

Badanie i ocena sztywności nawierzchni kolejowej w oparciu o nową metodę pomiaru

Testing and evaluation of railway pavement construction stiffness based on a new testing method



Juliusz Sołkowski

Dr hab. inż.

Politechnika Krakowska, Wydział
Inżynierii Lądowej, Katedra
Infrastruktury Transportu
Szynowego i Lotniczego

jsolkow@pk.edu.pl



Dawid Siemiński

Mgr inż.

Politechnika Krakowska, Wydział
Inżynierii Lądowej, Katedra
Infrastruktury Transportu
Szynowego i Lotniczego

dsieminski@interia.pl

Streszczenie: Niniejsze opracowanie opiera się na poszukiwaniu metody pomiaru i oceny konstrukcji nawierzchni kolejowej. Autorzy zauważają pewne analogie między nawierzchniami drogowymi oraz kolejowymi, zarówno pod względem konstrukcji, jak i obciążenia dynamicznego. Już w latach 60. opracowano metodę pomiaru ugięć nawierzchni drogi pod obciążeniem dynamicznym za pomocą urządzenia Falling Weight Deflectometer. Przez wiele lat ulepszano metodę pomiaru, technikę oraz metodę analizy wyników. Urządzenie FWD zostało przystosowane także do użytku na nawierzchniach kolejowej. Pierwsze testy zostały wykonane w terenie i przyniosły wiarygodne wyniki. Metody oceny dla urządzenia pomiarowego dla nawierzchni są w trakcie opracowywania.

Słowa kluczowe: Nawierzchnia kolejowa; Pomiary; Diagnostyka Nawierzchni; FWD; Sztywność

Abstract: This project is based on search for the method of measuring and evaluation the railway pavement construction. The authors note some analogies between road and railway, both in terms of construction and the dynamic load. Already in the 1960s a method for measuring road pavement deflections under dynamic load was developed using Falling Weight Deflectometer. During years the device and the results analysis method were developed and currently commonly used. The FWD device was adapted for use on railway pavement construction. The first tests were done in the field and have brought reliable results. The device and measuring and pavement evaluation methods are under development.

Keywords: Railway pavement; Measurements; Pavement diagnostics; FWD; Stiffness

Nawierzchnia drogi kolejowej jako liniowy obiekt, jest budowlą trudną pod względem utrzymania jednolitej sztywności/sprężystości. Głównie w obszarach obiektów inżynierskich, gdzie efekt stref przejściowych jest szczególnie widoczny [9]. Z drugiej strony ciągle oddziaływania dynamiczne pochodzące od poruszających się pojazdów zmieniają sztywność konstrukcji nawierzchni w czasie, obniżając tym samym jej nośność. Stąd pojawia się pytanie: czym i jak badać sztywność nawierzchni.

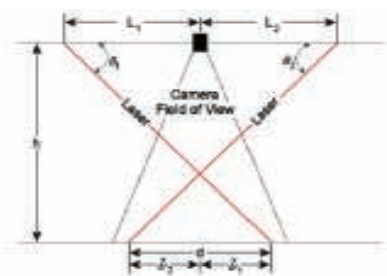
Wiedza na temat stanu toru jest niezwykle ważna we właściwej ocenie oraz planowaniu wzmocnień i remontów. Niestety wzmożony ruch kolejowy ogranicza, a w niektórych przypadkach uniemożliwia zajęcie toru na dłuższy czas. Spowodowane jest to koniecznością czasowego zamknięcia odcinka i wyłączenia z ruchu na czas badań i pomiarów. Dlatego też poszukiwanie metod pomiarowych automatycznych,

nieniszczących oraz szybkopostępujących staje się jednym z celów. Przedmiotem rozważań jest opracowanie takiej metody badań oraz interpretacji, która zbliży nas do odpowiedzi między innymi na pytania: jaka jest nośność nawierzchni, jej sztywność, a w konsekwencji – trwałość. Przy czym pomiar powinien odbywać się w warunkach zbliżonych do warunków pracy nawierzchni. Jak się okazuje podobne rozwiązanie już od lat 60-tych jest stosowane w drogownictwie. W ten sposób zrodziła się koncepcja adaptacji do nawierzchni kolejowych.

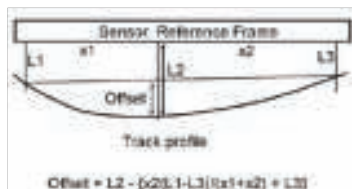
Obecne metody oceny stanu technicznego toru w Polsce

Obowiązek właściwego utrzymania infrastruktury kolejowej spoczywa na Właścicielu lub Zarządcy. Wynika to w szczególności z przepisów prawa budowlanego. Jakie badania i pomiary przeprowadzić, aby właści-

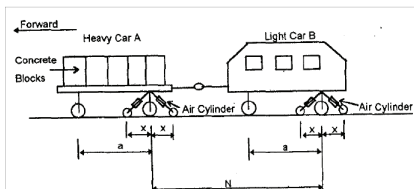
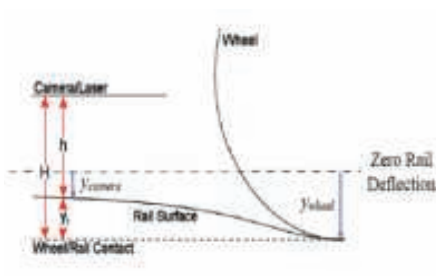
wie zdiagnozować stan obiektu jakim jest nawierzchnia? W przypadku dróg samochodowych metody badań i interpretacji wyników szczegółowo opracowała Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad w ramach dokumentu DSN [6]. Na tym opracowaniu bazują również Zarządcy pozostałych dróg. W przypadku nawierzchni kolejowej mówimy o Warunkach Technicznych oraz Instrukcjach z serii „Id” wprowadzonych do stosowania poprzez zarządzenia Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe s.a. Stan toru oceniany jest na podstawie pomiaru [8]: szerokości toru, różnic wysokości torów szynowych, wichrowatości toru, nierówności poziomych i pionowych toków szynowych, wartości syntetycznego wskaźnika stanu toru „J” oraz pomiarów dodatkowych jak: położenie toru w płaszczyźnie, wartości przesunięć toków szynowych i wartości luzów na stykach. Diagnostyce poddawane są również poszczególne elementy nawierzchni.



1. Pomiar ugięcia szyny w oparciu o kamerę oraz układ laserów [4]



2. Pomiar ugięcia szyny w oparciu o układ laserów przy zadanym obciążeniu statycznym [2]



3. Pomiar ugięcia szyny przy zastosowaniu dwóch wagonów [5]

Szyny analizowane są w szczególności pod względem wizualnym zewnętrznych wad i uszkodzeń, pomiary zużycia główki szyny, defektoskopię, pomiary falistego zużycia powierzchni tocznej, ustalenie liczby pęknięć. W przypadku podkładów mówimy głównie o wzrokowym wykrywaniu wad oraz pomiarze rozstawu i wielkości skoszenia. Podosypka analizowana jest w oparciu o ustalenie jej grubości, pomiar szerokości pryzmy, ocenę wypełnienia okienek pomiędzy podkładami, ocenę stanu zachwaszczenia, stanu zagęszczenia, występowanie wychłapek i stopnia zanieczyszczenia podsypanki. Dodatkowo oceniane są złączki, a osobnej diagnostyce poddawane są tor bezstykowy, rozjazdy, przejazdy kolejowe i przejścia dla pieszych. Nośność, trwałość nawierzchni oraz jej właściwości tłumiące nie są oceniane w ramach okresowych przeglądów, lub określa się je w sposób pośredni np. poprzez pogorszenie parametrów geometrii toru lub innych wizualnych defektów nawierzchni.

Obecne metody oceny sztywności toru

Aktualnie istnieją różne metody pomiaru tej wielkości. Prace [1, 4] opisują pomiar ugięcia szyny w oparciu o dane z kamer oraz laserów, których promień pada na szynę pod znanym kątem. Zależnie od wielkości ugięcia szyny, odległość „d” pomiędzy miejscami padania wiązek, jest zmienna i rejestrowana w sposób ciągły przez kamerę podczas jazdy.

Lasery mierzące odległość od emitera do elementu mierzonego mogą być też wykorzystywane w inny sposób. W

pracy [2] wykorzystano wagon wyposażony w dodatkową oś umieszczoną w połowie długości wagonu, która jest opuszczana i podnoszona siłownikiem hydraulicznym wywołującym obciążenie statyczne od 4 do 267kN. W oparciu o różnicę ugięć wywołaną maksymalnym oraz minimalnym naciskiem, wyznaczana jest sztywność toru. Ugięcie wyznaczane jest w układzie trzech laserów umieszczonych na ramie referencyjnej.

Ciekawą metodę opisano w [5] (Chiny). Tutaj sztywność szyny określana jest w oparciu o różnicę ugięć szyny pod lekkim i ciężkim wagonem.

Inną metodę pomiaru przedstawiono w [3]. W tym przypadku sztywność wyznaczana jest z pomiaru przyspieszeń osi wagonu, przy uwzględnieniu siły nacisku, wyposażonego dodatkowo w układ oscylujących mas.

Podobną metodę pomiaru zastosowano w ramach badania dynamicznego toru [7]. Jednak w tym przypadku zastosowano niewielką masę wzbudzającą drgania o wysokiej częstotliwości.

Nowa koncepcja

Ocena sztywności/sprężystości nawierzchni dróg samochodowych odbywa się głównie dwoma metodami: pomiar ugięć nawierzchni metodą belki Benkelmana oraz przy zastosowaniu ugięciomierza dynamicznego FWD (Falling Weight Deflectometer). Urządzenie jest powszechnie stosowane w drogownictwie do oceny nośności oraz trwałości nawierzchni drogowej.

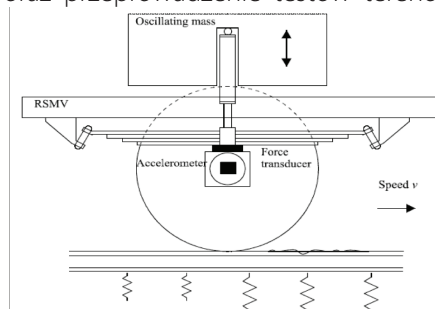
Pierwsze zastosowanie FWD do określania nośności zostało zastosowane w 1964 roku przez dwóch studen-

tów Duńskiego Uniwersytetu Technicznego. Główną ideą było wprowadzenie urządzenia generującego obciążenie dynamiczne symulujące rzeczywisty ruch pojazdów.

W 1965 roku inżynier J. B. Villadsen założył firmę A/S PHONIX, która skonstruowała pierwszy model FWD transportowany na ciężarówce. Kolejnym modelem był FWD na przyczepie.

Firma A/S PHONIX (obecnie Sweco Pavement Consultants) stała się pierwszą, która skomercjalizowała FWD. W latach 1968-1969, 65 sztuk maszyn FWD zostało wyprodukowanych i sprzedanych. W roku 1979 Dynatest A/S rozpoczęła produkcję FWD i przerwała współpracę z A/S PHONIX, ale do tego czasu FWD było „know-how” firmy A/S PHONIX i Dynatest A/S. Jednak początek był w DTU we współpracy z A/S PHONIX w 1965r. i do czasu, kiedy niektórzy z członków zespołu FWD utworzyli firmę Dynatest A/S. W 1979 roku Dynatest przedstawił pierwszy FWD, a w 1981 A/S PHONIX wprowadza FWD z jedną płytą obciążającą i 6 geofonami. Obecnie jest wielu producentów urządzeń o różnych cechach i wyposażeniu, lecz zbliżonym działaniu, umożliwiające stosowanie obciążeń do 350kN.

Zauważając potrzeby rynku kolejowego i korzystając z aktualnych doświadczeń stosowanych w drogownictwie pojawiła się koncepcja adaptacji drogowego ugięciomierza dynamicznego FWD do rozwiązań kolejowych oraz przeprowadzenie testów tereno-



4. Ocena sztywności toru i podłoża z wielkości dynamicznych pod oscylującą masą pionową [3]



5. Wzbudnik bezwładnościowy rotacyjny wraz z siłownikami pałkowymi [7]



6. Ugięciomierz dynamiczny FWD firmy SWECO – Denmark A/S

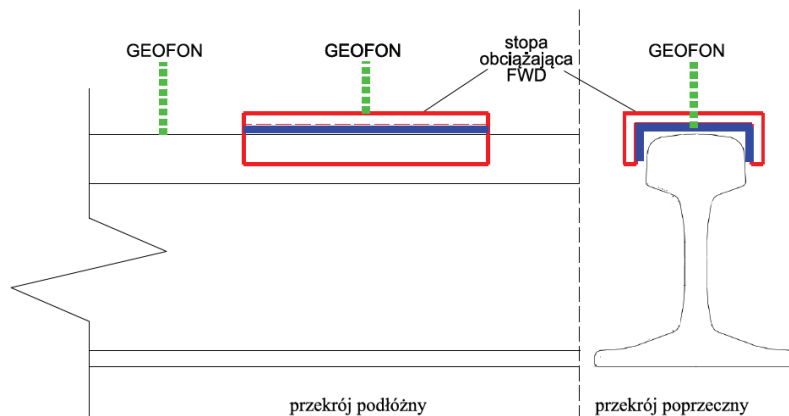
wych. Projekt ma ogromne znaczenie dla rozwoju modeli nawierzchni kolejowej (szynowej) ze szczególnym uwzględnieniem sztywności dynamicznej oraz nieliniowości odpowiedzi nawierzchni na wymuszenie. Właściwości urządzenia pozwalają na wywołanie obciążenia nawierzchni, które symulować będzie poruszający się po szynie pojazd o różnej prędkości oraz nacisku. Ponadto urządzenie ma możliwość rejestrowania wartości ugięcia dzięki geofonom, umieszczonym w różnych odległościach na długości szyny. W ten sposób uzyskujemy czasę ugięcia szyny zarówno w miejscu przyłożenia obciążenia jak i w pewnej odległości. Ponadto dzięki funkcji „Time history” urządzenie rejestruje przyrost wartości siły oraz ugięcia w czasie. W ten sposób można dokładniej analizować uzyskane wyniki. Pierwsze pomiary testowe były poprzedzone adaptacją ugięciomierza do rozwiązań kolejowych. W tym celu konieczne były zmiany konstrukcyjne urządzenia. Najważniejszą stanowiło przeprojektowanie stopy urządzenia, aby obciążenie było przykładane bezpośrednio na szynę kolejową. Schematyczne rozwiązanie przedstawia rysunek 7.

Pomiary testowe

Dzięki ścisłej współpracy z duńskim producentem tego typu urządzeń udało się opracować prototyp urządzenia do rozwiązań kolejowych. Pierwsze testy wykonane w Danii przyniosły obiecujące rezultaty. Dzięki zdobytym doświadczeniom wprowadzono pewne poprawki w konstrukcji urządzenia. Kolejnym etapem było wykonanie pomiarów testowych w Polsce.

Uzyskane wyniki

Pomiary wykonano na torach kolejowych jednej ze stacji w Krakowie. Wybrane zostały dwie lokalizacje dla na-



7. Schemat stopy obciążającej

wierzchni o podkładach drewnianych oraz strunobetonowych.

Na wykresach 10 i 11 przedstawiono wartości ugięcia w zależności od przyłożonej siły. Jak widać wzrost ugięcia jest wprost proporcjonalny do wzrostu siły. W przypadku nawierzchni o podkładach drewnianych, przy sile około 85 kN zarejestrowano ugięcie ponad 2.2 mm, podczas gdy dla podkładów strunobetonowych dla tej samej siły, wartość ugięcia jest niemal o połowę niższa. Jest to zrozumiałe, ze względu na wyższą sztywność strunobetonu niż drewna. Ponadto widoczny jest liniowa zależność pomiędzy wartością siły a ugięciem, co pozwala wyznaczyć sztywność nawierzchni.

Kolejne wykresy numer 12 i 13, dzięki funkcji urządzenia „Time history”, przedstawiają wartości siły i ugięcia w czasie dla dwóch maksymalnych wartości siły 37.79kN oraz 80.75kN.

Urządzenie FWD posiada w standardzie minimum 9 czujników przemieszczeń. W naszym przypadku zastosowano 14 geofonów. W ten sposób uzyskujemy informację jak szyna ugina się na pewnym odcinku, a nie tylko bezpośrednio pod obciążeniem, uzyskując przy tym tak zwaną czasę ugięcia. Takie dane uzyskane w pomiarach wykonywanych na nawierzchni dróg samochodowych są wykorzystywane do oceny nośności podłoża jak i nawierzchni jako całości. W tym celu wykorzystywana jest tak zwana metoda „back calculation” (metoda analizy wstecznej). Polega ona na zasymulowaniu w programie komputerowym ugięcia pod obciążeniem i metodą iteracyjną program tak dobiera moduły sztywności/sprężystości warstw konstrukcji nawierzchni do momentu uzyskania wartości ugięć równych bądź zbliżonych do tych uzyskanych podczas pomiaru.

Podsumowanie

Dotychczas przeprowadzone pomiary testowe potwierdzają, że FWD może być stosowany również do pomiarów na nawierzchni szynowej. Uzyskane wyniki są realistyczne, zarówno praca czujników jak i rejestracja wartości przebiegają bez większych zakłóceń. Pewne analizy uzyskanych wyników zostały już wykonane, jednak wymagają dalszych testów terenowych, w szczególności na różnych typach nawierzchni. Konieczne jest uzyskanie powtarzalności wyników oraz uzyskanie numerycznego/matematycznego modelu nawierzchni odwzorowującego uzyskiwane wyniki pomiarów terenowych.



8. Urządzenie pomiarowe FWD podczas pomiarów

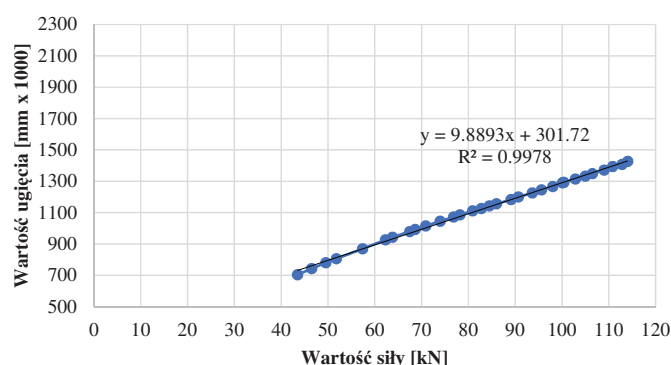


9. Rozmieszczenie czujników (geofonów) do pomiaru ugięć

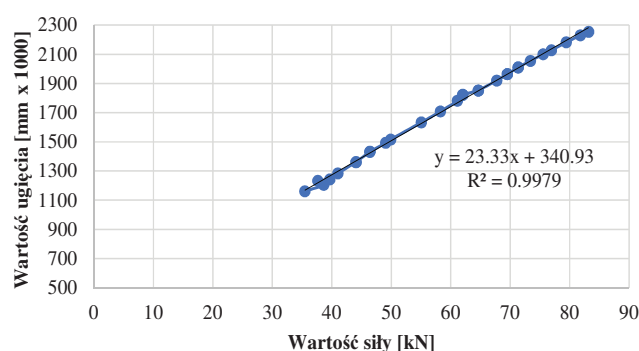
Dalsze prace nad urządzeniem i metodą pomiaru/interpretacji są prowadzone, jednak już dzisiaj można powiedzieć, że uzyskiwane wyniki są obiecujące. ◀

Materiały źródłowe

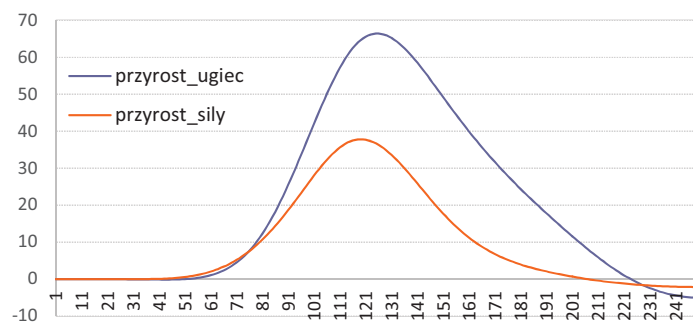
- [1] FRA report RR04-03, A Preliminary Design of a System to Measure Vertical Track Modulus from a Moving Railcar, January 2004, <http://www.fra.dot.gov/downloads/-Research/-rr0403.pdf>
- [2] Li D., R. Thompson, S. Kalay, Development of Continuous Lateral and Vertical Track Stiffness Measurement Techniques, Proceedings Railway Engineering, London 2002.
- [3] Sussmann T.R. „Track Geometry and Deflection from Unsprung Mass Acceleration Data” Proceedings from Railway Engineering Conference, London 2007
- [4] US Department of Transportation (Shane Farritor) „Real-time measurement of truck modulus from a moving car” DOT/FRA/ORD-05/2005
- [5] Wangqing, Z. Geming, Z. Kaiming, L. Lin, Development of Inspection Car from Measuring Railway Track Elasticity, Proceedings from 6th International Heavy Haul Conference, Cape Town 1997
- [6] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów, Załącznik do Zarządzenia nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30.04.2015 roku
- [7] M. Krużyński, E. Kwiatkowska, J. Zwolski, Badania dynamiczne toru kolejowego, Przegląd komunikacyjny 11/2012.
- [8] Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D-1), załącznik do zarządzenia nr 14/2008 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe s.a. z dnia 18 maja 2005r.
- [9] J. Sołkowski, D. Kudła, Wykonawstwo stref przejściowych do obiektów mostowych i Aspekty modelowania numerycznego oddziaływania pojazdnawierzchnia- Podtorze, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne; Drogi Kolejowe 2013 (23-25.10.2013) ; Krynica Zdrój, Polska



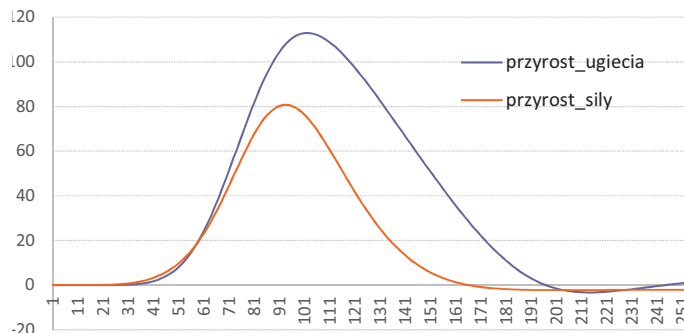
10. Wykres ugięć szyny w zależności od wartości przyłożonej siły – nawierzchnia z podkładem drewnianym. Szywność nawierzchni wynosi 97.63 kN/mm



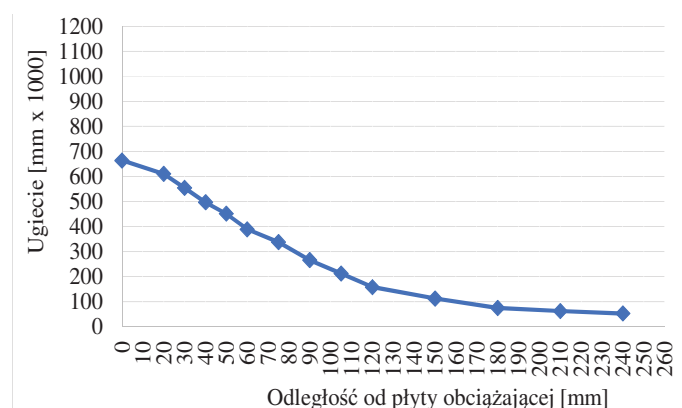
11. Wykres ugięć szyny w zależności od wartości przyłożonej siły – nawierzchnia z podkładem strunobetonowym. Szywność nawierzchni wynosi 43.7 kN/mm



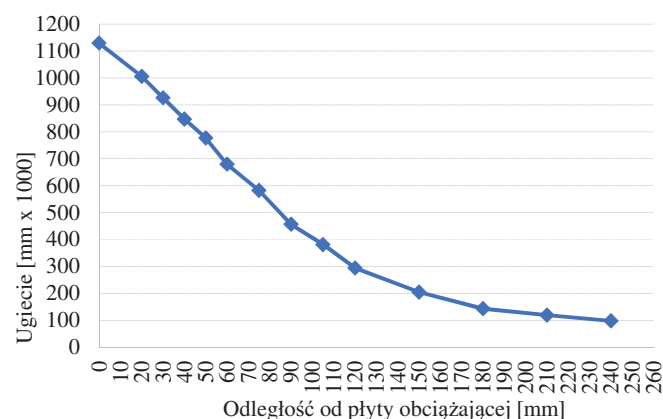
12. Wykres przyrostu obciążenia i ugięcia w czasie dla siły 37.79kN



13. Wykres przyrostu obciążenia i ugięcia w czasie dla siły 80.75kN



14. Czasza ugięcia (wartości ugięć) zmierzone na 14 czujnikach (geofo-nach) dla siły 37.79kN



15. Czasza ugięcia (wartości ugięć) zmierzone na 14 czujnikach (geofo-nach) dla siły 80.75kN