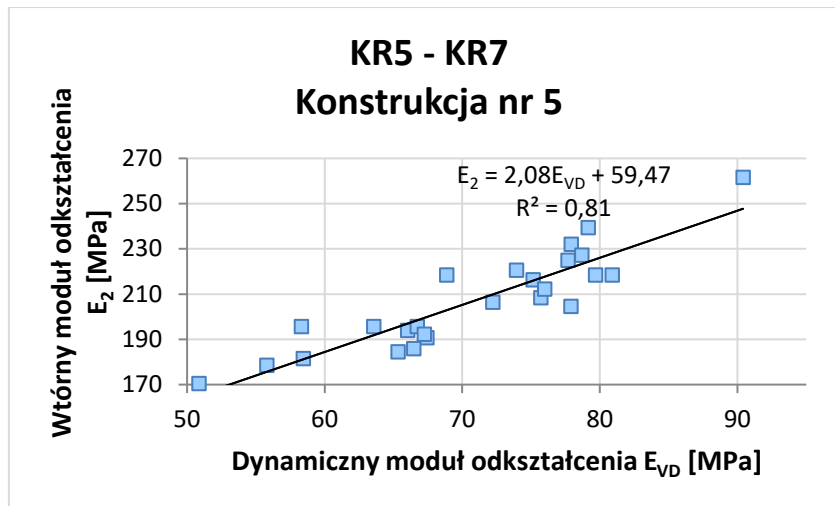
### Kategoria ruchu KR5 - KR7 Konstrukcja nr 5



Rys.9.16 Przekrój konstrukcji nr 5 – kategoria ruchu KR5 – KR7

Tablica. 9.10 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 5 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$l_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD \text{ śr } 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD 0,0}$
111	218	2,0	78,4	80,1	84,3	80,9	2,70
92	205	2,2	75,5	71,9	86,3	77,9	2,63
86	194	2,3	68,3	64,8	65,0	66,0	2,94
82	181	2,2	58,3	60,2	56,8	58,4	3,10
95	196	2,1	60,7	60,0	54,2	58,3	3,36
117	216	1,9	74,0	72,6	78,9	75,1	2,88
113	208	1,9	73,4	75,4	78,3	75,7	2,75
118	221	1,9	77,0	73,6	71,3	74,0	2,98
100	225	2,3	79,5	76,6	77,0	77,7	2,90
123	232	1,9	73,4	80,5	79,9	77,9	2,98
105	191	1,8	67,4	65,5	69,3	67,4	2,83
101	218	2,2	70,0	71,2	65,4	68,9	3,17
98	206	2,1	68,5	69,8	78,4	72,2	2,86
76	170	2,3	52,4	50,0	50,2	50,9	3,35
90	184	2,0	67,4	66,0	62,6	65,3	2,82
82	179	2,2	50,4	49,7	67,3	55,8	3,20
98	196	2,0	58,9	68,4	63,4	63,6	3,08
113	218	1,9	82,3	81,0	75,8	79,7	2,74
134	262	2,0	87,5	89,4	94,3	90,4	2,89
101	196	1,9	69,4	64,5	66,3	66,7	2,93
95	192	2,0	64,8	70,2	66,7	67,2	2,86
93	186	2,0	68,9	67,4	63,1	66,5	2,80
125	239	1,9	79,5	76,4	81,5	79,2	3,02
113	227	2,0	80,6	78,6	76,9	78,7	2,89
110	212	1,9	73,4	75,5	79,0	76,0	2,79



Rys.9.17 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 5 dla ruchu KR5 – KR7

Tablica 9.11 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 5 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 25$	1
Pomiar największy	$x_{max} = 261,6$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{min} = 170,5$	MPa
Rozstęp	$R = 91,1$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 207,0$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 1,7$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 8,5$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 4,1$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=24$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,064$	1
Przedział ufności Neymana $P\{203,426 < m < 210,480\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

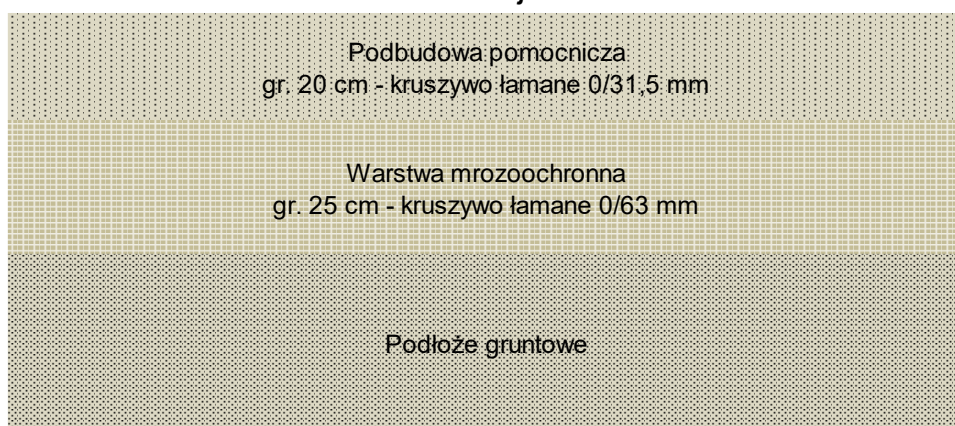
Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 25$	1
Pomiar największy	$x_{max} = 90,4$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{min} = 50,9$	MPa
Rozstęp	$R = 39,5$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 70,8$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 0,7$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 3,7$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 5,2$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=24$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,064$	1
Przedział ufności Neymana $P\{69,301 < m < 72,347\} = 0,95$		

W tablicy 9.11 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 5 dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

## 9.6 Konstrukcja nr 6

Dla konstrukcji nr 6 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 (rys. 9.18) zostało wykonanych 14 porównań (tablica 9.12). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 45 cm. Trzy wyniki nie spełniły wymagań dla wartości wtórnego modułu odkształcenia; najmniejsza wartość  $E_2 = 168$  MPa. Dwa wyniki nie spełniły wymagań dla wskaźnika odkształcenia i wyniosły  $I_0 = 2,3$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 9.19.

### Kategoria ruchu KR5 - KR7 Konstrukcja nr 6



Rys.9.18 Przekrój konstrukcji nr 6 – kategoria ruchu KR5 – KR7

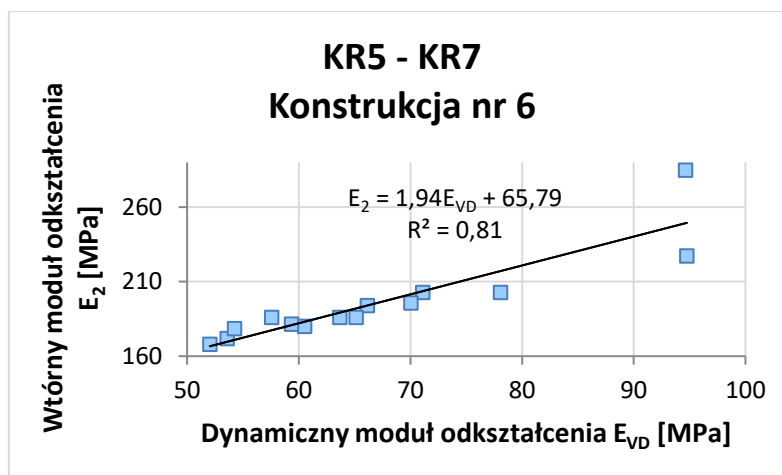
Tablica. 9.12 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 6 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$I_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD \text{ śr } 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD 0,0}$
75	172	2,3	49,4	56,3	55,0	53,6	3,21
88	194	2,2	71,3	58,9	68,3	66,1	2,93
96	203	2,1	79,2	74,7	80,3	78,1	2,60
106	227	2,1	97,3	94,5	92,5	94,8	2,40
136	285	2,1	96,4	99,0	88,5	94,6	3,01
93	203	2,2	70,3	73,6	69,4	71,1	2,85
74	168	2,3	53,2	52,7	50,2	52,0	3,23
82	180	2,2	59,2	62,4	60,0	60,5	2,97
95	186	2,0	63,7	60,2	71,5	65,1	2,85
93	196	2,1	70,7	69,4	70,0	70,0	2,79
97	186	1,9	64,5	62,9	63,7	63,7	2,92
93	181	1,9	56,8	59,3	62,0	59,4	3,06
80	179	2,2	53,6	50,7	58,4	54,2	3,29
94	186	2,0	58,4	55,0	59,4	57,6	3,23

Współczynnik determinacji jest dobry i wynosi  $R^2 = 0,81$ .

Dla podbudowy półsztywnej konstrukcji nr 6 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano zależność:

$$E_2 = 1,94 \cdot E_{VD} + 65,79 \quad (9.7)$$



Rys.9.19 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 6 dla ruchu KR5 – KR7

Tablica 9.13 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 6 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 14$	1
Pomiar największy	$x_{max} = 284,8$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{min} = 167,9$	MPa
Rozstęp	$R = 116,9$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 196,0$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 2,3$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 8,8$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 4,5$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=13$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,160$	1
Przedział ufności Neymana $P\{190,994 < m < 201,098\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n = 14$	1
Pomiar największy	$x_{max} = 94,8$	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{min} = 52,0$	MPa
Rozstęp	$R = 42,8$	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = 67,2$	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} = 1,1$	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s = 4,1$	MPa
Współczynnik zmienności	$v = 6,0$	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=13$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} = 2,160$	1
Przedział ufności Neymana $P\{64,863 < m < 69,546\} = 0,95$		

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, minimalna wartość dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD} = 58,9$  MPa.

W tablicy 9.13 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 6 dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

## 9.7 Konstrukcja nr 7

Dla konstrukcji nr 7 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 (rys. 9.20) zostało wykonanych 8 porównań (tablica 9.14). Miąższość badanej konstrukcji wynosiła 35 cm. Podłoże gruntowe pod konstrukcję zostało wykonane jako warstwa stabilizowana spoiwem hydraulicznym. Trzy wyniki nie spełniły wymagań dla wartości wskaźnika odkształcenia; największa wartość  $I_0 = 2,4$ . Wyniki zostały zebrane i przedstawione na rys 9.21.

Współczynnik determinacji jest niezadowalający i wynosi  $R^2 = 0,42$ .

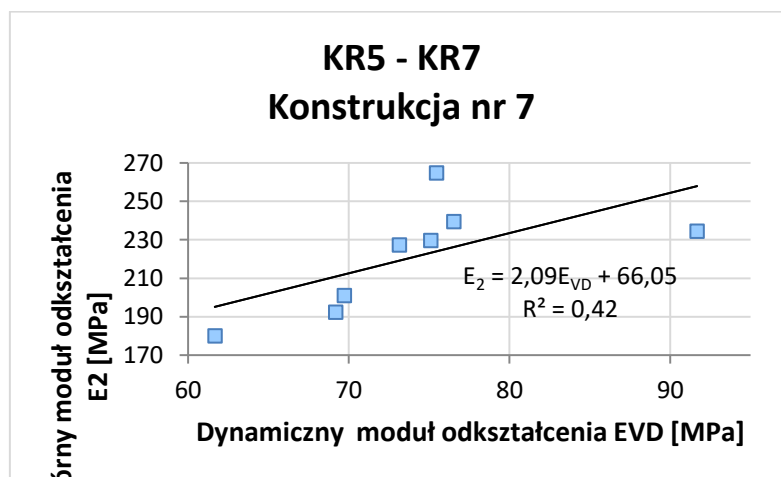


Rys.9.20 Przekrój konstrukcji nr 7 – kategoria ruchu KR5 – KR7

Dla podbudowy półsztywnej konstrukcji nr 7 dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,09 \cdot E_{VD} + 66,05 \quad (9.8)$$

Wzór ten nie powinien być stosowany ponieważ uzyskany współczynnik determinacji jest niezadowalający. Warstwa podłoża gruntowego stabilizowanego spoiwami hydraulicznymi, powoduje, że nie można porównać wartości wyników otrzymanych z badań płytą VSS i lekką płytą dynamiczną.



Rys.9.21 Zestawienie porównań dla konstrukcji nr 7 dla ruchu KR5 – KR7

Tablica. 9.14 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji drogowej nr 7 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				korelacja przelicznik
$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$l_0$ $E_2/E_1$	$E_{VD1}$ [MPa]	$E_{VD2}$ [MPa]	$E_{VD3}$ [MPa]	$E_{VD \text{ sr } 0,0}$ [MPa]	$x$ $E_2/E_{VD 0,0}$
86	192	2,2	71,2	69,4	67,0	69,2	2,78
95	227	2,4	68,3	76,7	74,4	73,1	3,11
122	239	2,0	79,4	74,0	76,2	76,5	3,13
130	234	1,8	89,4	95,6	90,0	91,7	2,56
89	201	2,3	70,4	70,4	68,4	69,7	2,88
115	265	2,3	76,4	77,0	77,0	73,0	3,51
107	230	2,1	74,0	72,9	78,4	75,1	3,06
105	180	1,7	59,4	64,6	61,0	61,7	2,92

W tablicy 9.15 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji nr 7 dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

Tablica 9.15 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji nr 7 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	8
Pomiar największy	$x_{\max} =$	264,7
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	180,0
Rozstęp	$R =$	84,7
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	221,1
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	2,1
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	6,0
Współczynnik zmienności	$v =$	2,7
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=7$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,365
Przedział ufności Neymana $P\{216,007 < m < 226,119\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	8
Pomiar największy	$x_{\max} =$	91,7
Pomiar najmniejszy	$x_{\min} =$	61,7
Rozstęp	$R =$	30,0
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	74,1
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	0,7
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	1,9
Współczynnik zmienności	$v =$	2,5
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=7$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,365
Przedział ufności Neymana $P\{72,503 < m < 75,617\} = 0,95$		

## 9.8 Konstrukcja półsztywna

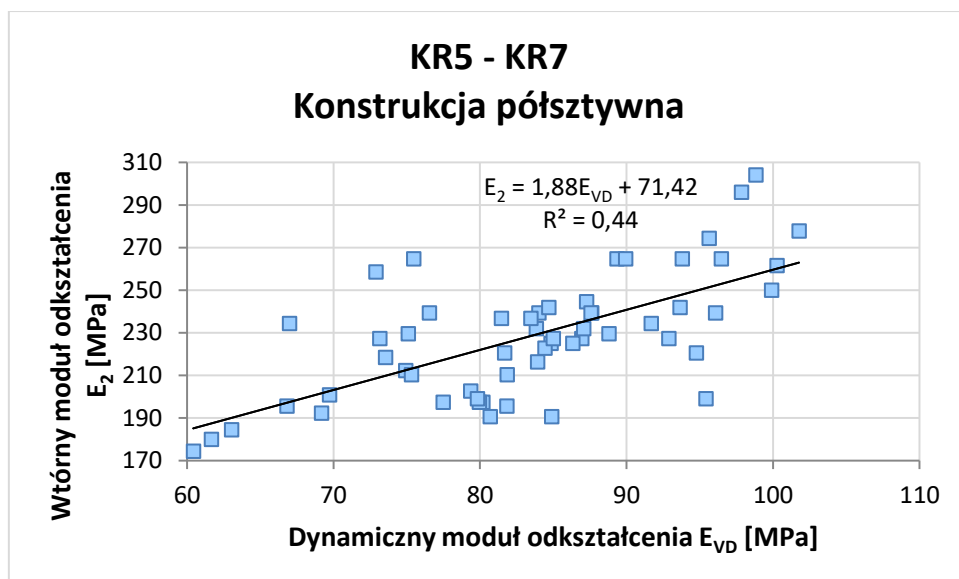
Na rys. 9.22 zostały przedstawione zestawienia badań dla kategorii ruchu KR5 – KR7 dla konstrukcji półsztywnej (konstrukcje nr 2, 4, 7), tzn. takiej, w której dla jednej z warstw zastosowano stabilizację spoiwem hydraulicznym o wartości  $R_m = 2,5$



MPa. Konstrukcje te są przedstawione na rys. 9.10 – konstrukcja nr 2, rys. 9.14 – konstrukcja nr 4 i rys. 9.20 – konstrukcja nr 7. Zestawiono 57 wyników (tablica 9.16). Uzyskany współczynnik determinacji jest niezadowalający i wynosi  $R^2 = 0,44$ . Wynika z tego, że nie jest możliwe porównanie wyników dla warstw pólstywnych.

Tablica. 9.16 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji pólstywnych dla kategorii ruchu KR5 – KR7

płyta statyczna			lekka płyta dynamiczna				przelicznik
E <sub>1</sub> [Mpa]	E <sub>2</sub> [Mpa]	l <sub>0</sub> E <sub>2</sub> /E <sub>1</sub>	E <sub>VD1</sub> [Mpa]	E <sub>VD2</sub> [Mpa]	E <sub>VD3</sub> [Mpa]	E <sub>VD sr 0,0</sub> [Mpa]	x E <sub>2</sub> /E <sub>VD 0,0</sub>
115	232	2,0	79,6	88,4	83,5	83,8	2,77
110	197	1,8	75,4	79,8	85,3	80,2	2,46
114	221	1,9	80,3	83,6	81,1	81,7	2,70
113	216	1,9	83,6	85,1	83,0	83,9	2,58
108	174	1,6	62,1	60,3	58,9	60,4	2,89
113	239	2,1	84,6	81,1	86,3	84,0	2,85
133	265	2,0	92,5	91,0	84,6	89,3	2,96
136	274	2,0	90,2	97,5	99,1	95,6	2,87
116	242	2,1	86,5	83,6	83,9	84,7	2,86
112	237	2,1	82,1	88,2	80,1	83,5	2,84
120	227	1,9	89,3	85,6	86,0	86,9	2,61
110	191	1,7	80,1	78,9	83,1	80,7	2,36
108	210	2,0	83,0	82,5	80,0	81,8	2,57
107	225	2,1	84,5	85,0	85,0	84,8	2,65
100	197	2,0	77,4	79,4	75,6	77,5	2,55
114	212	1,9	79,7	74,7	70,4	74,9	2,83
129	237	1,8	83,7	80,6	80,0	81,5	2,91
116	232	2,0	88,2	89,6	83,3	87,1	2,66
151	304	2,0	98,4	101,4	96,7	98,8	3,08
157	278	1,8	103,2	100,1	102,0	101,8	2,73
144	265	1,8	95,6	94,4	99,4	96,5	2,74
130	250	1,9	97,4	99,3	103,1	99,9	2,50
137	239	1,7	94,7	97,3	96,3	96,1	2,49
110	227	2,1	92,5	90,0	96,2	92,9	2,45
105	221	2,1	96,4	92,1	95,7	94,8	2,33
115	262	2,3	102,4	100,0	98,4	100,3	2,61
107	242	2,3	96,4	94,3	90,2	93,6	2,58
100	199	2,0	95,7	93,4	97,1	95,4	2,09
94	191	2,0	86,5	84,4	83,7	84,9	2,25
105	223	2,1	85,1	86,6	81,5	84,4	2,64
112	225	2,0	84,5	89,3	85,2	86,3	2,61
103	196	1,9	81,3	80,7	83,4	81,8	2,39
100	203	2,0	84,2	79,3	74,6	79,4	2,55
111	239	2,2	85,3	89,3	88,2	87,6	2,73
113	245	2,2	90,2	86,5	85,0	87,3	2,80
110	227	2,1	84,5	86,3	84,2	85,0	2,67
105	197	1,9	79,3	84,5	76,0	79,9	2,47
107	199	1,9	79,4	76,8	83,2	79,8	2,49
115	230	2,0	86,8	89,5	90,1	88,8	2,59
115	239	2,1	89,1	85,7	88,0	87,6	2,73
102	210	2,1	78,4	73,4	74,2	75,3	2,79
111	265	2,4	89,6	96,7	95,1	93,8	2,82
93	184	2,0	65,4	62,5	61,2	63,0	2,93
114	234	2,1	68,9	67,4	64,6	67,0	3,50
148	259	1,7	74,7	70,5	73,5	72,9	3,55
82	196	2,4	65,3	71,8	63,3	66,8	2,93
129	296	2,3	96,7	102,3	94,5	97,8	3,03
167	265	1,6	90,2	94,0	85,6	89,9	2,94
122	218	1,8	76,7	73,8	70,2	73,5	2,97
86	192	2,2	71,2	69,4	67,0	69,2	2,78
95	227	2,4	68,3	76,7	74,4	73,1	3,11
122	239	2,0	79,4	74,0	76,2	76,5	3,13
130	234	1,8	89,4	95,6	90,0	91,7	2,56
89	201	2,3	70,4	70,4	68,4	69,7	2,88
115	265	2,3	76,4	77,0	73,0	75,5	3,51
107	230	2,1	74,0	72,9	78,4	75,1	3,06
105	180	1,7	59,4	64,6	61,0	61,7	2,92



Rys.9.22 Zestawienie porównań dla ruchu KR5 – KR7 dla konstrukcji półsztywnej (w jednej z warstw została zastosowana stabilizacja spoiwem hydraulicznym o  $R_m = 2,5$  MPa)

Tablica 9.17 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji półsztywnych nr 2, 4, 7 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	57
Pomiar największy	$x_{max} =$	304,1
Pomiar najmniejszy	$x_{min} =$	174,4
Rozstęp	$R =$	129,7
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	228,5
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	2,3
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	17,6
Współczynnik zmienności	$v =$	7,7
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=56$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,004
Przedział ufności Neymana $P\{223,837 < m < 233,188\} = 0,95$		

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość	Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	$n =$	57
Pomiar największy	$x_{max} =$	101,8
Pomiar najmniejszy	$x_{min} =$	60,4
Rozstęp	$R =$	41,4
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} =$	83,5
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}} =$	0,8
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	$s =$	6,2
Współczynnik zmienności	$v =$	7,4
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla $s=n-1=56$ i $P=95\%$	$t_{\alpha s} =$	2,004
Przedział ufności Neymana $P\{81,822 < m < 85,120\} = 0,95$		

W tabelicy 9.17 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji półsztywnych dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

## 9.9 Konstrukcja podatna

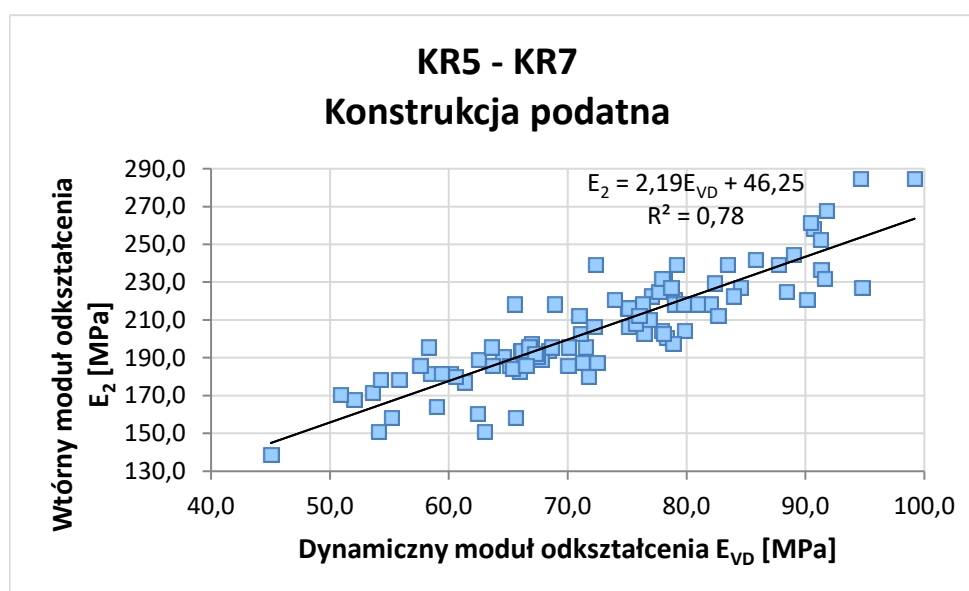
Na rys. 9.23 zostały przedstawione zestawienia badań dla kategorii ruchu KR5 – KR7 dla konstrukcji podatnej (konstrukcje nr 1, 3, 5, 6). Konstrukcje te są przedstawione na rys. 9.2 – konstrukcja nr 1, rys. 9.12 – konstrukcja nr 3, rys. 9.16 – konstrukcja nr 5 i rys. 9.18 – konstrukcja nr 6. W tabelicy 9.19 zestawiono 93 porównania wyników badań dla konstrukcji podatnej.

Uzyskany współczynnik determinacji jest zadowalający i wynosi  $R^2 = 0,78$ .

Dla podbudowy podatnej dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano zależność:

$$E_2 = 2,19 \cdot E_{VD} + 46,25 \quad (9.9)$$

Dla uzyskania wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2 = 180$  MPa, minimalna wartość dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD} = 61,1$  MPa.



Rys.9.23 Zestawienie porównań dla ruchu KR5 – KR7 dla konstrukcji podatnej

W tabelicy 9.18 podano średnie wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  oraz dynamicznego modułu  $E_{VD}$ , czyli estymaty wartości oczekiwanych jednowymiarowych zmiennych losowych (parametrów  $E_2$  i  $E_{VD}$ ) dla konstrukcji podatnych dla kategorii ruchu KR5 – KR7.

Tablica. 9.19 Zestawienie wyników badań modułów odkształcenia za pomocą płyty statycznej VSS i lekkiej płyty dynamicznej dla konstrukcji podatnej dla kategorii ruchu KR5 – KR7

płyta statyczna				lekką płytą dynamiczną				przelicznik	Optymalna wilgotność kruszywa z warstwy 5,5 - 6,4 %			
E <sub>1</sub> [MPa]	E <sub>2</sub> [MPa]	l <sub>0</sub> E <sub>2</sub> /E <sub>1</sub>	KR1 - KR2 l <sub>0</sub>	E <sub>VD1</sub> [MPa]	E <sub>VD2</sub> [MPa]	E <sub>VD3</sub> [MPa]	E <sub>VD s r 0,0</sub> [MPa]	x E <sub>2</sub> /E <sub>VD 0,0</sub>	Wilgotność naturalna w miejscu wykonywania badania			
									dla E <sub>VD1</sub> w <sub>n1</sub> [%]	dla E <sub>VD2</sub> w <sub>n2</sub> [%]	dla E <sub>VD3</sub> w <sub>n3</sub> [%]	dla E <sub>2</sub> w <sub>n4</sub> [%]
89	181	2,0	≤ 2,2	57,3	62,7	60,3	60,1	3,02	5,6	5,5	5,6	5,6
105	191	1,8	≤ 2,2	64,3	67,8	61,5	64,5	2,95	5,0	5,0	4,8	4,9
114	225	2,0	≤ 2,2	88,4	74,7	72,4	78,5	2,87	5,3	5,4	5,4	5,5
112	212	1,9	≤ 2,2	73,4	70,1	69,3	70,9	2,99	5,0	5,1	5,0	5,0
113	218	1,9	≤ 2,2	79,4	84,1	82,6	82,0	2,66	5,9	5,7	5,6	5,3
126	259	2,1	≤ 2,2	89,9	94,3	87,8	90,6	2,85	5,2	5,3	5,2	5,0
115	223	1,9	≤ 2,2	78,3	72,7	80,2	77,1	2,89	5,9	5,9	5,7	5,7
107	189	1,8	≤ 2,2	63,5	60,1	63,8	62,5	3,03	6,1	6,1	6,2	6,0
106	177	1,7	≤ 2,2	64,7	59,3	60,0	61,3	2,89	6,5	6,5	6,5	6,4
103	188	1,8	≤ 2,2	73,6	70,1	70,0	71,2	2,63	5,9	6,2	6,0	6,1
106	201	1,9	≤ 2,2	85,6	74,1	75,3	78,3	2,56	5,4	5,6	5,6	5,8
112	206	1,8	≤ 2,2	78,4	69,8	77,2	75,1	2,75	5,0	5,1	5,5	5,0
113	221	2,0	≤ 2,2	81,3	75,7	80,0	79,0	2,79	4,7	4,8	4,9	4,9
121	239	2,0	≤ 2,2	86,9	80,4	83,1	83,5	2,87	6,1	6,0	6,0	6,0
104	212	2,0	≤ 2,2	80,1	78,4	89,4	82,6	2,57	5,7	5,7	5,7	5,6
102	205	2,0	≤ 2,2	78,4	75,7	85,4	79,8	2,56	5,7	5,7	5,7	5,7
91	180	2,0	≤ 2,2	73,4	78,5	63,5	71,8	2,51	5,5	5,5	5,3	5,4
100	194	1,9	≤ 2,2	70,0	70,4	64,7	68,4	2,84	5,6	5,3	5,4	5,6
119	227	1,9	≤ 2,2	76,8	87,5	89,3	84,5	2,69	4,7	4,8	4,7	4,6
111	218	2,0	≤ 2,2	81,0	80,3	75,6	79,0	2,77	5,0	5,0	5,0	4,9
115	230	2,0	≤ 2,2	81,5	80,3	85,3	82,4	2,79	4,6	4,5	4,7	4,6
97	186	1,9	≤ 2,2	69,4	70,3	70,3	70,0	2,66	6,2	6,3	6,3	6,3
103	196	1,9	≤ 2,2	75,1	69,3	70,1	71,5	2,74	6,1	6,1	6	6,1
113	218	1,9	≤ 2,2	79,4	75,4	74,0	76,3	2,86	5,2	5,4	5,2	5,2
107	223	2,1	≤ 2,2	80,2	87,4	84,3	84,0	2,65	4,8	4,7	4,7	4,8
95	188	2,0	≤ 2,2	73,2	73,0	71,2	72,5	2,59	6,5	6,4	6,5	6,7
93	197	2,1	≤ 2,2	75,3	80,2	81,1	78,8	2,50	6,3	6,4	6,3	6,3
71	158	2,2	≤ 2,2	53,4	55,7	56,3	55,1	2,87	8,5	8,2	8,5	8,3
79	164	2,1	≤ 2,2	58,3	60,2	58,3	58,9	2,79	8,1	8,0	8,2	8,1
69	151	2,2	≤ 2,2	55,3	50,2	56,8	54,1	2,79	8,4	8,4	8,5	8,4
68	161	2,4	≤ 2,2	59,0	64,7	63,6	62,4	2,57	8,3	8,1	8,4	8,3
103	237	2,3	≤ 2,2	90,2	92,5	91,2	91,3	2,59	3,5	3,5	3,6	3,8
111	268	2,4	≤ 2,2	84,7	99,3	91,5	91,8	2,92	3,6	3,6	3,6	3,5
122	285	2,3	≤ 2,2	102,1	100,7	94,7	99,2	2,87	3,2	3,2	3,3	3,2
103	221	2,1	≤ 2,2	83,6	92,5	94,3	90,1	2,45	3,9	3,8	3,8	3,9
107	232	2,2	≤ 2,2	91,3	90,0	93,5	91,6	2,53	3,8	3,6	3,7	3,8
97	239	2,5	≤ 2,2	88,6	84,5	90,1	87,7	2,73	3,7	3,6	3,8	3,7
109	253	2,3	≤ 2,2	90,4	92,3	91,1	91,3	2,77	3,4	3,5	3,4	3,4
105	225	2,1	≤ 2,2	86,4	88,5	90,2	88,4	2,55	3,8	3,9	3,8	3,8
107	245	2,3	≤ 2,2	89,4	80,2	97,4	89,0	2,75	3,4	3,5	3,5	3,3
90	158	1,8	≤ 2,2	69,4	63,3	64,1	65,6	2,41	-	-	-	-
84	151	1,8	≤ 2,2	64,3	65,0	59,6	63,0	2,40	-	-	-	-
96	197	2,1	≤ 2,2	68,4	66,4	66,0	66,9	2,95	-	-	-	-
102	189	1,9	≤ 2,2	64,6	70,2	68,5	67,8	2,79	-	-	-	-
100	196	1,9	≤ 2,2	71,2	64,5	70,1	68,6	2,85	-	-	-	-
111	218	2,0	≤ 2,2	78,4	80,1	84,3	80,9	2,70	-	-	-	-
92	205	2,2	≤ 2,2	75,5	71,9	86,3	77,9	2,63	-	-	-	-
86	194	2,3	≤ 2,2	68,3	64,8	65,0	66,0	2,94	-	-	-	-
82	181	2,2	≤ 2,2	58,3	60,2	56,8	58,4	3,10	-	-	-	-
95	196	2,1	≤ 2,2	60,7	60,0	54,2	58,3	3,36	-	-	-	-
75	172	2,3	≤ 2,2	49,4	56,3	55,0	53,6	3,21	-	-	-	-
88	194	2,2	≤ 2,2	71,3	58,9	68,3	66,1	2,93	-	-	-	-
96	203	2,1	≤ 2,2	79,2	74,7	80,3	78,1	2,60	-	-	-	-
106	227	2,1	≤ 2,2	97,3	94,5	92,5	94,8	2,40	-	-	-	-
136	285	2,1	≤ 2,2	96,4	99,0	88,5	94,6	3,01	-	-	-	-
93	203	2,2	≤ 2,2	70,3	73,6	69,4	71,1	2,85	-	-	-	-
74	168	2,3	≤ 2,2	53,2	52,7	50,2	52,0	3,23	-	-	-	-
82	180	2,2	≤ 2,2	59,2	62,4	60,0	60,5	2,97	-	-	-	-
95	186	2,0	≤ 2,2	63,7	60,2	71,5	65,1	2,85	-	-	-	-
136	239	1,8	≤ 2,2	70,6	71,2	75,3	72,4	3,31	-	-	-	-
114	218	1,9	≤ 2,2	67,3	61,0	68,4	65,6	3,33	-	-	-	-
105	210	2,0	≤ 2,2	78,4	75,2	77,0	76,8	2,74	-	-	-	-
135	242	1,8	≤ 2,2	84,5	83,6	89,3	85,8	2,82	-	-	-	-
102	216	2,1	≤ 2,2	80,1	69,5	75,5	75,0	2,88	-	-	-	-
97	203	2,1	≤ 2,2	63,6	84,5	81,2	76,4	2,65	-	-	-	-
124	232	1,9	≤ 2,2	79,4	76,7	78,3	78,1	2,97	-	-	-	-
105	183	1,7	≤ 2,2	64,5	59,9	73,4	66,0	2,77	-	-	-	-
69	139	2,0	≤ 2,2	38,9	51,2	45,0	45,0	3,08	-	-	-	-
117	216	1,9	≤ 2,2	74,0	72,6	78,9	75,1	2,88	-	-	-	-
113	208	1,9	≤ 2,2	73,4	75,4	78,3	75,7	2,75	-	-	-	-
118	221	1,9	≤ 2,2	77,0	73,6	71,3	74,0	2,98	-	-	-	-
100	225	2,3	≤ 2,2	79,5	76,6	77,0	77,7	2,90	-	-	-	-
123	232	1,9	≤ 2,2	73,4	80,5	79,9	77,9	2,98	-	-	-	-
105	191	1,8	≤ 2,2	67,4	65,5	69,3	67,4	2,83	-	-	-	-
101	218	2,2	≤ 2,2	70,0	71,2	65,4	68,9	3,17	-	-	-	-

98	206	2,1	68,5	69,8	78,4	72,2	2,86	-	-	-	-
76	170	2,3	52,4	50,0	50,2	50,9	3,35	-	-	-	-
90	184	2,0	67,4	66,0	62,6	65,3	2,82	-	-	-	-
82	179	2,2	50,4	49,7	67,3	55,8	3,20	-	-	-	-
98	196	2,0	58,9	68,4	63,4	63,6	3,08	-	-	-	-
113	218	1,9	82,3	81,0	75,8	79,7	2,74	-	-	-	-
134	262	2,0	87,5	89,4	94,3	90,4	2,89	-	-	-	-
101	196	1,9	69,4	64,5	66,3	66,7	2,93	-	-	-	-
95	192	2,0	64,8	70,2	66,7	67,2	2,86	-	-	-	-
93	186	2,0	68,9	67,4	63,1	66,5	2,80	-	-	-	-
125	239	1,9	79,5	76,4	81,5	79,2	3,02	-	-	-	-
113	227	2,0	80,6	78,6	76,9	78,7	2,89	-	-	-	-
110	212	1,9	73,4	75,5	79,0	76,0	2,79	-	-	-	-
93	196	2,1	70,7	69,4	70,0	70,0	2,79	-	-	-	-
97	186	1,9	64,5	62,9	63,7	63,7	2,92	-	-	-	-
93	181	1,9	56,8	59,3	62,0	59,4	3,06	-	-	-	-
80	179	2,2	53,6	50,7	58,4	54,2	3,29	-	-	-	-
94	186	2,0	58,4	55,0	59,4	57,6	3,23	-	-	-	-

Tablica 9.18 Analiza statystyczna wyników modułów odkształcenia dla konstrukcji podatnych nr 1, 3, 5, 6 dla kategorii ruchu KR5 – KR7

a) wtórny moduł odkształcenia  $E_2$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	n =	93	1
Pomiar największy	$x_{\max}$ =	284,8	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min}$ =	138,9	MPa
Rozstęp	R =	145,9	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$ =	205,8	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}}$ =	2,3	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	s =	22,4	MPa
Współczynnik zmienności	v =	10,9	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla s=n-1=92 i P=95%	$t_{\alpha s}$ =	1,986	1
Przedział ufności Neymana $P\{201,145 < m < 210,362\} = 0,95$			

b) dynamiczny moduł odkształcenia  $E_{VD}$

Wielkość		Wartość	Jednostka
Liczba pomiarów	n =	93	1
Pomiar największy	$x_{\max}$ =	99,2	MPa
Pomiar najmniejszy	$x_{\min}$ =	45,0	MPa
Rozstęp	R =	54,2	MPa
Średnia arytmetyczna	$\bar{x}$ =	72,8	MPa
Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej	$s_{\bar{x}}$ =	0,9	MPa
Odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru	s =	9,0	MPa
Współczynnik zmienności	v =	12,4	%
Wartość krytyczna zmiennej losowej rozkładu t-Studenta dla s=n-1=92 i P=95%	$t_{\alpha s}$ =	1,986	1
Przedział ufności Neymana $P\{70,955 < m < 74,676\} = 0,95$			

## 9.10 Podsumowanie

Współczynnik determinacji dla wszystkich 150 przykładów wyniósł  $R^2 = 0,70$  i jest zadowalający. Rozdzielając jednak konstrukcje drogowe na podatne (93 porównania)

i półsztywne (57 porównań), uzyskujemy dla podbudowy konstrukcji podatnej wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,78$ , a dla konstrukcji półsztywnej  $R^2 = 0,44$ , co jest wynikiem niezadowalającym. Wynika z tego, że nie należy wykonywać porównania wyników badań płytą statyczną i lekką płytą dynamiczną płytą na konstrukcjach drogowych, w których dla jednej warstwy zastosowano stabilizację. Nie należy również zestawiać wyników uzyskanych dla konstrukcji podatnych z wynikami uzyskanymi dla konstrukcji półsztywnych.

Współczynnik determinacji  $R^2$  w zależności od konstrukcji i grubości warstwy wynosi:

- gr. 50 cm (konstrukcja nr 1)  $R^2 = 0,85$  – konstrukcja podatna
- gr. 35 cm (konstrukcja nr 2)  $R^2 = 0,56$  – konstrukcja półsztywna
- gr. 50 cm (konstrukcja nr 3)  $R^2 = 0,75$  – konstrukcja podatna
- gr. 38 cm (konstrukcja nr 4)  $R^2 = 0,63$  – konstrukcja półsztywna
- gr. 55 cm (konstrukcja nr 5)  $R^2 = 0,81$  – konstrukcja podatna
- gr. 45 cm (konstrukcja nr 6)  $R^2 = 0,81$  – konstrukcja podatna
- gr. 35 cm (konstrukcja nr 7)  $R^2 = 0,42$  – konstrukcja półsztywna

Nie można opisać zależności współczynnika determinacji od grubości konstrukcji. Jest to spowodowane tym, iż wszystkie konstrukcje posiadają minimalną miąższość 45 cm. Na tej głębokości oddziaływanie podłoża na wykonywane badania jest niewielkie.

Wyniki badań opisane w tablicach 9.16 i 9.19 autor wykorzystał do analizy, która jest najczęściej wykonywana w czasie budowy danego odcinka drogi i polega na porównaniu wartości dynamicznego modułu odkształcenia i wartości wtórnego modułu odkształcenia poprzez podzielenie średnich arytmetycznych wszystkich uzyskanych wyników badań:  $X = \frac{\sum E_2}{\sum E_{VD\ sr}}$ .

W ten sposób otrzymano współczynniki  $X$  dla każdej konstrukcji drogi dla kategorii ruchu KR5 – KR7, i tak:

- dla konstrukcji nr 1 otrzymano  $X_1 = 2,7320$  – konstrukcja podatna
- dla konstrukcji nr 2 otrzymano  $X_2 = 2,6350$  – konstrukcja półsztywna
- dla konstrukcji nr 3 otrzymano  $X_3 = 2,9410$  – konstrukcja podatna
- dla konstrukcji nr 4 otrzymano  $X_4 = 2,9794$  – konstrukcja półsztywna
- dla konstrukcji nr 5 otrzymano  $X_5 = 2,9378$  – konstrukcja podatna
- dla konstrukcji nr 6 otrzymano  $X_6 = 2,9530$  – konstrukcja podatna
- dla konstrukcji nr 7 otrzymano  $X_7 = 2,9920$  – konstrukcja półsztywna

- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano  $X_{KR5-KR7} = 2,8083$
- dla wyników dla konstrukcji podatnej dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano  $X_{KR5-KR7} = 2,8431$
- dla wyników dla konstrukcji półsztywnej dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano  $X_{KR5-KR7} = 2,7515$

Współczynnik X umożliwił uzyskanie minimalnej wartości dynamicznego modułu odkształcenia  $\overline{E_{VD}}$  z badania lekką płytą dynamiczną dla każdej wartości  $E_2$ , i tak dla konstrukcji podatnych:

- dla konstrukcji nr 1,  $E_2 = 180 \text{ MPa} \rightarrow \overline{E_{VD}} = 65,9 \text{ MPa}$   
( $E_{VD} \cdot X_1 = E_2$  to  $65,9 \text{ MPa} \cdot 2,7320 = 180 \text{ MPa}$ )
- dla konstrukcji nr 3,  $E_2 = 180 \text{ MPa} \rightarrow \overline{E_{VD}} = 61,3 \text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 5,  $E_2 = 180 \text{ MPa} \rightarrow \overline{E_{VD}} = 61,3 \text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 6,  $E_2 = 180 \text{ MPa} \rightarrow \overline{E_{VD}} = 61,0 \text{ MPa}$
- dla konstrukcji podatnych (1, 3, 5, 6) dla kategorii ruchu KR5 – KR7,  $180 \text{ MPa} \rightarrow \overline{E_{VD}} = 63,4 \text{ MPa}$

Porównując minimalne wartości  $E_{VD}$  uzyskane wyżej przedstawionymi sposobami otrzymujemy:

- dla konstrukcji nr 1 – wzór (9.2)  $E_{VD} = 65,3 \text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 65,9 \text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 3 – wzór (9.4)  $E_{VD} = 53,9 \text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 61,3 \text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 5 – wzór (9.6)  $E_{VD} = 58,0 \text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 61,3 \text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 6 – wzór (9.7)  $E_{VD} = 58,9 \text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 61,0 \text{ MPa}$
- dla konstrukcji podatnych (1, 3, 5, 6) dla kategorii ruchu KR5 – KR7 – wzór (9.9)  $E_{VD} = 61,1 \text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 63,4 \text{ MPa}$ .

Nie wykonano porównania wyników dla konstrukcji nr 2, 4 i 7 (konstrukcje półsztywne) z powodu niezadawalającego współczynnika determinacji.

## 10. Podsumowanie

W niniejszej pracy poddano analizie wyniki 1400 badań in situ, w tym 350 badań wykonanych płytą VSS, 1050 badań wykonanych lekką płytą dynamiczną na 16 budowach o różnych konstrukcjach drogowych. Uzyskane wyniki badań zostały ze sobą zestawione w 350 porównaniach statycznego wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia.

Porównania statycznego wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia zostały podzielone według kategorii ruchu:

a) kategoria ruchu KR1 – KR2 – 100 porównań, w tym:

- dla konstrukcji nr 1 wykonano 24 porównania,
- dla konstrukcji nr 2 wykonano 45 porównań,
- dla konstrukcji nr 3 wykonano 23 porównania,
- dla konstrukcji nr 4 wykonano 8 porównań,

b) kategoria ruchu KR3 – KR4 – 100 porównań, w tym:

- dla konstrukcji nr 1 wykonano 27 porównań,
- dla konstrukcji nr 2 wykonano 17 porównań,
- dla konstrukcji nr 3 wykonano 26 porównań
- dla konstrukcji nr 4 wykonano 13 porównań,
- dla konstrukcji nr 5 wykonano 17 porównań,

c) kategoria ruchu KR5 – KR7 – 150 porównań, w tym:

- dla konstrukcji nr 1 wykonano 44 porównania,
- dla konstrukcji nr 2 wykonano 38 porównań,
- dla konstrukcji nr 3 wykonano 10 porównań,
- dla konstrukcji nr 4 wykonano 11 porównań,
- dla konstrukcji nr 5 wykonano 25 porównań,
- dla konstrukcji nr 6 wykonano 14 porównań,
- dla konstrukcji nr 7 wykonano 8 porównań.

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na wykonanie dwóch metod porównań statycznego wtórnego modułu odkształcenia (wynik jednego badania VSS) z dynamicznym modułem odkształcenia (średnia arytmetyczna z 3 badań lekką płytą dynamiczną).

W pierwszej metodzie dla każdej kategorii ruchu dla konstrukcji nr 1 zostały wykonane trzy zestawienia porównań:

- linowe,



- logarytmiczne,
- kwadratowe.

W każdej kategorii ruchu najlepszą wartość współczynnika determinacji  $R^2$  uzyskano dla liniowej linii trendu. W związku z tym, do dalszych analiz zostało przyjęte porównanie linowe.

Dla każdej konstrukcji przedstawiono równanie, w którym wtórny moduł odkształcenia jest uzależniony od dynamicznego modułu odkształcenia. Pozwoliło to na określenie dla każdej konstrukcji drogi minimalnej wartości modułu odkształcenia, która warunkuje spełnienie wymagań dla wtórnego modułu odkształcenia.

W programie Z\_SOIL zostały wykonane modele oddziaływania na badane warstwy:

- płyty statycznej VSS,
- płyty dynamicznej.

Z analiz numerycznych wynika, że oddziaływania w/w badań sięgają ok. 50 cm włąb badanych warstw. Zostały również wykonane porównania osiadań płyty statycznej według modelu oraz przykładowego badania płytą statyczną dla każdej kategorii ruchu dla konstrukcji nr 1. Dla wtórnego obciążenia wyniki osiadań uzyskane w programie, jak i podczas badania VSS, miały zbliżone wartości.

W drugiej metodzie, dla każdej kategorii ruchu oraz każdej konstrukcji zostało wykonane porównanie polegające na porównaniu wartości dynamicznego modułu odkształcenia i wartości wtórnego modułu odkształcenia poprzez podzielenie średnich arytmetycznych wszystkich uzyskanych wyników badań ( $\sum E_2 / \sum E_{VD \text{ } \acute{s}r}$ ).

W ten sposób otrzymano współczynniki X dla każdej konstrukcji drogi we wszystkich kategoriach ruchu. Współczynniki X umożliwiły określenie dla każdej konstrukcji drogi minimalnego modułu odkształcenia, który warunkuje spełnienie wymagań dla wtórnego modułu odkształcenia.

Według pierwszej metody porównania statycznego wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia dla kategorii ruchu KR1 – KR2 dla wszystkich wyników uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,72$ . Współczynnik ten różni się w zależności od miąższości konstrukcji, i tak dla:

- gr. 32 cm (konstrukcja nr 2) wyniósł  $R^2 = 0,69$
- gr. 35 cm (konstrukcja nr 1) wyniósł  $R^2 = 0,74$
- gr. 35 cm (konstrukcja nr 4) wyniósł  $R^2 = 0,63$
- gr. 40 cm (konstrukcja nr 3) wyniósł  $R^2 = 0,75$

W konstrukcji drogi nr 4 została zastosowana geowłóknina, która mogła mieć wpływ na uzyskaną wartość współczynnika determinacji, która jest niższa i odstaje od pozostałych wartości współczynników. Wykonanie tylko 8 porównań nie pozwala na dokładniejszą analizę powyższego problemu. Jeśli zastosowanie geowłókniny do warstw konstrukcyjnych zostanie wprowadzone na większą skalę należałoby wykonać dodatkowy zestaw badań porównawczych dla uzyskania zależności pomiędzy modułem dynamicznym  $E_{VD}$ , a wtórnym modułem statycznym  $E_2$  dla konstrukcji z zastosowaną geowłókniną. Odrzucając wynik dla konstrukcji nr 4, można przyjąć, że im grubsza konstrukcja tym wyższa wartość współczynnika determinacji. Dla konstrukcji nr 2 o grubości 32 cm, niższa wartość współczynnika determinacji może być spowodowana wpływem podłoża gruntowego na wykonywane badania.

W drugiej metodzie porównania statycznego wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano następujące wartości współczynników X:

- dla konstrukcji nr 1 otrzymano  $X_1 = 2,7878$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 120\text{MPa}$  wynosi  $\overline{E_{VD}} = 43,1\text{ MPa}$  ( $E_{VD} \cdot X_1 = E_2$  to  $43,1\text{ MPa} \cdot 2,7878 = 120\text{ MPa}$ )
- dla konstrukcji nr 2 otrzymano  $X_2 = 2,8078$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 120\text{ MPa}$  wynosi  $\overline{E_{VD}} = 42,8\text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 3 otrzymano  $X_3 = 2,7766$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 120\text{ MPa}$  wynosi  $\overline{E_{VD}} = 43,3\text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 4 otrzymano  $X_4 = 2,8277$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 120\text{ MPa}$  wynosi  $\overline{E_{VD}} = 42,5\text{ MPa}$
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano  $X_{KR1-KR2} = 2,7975$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 120\text{ MPa}$  wynosi  $\overline{E_{VD}} = 42,9\text{ MPa}$

Zestawiając minimalne wartości  $E_{VD}$  uzyskane wyżej przedstawionymi sposobami dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymujemy:

- dla konstrukcji nr 1 – wzór (7.2)  $E_{VD} = 40,9\text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 43,1\text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 2 – wzór (7.3)  $E_{VD} = 40,9\text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 42,8\text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 3 – wzór (7.4)  $E_{VD} = 41,6\text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 43,3\text{ MPa}$
- dla konstrukcji nr 4 – wzór (7.5)  $E_{VD} = 38,8\text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 42,5\text{ MPa}$
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR1 – KR2 – wzór (7.1)  $\overline{E_{VD}} = 41,1\text{ MPa}$ , średnia arytmetyczna  $E_{VD} = 42,9\text{ MPa}$ .

Dla pierwszej metody porównania statycznego wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia dla kategorii ruchu KR3 – KR4 uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,80$ . Nie biorąc pod uwagę 13 porównań z konstrukcji nr 4, dla konstrukcji półsztywnej,  $R^2 = 0,83$ .

Współczynnik ten różni się w zależności od miąższości konstrukcji, i tak:

- gr. 45 cm (konstrukcja nr 4) wyniósł  $R^2 = 0,62$
- gr. 50 cm (konstrukcja nr 5) wyniósł  $R^2 = 0,94$
- gr. 55 cm (konstrukcja nr 3) wyniósł  $R^2 = 0,86$
- gr. 60 cm (konstrukcja nr 2) wyniósł  $R^2 = 0,75$
- gr. 100 cm (konstrukcja nr 1) wyniósł  $R^2 = 0,85$

Nie można określić wartości współczynnika determinacji dla konstrukcji zależnej od grubości konstrukcji. Może to być spowodowane tym, że wszystkie konstrukcje posiadają miąższość minimum 45 cm. Na tej głębokości oddziaływanie podłoża na przebieg badania jest niewielki.

Konstrukcja nr 4, która była konstrukcją półsztywną osiągnęła niższą wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,62$ . Świadczy to o tym, że na warstwach półsztywnych wykonanie porównania i zastosowanie płyty dynamicznej może być utrudnione i uzyskane wyniki mogą nie odzwierciedlać nośności badanej warstwy.

Dla drugiej metody porównania statycznego wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano następujące współczynniki X:

- dla konstrukcji nr 1 otrzymano  $X_1 = 2,8137$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 140$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 49,8$  MPa ( $E_{VD} \cdot X_1 = E_2$  to  $49,8$  MPa  $\cdot 2,8137 = 140$  MPa)
- dla konstrukcji nr 2 otrzymano  $X_2 = 2,8562$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 140$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 49,1$  MPa
- dla konstrukcji nr 3 otrzymano  $X_3 = 2,7715$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 140$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 50,6$  MPa
- dla konstrukcji nr 4 otrzymano  $X_4 = 2,8991$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 140$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 48,3$  MPa
- dla konstrukcji nr 5 otrzymano  $X_5 = 2,8846$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 140$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 48,6$  MPa
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano  $X_{KR3-KR4} = 2,8331$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 140$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 49,5$  MPa.

Zestawiając minimalne wartości  $E_{VD}$  uzyskane wyżej przedstawionymi sposobami dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymujemy:

- dla konstrukcja nr 1 – wzór (8.2)  $E_{VD} = 49,0$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 49,8$  MPa
- dla konstrukcja nr 2 – wzór (8.3)  $E_{VD} = 46,9$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 49,1$  MPa
- dla konstrukcja nr 3 – wzór (8.4)  $E_{VD} = 46,9$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 50,6$  MPa
- dla konstrukcja nr 4 – wzór (8.5)  $E_{VD} = 44,0$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 48,3$  MPa
- dla konstrukcja nr 5 – wzór (8.6)  $E_{VD} = 43,4$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 48,6$  MPa
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR3 – KR4 – wzór (8.1)  $E_{VD} = 46,4$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 49,5$  MPa.

Dla pierwszej metody porównania statycznego wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia dla kategorii ruchu KR5 – KR7 uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,70$ . Rozdzielając jednak konstrukcje drogowe na podatne (93 porównania) i półsztywne (57 porównań), uzyskujemy dla podbudowy konstrukcji podatnej  $R^2 = 0,78$ , a dla konstrukcji półsztywnej  $R^2 = 0,44$ .

Współczynnik ten różni się w zależności od miąższości konstrukcji :

- gr. 50 cm (konstrukcja nr 1) wyniósł  $R^2 = 0,85$  – konstrukcja podatna
- gr. 35 cm (konstrukcja nr 2) wyniósł  $R^2 = 0,56$  – konstrukcja półsztywna
- gr. 50 cm (konstrukcja nr 3) wyniósł  $R^2 = 0,75$  – konstrukcja podatna
- gr. 38 cm (konstrukcja nr 4) wyniósł  $R^2 = 0,63$  – konstrukcja półsztywna
- gr. 55 cm (konstrukcja nr 5) wyniósł  $R^2 = 0,81$  – konstrukcja podatna
- gr. 45 cm (konstrukcja nr 6) wyniósł  $R^2 = 0,81$  – konstrukcja podatna
- gr. 35 cm (konstrukcja nr 7) wyniósł  $R^2 = 0,42$  – konstrukcja półsztywna

Nie można określić zależności współczynnika determinacji od grubości konstrukcji. Jest to spowodowane tym, iż wszystkie konstrukcje posiadają miąższość minimum 45 cm. Na tej głębokości oddziaływanie podłoża na wykonywane badania jest niewielkie.

Dla drugiej metody porównania statycznego wtórnego modułu odkształcenia z dynamicznym modułem odkształcenia dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano następujące współczynniki X:

- dla konstrukcji nr 1 otrzymano  $X_1 = 2,7320$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 180$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 65,9$  MPa ( $E_{VD} \cdot X_1 = E_2$  to  $65,9 \text{ MPa} \cdot 2,7320 = 180 \text{ MPa}$ )
- dla konstrukcji nr 2 otrzymano  $X_2 = 2,6350$  - konstrukcja półsztywna
- dla konstrukcji nr 3 otrzymano  $X_3 = 2,9410$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 180$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 61,3$  MPa

- dla konstrukcji nr 4 otrzymano  $X_4 = 2,9794$  - konstrukcja półsztywna
- dla konstrukcji nr 5 otrzymano  $X_5 = 2,9378$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 180$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 61,3$  MPa
- dla konstrukcji nr 6 otrzymano  $X_6 = 2,9530$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 180$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 61,0$  MPa
- dla konstrukcji nr 7 otrzymano  $X_7 = 2,9920$  - współczynnik pogładowy konstrukcja półsztywna
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano  $X_{KR5-KR7} = 2,8083$
- dla konstrukcji podatnej dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano  $X_{KR5-KR7} = 2,8431$ ; minimalna wartość  $E_{VD}$  dla wymagania  $E_2 = 180$  MPa wynosi  $\overline{E_{VD}} = 63,4$  MPa
- dla konstrukcji półsztywnej dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano  $X_{KR5-KR7} = 2,7515$

Porównując minimalne wartości  $E_{VD}$  uzyskane wyżej przedstawionymi sposobami otrzymujemy:

- dla konstrukcji nr 1 – wzór (9.2)  $E_{VD} = 65,3$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 65,9$  MPa
- dla konstrukcji nr 3 – wzór (9.4)  $E_{VD} = 53,9$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 61,3$  MPa
- dla konstrukcji nr 5 – wzór (9.6)  $E_{VD} = 58,0$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 61,3$  MPa
- dla konstrukcji nr 6 – wzór (9.7)  $E_{VD} = 58,9$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 61,0$  MPa
- dla wszystkich konstrukcji podatnych (nr 1, 3, 5, 6) KR5 – KR7 – wzór (9.9)  $E_{VD} = 61,1$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 63,4$  MPa

Nie wykonano porównania dla konstrukcji nr 2, 4 i 7 (konstrukcje półsztywne) z powodu niezadowalającego współczynnika determinacji.

## 11. Wnioski

Celem podjętych badań i analiz było określenie czy można otrzymać zadowalającą wartość współczynnika determinacji  $R^2$  dla porównań wyników dynamicznego modułu odkształcenia (lekka płyta dynamiczna) z wtórnym modułem odkształcenia (płyta statyczna) na podbudowie z kruszywa o frakcji 0/31,5 mm dla kategorii dróg: KR1 – KR2, KR3 – KR4, KR5 – KR7.

Przeprowadzona analiza zależności modułów odkształcenia konstrukcji drogowej w metodach statycznej i dynamicznej według pierwszej metody doprowadziła do uzyskania zadowalających wartości współczynników determinacji  $R^2$  dla poszczególnych kategorii ruchu dla konstrukcji podatnej, i tak:

- dla kategorii ruchu KR1 – KR2  $\rightarrow R^2 = 0,72$
- dla kategorii ruchu KR3 – KR4  $\rightarrow R^2 = 0,83$
- dla kategorii ruchu KR5 – KR7  $\rightarrow R^2 = 0,78$

Dla kategorii ruchu KR1 – KR2, gdy maksymalna grubość badanych podatnych konstrukcji drogowych wynosiła 40 cm, a tym samym przeprowadzone badania oddziaływały na podłoże, zaobserwowano zależność wartości współczynnika determinacji  $R^2$  od grubości konstrukcji. Wartość współczynnika determinacji  $R^2$  rośnie wraz ze wzrostem grubości konstrukcji, i tak:

- dla konstrukcji o grubości 32 cm (konstrukcja nr 2)  $\rightarrow R^2 = 0,69$
- dla konstrukcji o grubości 35 cm (konstrukcja nr 1)  $\rightarrow R^2 = 0,74$
- dla konstrukcji o grubości 40 cm (konstrukcja nr 3)  $\rightarrow R^2 = 0,75$

Dla pozostałych kategorii ruchu nie występuje zależność wzrostu wartości współczynnika determinacji  $R^2$  przy wzroście grubości konstrukcji. Może to być spowodowane tym, że wszystkie pozostałe badane podatne konstrukcje drogowe miały grubość większą niż 45 cm i dlatego oddziaływanie badań na podłoże było niewielkie.

Dla kategorii ruchu KR1 – KR2 dla konstrukcji nr 4 (grubość 35 cm), gdzie pod podbudową pomocniczą grubości 20 cm z kruszywa łamanego 0/31,5 mm zastosowano geowłókninę, wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,63$ . Wartość ta odbiega od zależności opisanej powyżej. Zbyt mała liczba porównań dla tej konstrukcji (8 porównań) nie pozwoliła na dokładniejszą analizę tego zagadnienia.

Analiza zależności modułów odkształcenia konstrukcji drogowej dla konstrukcji półsztywnej dla danych kategorii ruchu w metodach statycznej i dynamicznej doprowadziła

do uzyskania wartości współczynników determinacji  $R^2$  w dolnej granicy dopasowania zadowalającego oraz na poziomie dopasowania słabego i niezadowalającego:

- dla kategorii ruchu KR3 – KR4 dla konstrukcji nr 4,  $R^2 = 0,62$  (wartość  $R^2$  w dolnej granicy dopasowania zadowalającego)
- dla kategorii ruchu KR5 – KR7 dla konstrukcji nr 2,  $R^2 = 0,56$  (dopasowanie słabe)
- dla kategorii ruchu KR5 – KR7 dla konstrukcji nr 4,  $R^2 = 0,64$  (wartość  $R^2$  w dolnej granicy dopasowania zadowalającego)
- dla kategorii ruchu KR5 – KR7 dla konstrukcji nr 7,  $R^2 = 0,42$  (dopasowanie niezadowalające)
- dla wszystkich wyników dla kategorii ruchu KR5 – KR7 -  $R^2 = 0,44$  (dopasowanie niezadowalające).

Analiza zależności modułów odkształcenia dla wszystkich rodzajów konstrukcji podatnej w metodach statycznej i dynamicznej według drugiej metody pozwoliła na otrzymanie współczynnika  $X$  dla każdej z kategorii ruchu, i tak:

- dla kategorii ruchu KR1 – KR2 otrzymano  $X_{KR1-KR2} = 2,7975 \approx 2,80$
- dla kategorii ruchu KR3 – KR4 otrzymano  $X_{KR3-KR4} = 2,8331 \approx 2,83$
- dla kategorii ruchu KR5 – KR7 otrzymano  $X_{KR5-KR7} = 2,8431 \approx 2,84$

Uzyskane, dla drugiej metody, minimalne wyniki dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$  dla wymagań odbiorowych dla danej kategorii ruchu są wyższe niż w metodzie pierwszej, i tak:

- dla kategorii ruchu KR1 – KR2 – wzór (7.1)  $E_{VD} = 41,1$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 42,9$  MPa
- dla kategorii ruchu KR3 – KR4 – wzór (8.1)  $E_{VD} = 46,4$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 49,5$  MPa
- dla kategorii ruchu KR5 – KR7 – wzór (9.9)  $E_{VD} = 61,1$  MPa, średnia arytmetyczna  $\overline{E_{VD}} = 63,4$  MPa

Uzyskane w pierwszej metodzie porównawczej wartości współczynnika determinacji  $R^2$  powyżej wartości 0,69 potwierdziły możliwość wykonania porównania modułów odkształcenia konstrukcji drogowej dla danych kategorii ruchu dla konstrukcji podatnej. Uzyskano minimalne wartości dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$  dla danej konstrukcji. Ponieważ uzyskane wyniki w drugiej metodzie porównawczej są wyższe od tożsamyh wyników uzyskanych w pierwszej metodzie, zdaniem autora można bezpiecznie stosować współczynniki  $X$  dla poszczególnych kategorii ruchu wyznaczone

bezpośrednio na budowie. Druga metoda jest metodą prostą do wykonania, więc jej stosowanie na budowach dla różnych konstrukcji drogowych oraz przy zastosowaniu różnych materiałów będzie możliwa do wykonania. Jest to metoda bezpieczna.

Najmniejsza liczba wykonanych porównań dla podatnych konstrukcji wyniosła 10 (KR5 – KR7, konstrukcja nr 3). Można przyjąć, że taka liczba wystarczy do wykonania poprawnej analizy porównawczej wartości wtórnego modułu odkształcenia i dynamicznego modułu odkształcenia.

Można zauważyć, że wartość współczynnika  $X$  w drugiej metodzie rośnie wraz ze wzrostem kategorii ruchu. Dlatego nie należy stosować współczynników  $X$  zamiennie dla różnych kategorii ruchu.

Najlepsze dopasowanie w niniejszej pracy uzyskano dla kategorii ruchu KR3 – KR4 dla konstrukcji nr 5. Uzyskany współczynnik determinacji to  $R^2 = 0,94$ . Wykonano 17 porównań, a grubość konstrukcji wyniosła 50 cm, w tym grubość podbudowy zasadniczej była równa 30 cm. Grubość podbudowy zasadniczej z pewnością ma wpływ na wartości modułów; najlepsze trzy dopasowania uzyskano dla konstrukcji posiadających najgrubsze warstwy podbudowy z kruszywa łamanego (pozostałe grubości warstwy były poniżej 23 cm), i tak:

- współczynnik determinacji  $R^2 = 0,94$ , dla konstrukcji o grubości warstwy podbudowy 30 cm,
- współczynnik determinacji  $R^2 = 0,86$ , dla konstrukcji o grubości warstwy podbudowy 25 cm,
- współczynnik determinacji  $R^2 = 0,85$ , dla konstrukcji o grubości warstwy podbudowy 35 cm.

Badania i analizy przeprowadzone w niniejszej pracy potwierdzają, że jest możliwe zastosowanie lekkiej płyty dynamicznej do odbioru podbudów konstrukcji drogowej. Uzyskane minimalne wartości dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{VD}$  mogą być stosowane na budowach, na których z powodu niewielkiej ilości robót drogowych nie ma możliwości wykonania korelacji pomiędzy statycznym a dynamicznym modułem odkształcenia. Ponadto wykonane porównania uzyskanych wyników dwoma metodami pozwoliły na stwierdzenie, że metoda wykorzystywana przez autora w ciągu jego pracy na budowach jest bezpieczna, a uzyskiwane w ten sposób wyniki są zbliżone do wyników uzyskanych z analizy naukowej. Powyższe dwa cele były ważne dla autora przy pisaniu pracy. Pozwolą one na przyspieszenie wykonywania odbiorów poszczególnych warstw konstrukcji drogowej na budowach.



Planując kolejne pomiary na budowach nie należy zapominać o wykonaniu dodatkowych badań dla konstrukcji drogowych, w których jest zastosowana geowłóknina. Niewielka liczba wykonanych badań na takich konstrukcjach nie pozwoliła na wyciągnięcie wniosków dotyczących wpływu geowłókniny na otrzymane wyniki badań.

W związku z tym, że w badaniach zależności modułów odkształcania dla konstrukcji półsztywnych uzyskano wartości współczynnika determinacji  $R^2$  w dolnej granicy dopasowania zadowalającego, konieczne jest prowadzenie dalszych badań dla konstrukcji półsztywnych, które mogą dać odpowiedź czy jest możliwość uzyskania zadowalającej wartości współczynnika determinacji  $R^2$  dla zależności modułów odkształcania dla konstrukcji półsztywnych.

## Bibliografia

### Literatura podstawowa

Akmaz E., Ullah S., Tanyu B. F., Guler E. (2020): Construction quality control of unbound base course using light weight deflectometer where reclaimed asphalt pavement aggregate is used as an example, *Transportation research record journal of the transportation research board*, August 2020, 1-14.

Bardel T. (2012): Ocena wyników badań płytą VSS kruszywa ze złożu aluwialnych rejonu Tarnowa wykorzystywanego do budowy nasypów drogowych, *Górnictwo i geologia* tom 7/2012, 49-58.

Bardel T., Kądziałowski G. (2019): Skuteczność stabilizacji cementem podłoża nawierzchni drogowej na podstawie wyników badań płytą statyczną, *Cement Wapno Beton* nr 2/2019, 116 – 125.

Bartnik G. (2015): Zastosowanie lekkiej płyty dynamicznej do oceny jakości zagęszczenia warstw kruszywa łamanego na podłożu gruntowym wzmocnionym geosyntetykiem, *Praca doktorska*, Warszawa.

Bartnik G., Sulewska M. (2015): Zastosowanie lekkiej płyty dynamicznej do badania gruntów zbrojonych, *Inżynierki Morska i Geotechnika* nr 3/2015, 280-285.

Bąk G., Gosk W. (2007): Sztywność podłoża piaskowego w procesach obciążenia i odciążenia wywołanych udarem, *Czasopismo techniczne z 2-B* 2007, 4-10.

Bąk B., Radwanek – Bąk B., Wyszomirski P. (2011): Aktualny przegląd krajowych złóż dolomitów w aspekcie wykorzystania w przemyśle materiałów ogniotrwałych, *Gospodarka surowcami naturalnymi*, Tom 27 Zeszyt 1, 21-46.

Bertuliene L. (2014): Research of methods for determining the strength of subgrade of road pavement, *The 9th International Conference Environmental Engineering*, 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania.

Bertuliene L., Juknevičiūtė-Žilinskienė L., Sivilevičius H., Laurinavičius A. (2019): Ocena nosivosti sloja kolničke konstrukcije za zaštitu od smrzavanja primjenom različitih mjernih uređaja, *Gradevinar* 2/2019, 95-104.

Bertuliene L., Laurinavicius A., Vaitkus A., 2010: Research and evaluation of methods for determining deformation modulus of a base course of road pavement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5 (2)/2010, 110–115.

Bobrowski D., Maćkowiak-Łybacka K. (1988): Wybrane metody wnioskowania statystycznego, *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, Poznań.

Brandt S. (1974): Metody statystyczne i obliczeniowe danych, *Państwowe Wydawnictwo Naukowe*, Warszawa.

Elhakim A. F., Elbaz K., Amer M. I. (2014): The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction, *HBRC Journal* 10, 298–307.

Gorączko A., Śmigiel P., Topoliński Sz. (2014): Korelacja parametrów zagęszczenia podbudowy drogowej z kruszywa łamanego, *Logistyka* 6/2014, 4025-4030.

- Gosk W. (2005): Identyfikacja parametrów sprężonego modelu podłoża gruntowego obciążonego udarowo, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria Budownictwo z. 104, 115 – 122.
- Gosk W. (2010): Badanie podłoża gruntowego za pomocą płyty dynamicznej ZFG-01 – ocena zastosowania modelu sprężystego do interpretacji wyników, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna nr 2/2010, 99-106.
- Gosk W. (2011): Zastosowanie nieliniowego modelu gruntu do identyfikacji modułu sztywności podłoża gruntowego obciążonego udarowo, Budownictwo i Inżynieria Środowiskowa, nr 2/2011, 35-40.
- Gosk W. (2014): Ocena sztywności gruntu w nasypie na podstawie badania lekką płytą dynamiczną, Logistyka nr 6/2014, 4112-4121.
- Gosk W. (2016): Stiffness estimation of the soil built-in road embankment on the basis of light falling weight deflectometer test, Procedia Engineering Volume 143, 2016, 395–402.
- Gosk W. (2018): Lekka płyta dynamiczna – fakty o module  $E_{VD}$  podłoża, Materiały Budowlane nr 3/2018, 26-27.
- Gosk W., Czech K. (2016): Ocena modułu sztywności gruntu na podstawie pomiaru drgań powierzchniowych, Acta Sci.Pol. Architectura 15 (2) 2016, 67-77.
- Gosk W., Czech K., (2018): Ocena możliwości wyznaczenia modułu sztywności i współczynnika Poissona gruntu na podstawie pomiaru przyspieszeń drgań powierzchniowych, Acta Sci.Pol. Architectura 17 (2) 2018, 15-23.
- Gradkowski K. (2008): Efekt wzmocnień geotekstyliami gruntowego podłoża nawierzchni dróg – badania doświadczalne, Drogi i Mosty nr 4/2018, 5-22.
- Gradkowski K., (2008): Nośność podłoża nawierzchni dróg samochodowych wzmocnianych geosyntetykami, Prace naukowe – budownictwo z. 151, OWPW, Warszawa.
- Grajewski S. (2016): Influence of pavement moisture content on the load-bearing capacity of forest road, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich Nr IV/2/2016, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, 1451-1462 Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi.
- Grajewski S., Czerniak A., Kasztelan A., Kayzer D., Szóstakowski P. (2015): Zastosowanie geotkaniny do zwiększania nośności dróg leśnych na terenach bagiennych, Acta Sci.Pol. Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar. 14(4) 2015, 301-311.
- Grygierek M., Sękowski J., Siodmok A. (2018): Ulepszanie gruntów spoistych metodą katalityczno-fizyczną. Badania terenowe, Drogownictwo 2/2018, 39-46.
- Guzzarlapudi S. D., Adigopula V. K., Kumar R. (2016): Comparative studies of lightweight deflectometer and Benkelman beam deflectometer in low volume roads, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) Volume 3, Issue 5, October 2016, 438-447.
- Jermołowicz P. (2015): Problematyka zagęszczania i stabilizacji gruntów w budownictwie. Technologie i ich skuteczność. Zasady projektowania i wykonawstwa (materiały szkoleniowe), OOIIB, 2015.10.24.
- Jermołowicz P. (2020a): Badania zagęszczenia podłoża, [www.inzynieriasrodowiska.com.pl](http://www.inzynieriasrodowiska.com.pl), 17-11-2020.

- Jermołowicz P. (2020b): Płyta VSS, [www.inzynieriasrodowiska.com.pl](http://www.inzynieriasrodowiska.com.pl), 23-11-2020.
- Judycki J., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaskuła P., Pszczoła M. (2012): Propozycja zmian terminologii drogowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych i jej zastosowanie w nowym katalogu, *Drogownictwo* nr 12/2012, 405-410.
- Kalabińska M., Piłat J. Radziszewski P. (2008): *Technologia materiałów i nawierzchni drogowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Kassyk-Rokicka H. (1976): *Mierniki statystyczne*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Kavussi A., Rafiei K., Yasrobi S. (2010): Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 16, No. 1, 2010, 123-129.
- Kopf F., Adam D., Paulmichl I. (2011): Investigation of the dynamic plate loading test with the light-weight deflectometer using the boundary element method [https://insitutek.com/wp-content/uploads/2011/11/Investigation\\_of\\_ZFG\\_2000\\_using\\_Boundary\\_Element\\_Method.pdf](https://insitutek.com/wp-content/uploads/2011/11/Investigation_of_ZFG_2000_using_Boundary_Element_Method.pdf)
- Kraszewski C., Gajewska B. (2016): Metody ustalania nośności podłoża drogowego – wymagania i badania, *Budownictwo Drogowe. Vademecum 2016*, 22-25.
- Kraszewski C., Rafalski L., Cwiąkała M., Dreger M. (2020): Wpływ stosowanych zakresów naprężeń na wartości wtórnego modułu odkształcenia oraz wskaźnika odkształcenia pospółki i kruszywa łamanego w badaniach płytowych VSS, *Drogi i mosty* nr 19/2020, s 283-296.
- Krawczyk B., Mackiewicz P. (2015): Wpływ obciążeń cyklicznych w badaniu lekką płytą dynamiczną na identyfikowane parametry podłoża, *Drogi i Mosty* nr 14/2015, 5-17.
- Krawczyk B., Mackiewicz P. (2016): Wpływ rodzaju i grubości warstwa wzmocnionego podłoża na wartości przemieszczeń rejestrowanych w statycznych i dynamicznych badaniach płytą, *Drogi i Mosty* nr 15/2016, 87-102.
- Krawczyk B., Mackiewicz P. Szydło A. (2015): Analiza wpływu rodzaju przeciwwagi na identyfikowane parametry warstw konstrukcji nawierzchni oraz podłoża w badaniu VSS, *Drogi i Mosty* nr 14/2015, 143-157.
- Krużyński M. (2008): Kontrola odkształcalności i zagęszczenia gruntów podtorza, *Problemy modernizacji i naprawy podtorza kolejowego*, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Żmigród-Węglewo 29-30.05.20208, 63-68.
- Krużyński M., Mazurkiewicz R., Piotrowski A. (2007): Modernization of the subgrade of E30 railway line, „From horse-drawn railway to high-speed transportation system”, April 17-19, Prague, Czech Republic.
- Kumor M., Kumor Ł, Farmas J. (2013a): Badanie związków korelacyjnych parametrów zagęszczania nasypu budowlanego w warunkach in situ, *Budownictwo i Architektura* 12(3) 2013, 97 – 104.
- Kumor M., Kumor Ł, Farmas J. (2013b): Wybrane związki korelacyjne parametrów zagęszczania określone metodami VSS i LFG, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 4(2013), 271 – 279.
- Luszniewicz A. (1979): *Metody wnioskowania statystycznego*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.

- Lysmer J., Kuhlemeyer R. (1969): Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 95, 859-877.
- Łupieżowiec M. (2012): Wpływ sztywnych geomateracy na odkształcalność podłoża gruntowego pod nawierzchnie drogowe, *Czasopismo techniczne zeszyt 27/2012*, 53-65.
- Łupieżowiec M., Syma S. (2014): Problemy związane z interpretacją wyników badań płytą VSS, *Magazyn autostrady nr 11/12*, 48-52.
- Łupieżowiec M., Syma S. (2014): Wykorzystanie płyty dynamicznej w badaniach odbiorczych podłoża i warstw nawierzchni konstrukcji drogowej, *Magazyn autostrady nr 5*, 125-129.
- Łupieżowiec M., Syma S. (2015): Błędy popełniane przy realizacji badań VSS i interpretacji ich wyników, *Magazyn autostrady nr 5*, 61-65.
- Mackiewicz P., Krawczyk B. (2015): Wpływ czasu oddziaływania obciążenia w badaniu VSS na identyfikowane parametry podłoża, *Drogi i Mosty nr 14/2015*, 19-29.
- Makwana P., Kumar R. (2019): Correlative study of LWD, DCP and CBR for sub-grade, *International Journal z Engineering Trends i Technology (IJETT) - Volume 67 Issue 9 - September*.
- Maślakowski M., Bartnik G., Kowalczyk S. (2013): Wpływ geosyntetyków na dobór metody pomiaru odkształcenia podłoża, *Budownictwo i Inżynieria Środowiskowa nr 4/2013*, 281-286.
- Narnoll V., Suman S. K. (2020): Feasibility of lightweight deflectometer measured surface deflection on flexible pavement for quality assessment, *SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE) – Volume 7 Issue 7 – July 2020*, 73 – 82.
- Parylak K. (2019): Kontrola zagęszczenia gruntów lekką płytą dynamiczną. Badanie czy fikcja, *Inżynier budownictwa nr 12/2019*, 38-42.
- Parylak K. (2019): Ocena przydatności płyty VSS i lekkiej płyty dynamicznej do kontroli zagęszczania gruntów, *Inżynieria Morska i Geotechnika nr 2/2019*, 60-64.
- Pawłowski M. (2010): Badania na wielkowymiarowym modelu podtorza kolejowego, *Badania nr 4/2010*, 44-48.
- Pawłowski M., Siewczyński Ł. (2016): Zależność stanu zagęszczenia podtorza od stanu jego odkształcalności, *Przegląd komunikacyjny nr 10/2016*, 30-35.
- Piłat J., Radziszewski P. (2004): *Nawierzchnie asfaltowe, WŁK, Warszawa*.
- Piotrowski A. (2010): Nośność podtorza, *Przegląd komunikacyjny nr 11-12/2010*, 26-27.
- Pisarczyk S. (1991): *Mechanika gruntów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa*.
- Pisarczyk S. (2005): *Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa*.
- Plewa A. (2013): Ocena wpływu nośności podłoża gruntowego na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni drogowej w aspekcie kryterium deformacji strukturalnej podłoża gruntowego, *Budownictwo i Inżynieria nr 4/2013*, 295 – 300.
- Požarycki A., Garbowski T. (2014): Identyfikacja wartości wtórnego modułu odkształcenia na podstawie impulsowych testów dynamicznych w modelu nawierzchni drogowej, *Drogoznictwo nr 2/2014*, 46-51.

- Rogojsz G. (2015): Badanie nośności nasypów drogowych przy wykorzystaniu lekkiej płyty dynamicznej, *Przeгляд budowlany* 7-8/2015, 60 – 63.
- Rybak J., Stilger-Szydło E. (2010): Znaczenie i błędy rozpoznania podłoża gruntowego przy posadowieniach obiektów infrastruktury transportu lądowego, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* lipiec- sierpień 2010, 60-65.
- Sieniawska-Kuras A. (2010): *Budownictwo drogowe w zarysie*, Wydawnictwo KaBe, Krosno.
- Siewczyński Ł. (2002): 10 lat modernizacji podtorza w PKP, *Technika transportu szynowego* nr 11-12/2002, 75-79.
- Siewczyński Ł., Pawłowski M. (2014): Projektowanie wzmocnień podtorza z wykorzystaniem wykresów, *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITR RP*, oddział Kraków nr 2/2014, 337 – 343.
- Shivamant A., Pramod K. Kolase, Shama P S. Mayank K. Desai, Atul K. Desai. (2015): Study of the light weight deflectometer and reviews, *International Journal of Engineering Research and General Science* Volume 3, Issue 6, November-December.
- Singh N. K., Mejia C., Martison T., Shah F., Geo P. Fleming Ch., Fitzpatrick J. (2010): Use of the light weight deflectometer (LWD) at highland valley copper mine, *Geo2010 Calgary*, In the New West Conference.
- Starzyńska W. (2000): *Statystyka praktyczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Sulewska M. (1993): Lekki ugięciomierz dynamiczny do określania modułu odkształcenia gruntu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Seria Budownictwo*, nr 11, Białystok, 85-106.
- Sulewska M. (1999): Metoda szybkiej kontroli zagęszczenia nasypów z gruntów niespoistych, *Inżynieria i Budownictwo* nr 4/99, 218 – 220.
- Sulewska M. (2001): Lekka płyta dynamiczna w zastosowaniu praktycznym. [ref.], VII Międzynarodowa Konferencja "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe" Kielce. Warszawa.
- Sulewska M. (2003a): Doświadczenia ze stosowania lekkiego ugięciomierza dynamicznego. *Drogownictwo*, nr 11/2003, 365-367.
- Sulewska M. (2003b): Nowoczesny sposób kontroli jakości zagęszczania nasypu, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo* z. 97/2003, 307 – 314.
- Sulewska M. (2012): The control of soil compaction degree by means of LFWD, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*.
- Szydło A., Mackiewicz P. (2005): *Nawierzchnie betonowe na drogach gminnych – poradnik*, Polski Cement, Kraków.
- Tehrani F. S., Meehan Ch. L. (2010): The effect of water content on light weight deflectometer measurements, *GeoFlorida 2010: Advances in analysis, modeling & design*, 930 – 939 - Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Tirado, C., Mazari, M., Carrasco, C., & Nazarian, S. (2015): Evaluating Influence Depth of light weight deflectometer through finite element modeling. In *Airfield and Highway Pavements 2015*, ASCE, 789-800.

Truty A. (2010): Zastosowanie metody redukcji obszaru obliczeniowego w dynamicznych zagadnieniach interakcji konstrukcji z podłożem. *Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, 1-Ś, 101-115.

Trzciniński G. (2007): Nośności żuźlowych i żwirowych nawierzchni dróg leśnych, *Sylwan* nr 7/2007, 49-57.

Wesołowski M., Kowalewska A. Kowalska D., Rumak A. (2018): Zastosowanie geokrat do zapewnienia nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych, *Przegląd komunikacyjny* nr 9/2018, 11-16.

Wesołowski M., Pietruszewski P., Kowalewska A. (2019): Geosyntetyki komórkowe pod kątem zastosowania w budownictwie lotniskowym, *Journal of KONBiN* Volume 49, Issue 4, 341-362.

Wesołowski M., Kowalewska A. (2020): The impact of a geogrid system on load-bearing capacity of natural airfield pavements, *Archives of civil engineering* vol 66 nr 2/2020, 45-61.

Węgliński Sz. (2018): Określenie zakresu oddziaływania obciążenia w statycznych i dynamicznych badaniach podłoża przy zastosowaniu płyty sztywnej, *Drogi i Mosty* nr 17/2018, 72-88.

Węgliński Sz., Brzeziński B. (2017): Analiza porównawcza wyników obliczeń nośności nawierzchni drogowych metodą ugięć przy zastosowaniu belki Benkelmana w świetle proponowanych zmian katalogu wzmocnień i remontów, *Drogownictwo* 4/2017, 111 - 116

Wiłun Z. (2003): *Zarys geotechniki*, WKŁ, Warszawa.

Wyroślak M. (2017): Korelacje parametrów gruntu w badaniach stanu zagęszczenia nasypu kontrolowanego, *Inżynieria morska i geotechnika* nr 1/2017, 21-26.

Wyroślak M., Ossowski R. (2016): Badanie modułu odkształcenia podłoża gruntowego w nasypie kontrolowanym za pomocą statycznej i lekkiej płyty dynamicznej, *Acta Sci. Pol. Architectura* 15 (3), 111-118.

Zełek Z. (2009): Projektowanie warstw ochronnych i podłoży kolejowych budowli ziemnych wzmocnionych geotekstylami, *Problemy kolejnictwa zeszyt* 149, 37 – 52.

Zhang J., Ding L., Zeng L., Gao Q., Gu F. (2020): Using portable falling weight deflectometer to determine treatment depth of subgrades in highway reconstruction of Southern China, *Transportation Safety and Environment*, Vol. 2, No. 1, 18–28.

Zieliński R. (1972): *Tablice statystyczne*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.

Zieliński W. (1999): *Tablice statystyczne. Wykłady ze statystyki i doświadczalnictwa*, Fundacja ROZWÓJ SGGW, Warszawa.

## **Normy, rozporządzenia**

BN-64/8931-02 Drogi samochodowe. Oznaczanie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą.

BN-70/8931-06 Drogi samochodowe. Pomiar ugięć nawierzchni podatnych ugięciomierzem belkowym

DIN 18134 2001 Determining the deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test

DIN 18134 2012-04 Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch

EN 1097-1:2011 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie odporności na ścieranie (mikro-Deval)

EN 1097-2:2010 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -- Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie

EN 1097-6:2013 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -- Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości

EN 13242:2002 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym

EN 1367-1:2007 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych -- Część 1: Oznaczanie mrozoodporności

EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania

EN 933-8:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 8: Ocena zawartości drobnych cząstek -- Badanie wskaźnika piaskowego

EN 933-9:2009 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 9: Ocena zawartości drobnych cząstek -- Badanie błękitem metylenowym

PN-84/S-96023 Konstrukcje drogowe – Podbudowa i nawierzchnia z tłuczni kamiennego

PN-97/S-06102 Drogi samochodowe. Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie

PN-98/S-02205 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.

PN-EN 13286-2 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym -- Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody -- Zagęszczanie metodą Proctora

PN-EN 13286- 47 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym -- Część 47: Metoda badania kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego

PN-EN 933-1 Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Oznaczanie składu ziarnowego - Metoda przesiewania

Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, wraz z późniejszymi zmianami

ZTV E-STB 09 Additional technical conditions of contract and directives for earthworks in road construction



## **Katalogi, instrukcje**

Badanie i ustalenie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną, IBDiM, Warszawa 2005 r.

Geolab Sprzęt geotechniczny i pomiarowy – reklama firmy 2016 r.

Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych, GDDP, Warszawa 1998 r.

Instrukcja ZFG 2.0 Lekka płyta obciążana dynamicznie (LWD), ZORN 2009 r.

Instrukcja ZFG 3.0 Lekka płyta obciążana dynamicznie (LWD), ZORN 2013 r.

Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, GDDKiA, IBDiM, Warszawa 2013

Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, GDDKiA, Warszawa 2014 r.

Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, GDDKiA, Warszawa 2014 r.

Merazet S.A. Drogownictwo, budownictwo i geodezja - reklama firmy, 2016 r.

Płyta dynamiczna HMP LFG – reklama, firma Geolab 2014 r.

Pismo Dyrekcji Okręgowej Dróg Publicznych we Wrocławiu nr 22/4100/215/98 dotyczące badania nośności i zagęszczenia przez badanie płytą naciskową

WT-4 Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych, GDDKiA, 2010 r.

## **Strony internetowe**

<https://www.gzd.com.pl/pliki/3/pliki/35-1-032t-15-wzor.pdf>