

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

im. Jarosława Dąbrowskiego

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I GEODEZJI



ROZPRAWA DOKTORSKA

WPLYW PARAMETRÓW PODPÓR BLOKOWYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ BEZPODSYPKOWEJ NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ

Autor: mgr inż. Dominik Wiesław Pokropski

Promotor pracy: dr hab. inż. Włodzimierz Idczak, prof. WAT

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Rogojasz

Warszawa, 2021

Serdeczne podziękowania składam:

Promotorowi

Panu dr. hab. inż. Włodzimierzowi Idczakowi, prof. WAT
*za ogromne wsparcie dydaktyczne, poświęcony czas oraz cenne uwagi
udzielone podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej*

Promotorowi pomocniczemu

Panu dr. inż. Grzegorzowi Rogojszowi
za wszelkie porady, konsultacje oraz wsparcie w przygotowaniu rozprawy doktorskiej

Panu Radosławowi Stachowiczowi

*oraz całej firmie PORR S.A.
za wsparcie logistyczne podczas przygotowania badań laboratoryjnych*

STRESZCZENIE PRACY W JĘZYKU POLSKIM

Temat:

WPLYW PARAMETRÓW PODPÓR BLOKOWYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ BEZPODSYPKOWEJ NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ.

Autor: Dominik Wiesław Pokropski

Promotor pracy: dr hab. inż. Włodzimierz Idczak, prof. WAT

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Rogojsz

W pracy sprawdzono oddziaływanie parametrów wytrzymałościowych podpór blokowych, wykonanych z mieszanek betonowych z dodatkami w postaci włókien do betonu, na nawierzchnię kolejową bezpodsypkową.

Podczas analizy literatury przedmiotu wykazano niezidentyfikowany dotychczas problem wpływu podpory blokowej na płytę torową. W pracy wskazano uszkodzenia konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej powstałe na liniach kolejowych wykonanych w różnych wariantach konstrukcji. Schemat uszkodzeń dla poszczególnych wariantów jest podobny i dotyczy przede wszystkim spękań w pobliżu podpór blokowych. W przeanalizowanych tekstach źródłowych jako główne przyczyny uszkodzenia konstrukcji nawierzchni wskazano wadliwie wykonaną podbudowę czy też błędy w wykonywaniu odwodnienia. W żadnym z opisanych przypadków nie uwzględniono możliwości wzmocnienia wytrzymałości podpory blokowej poprzez stosowanie dodatku do betonu w postaci włókien jako sposobu na ograniczenie występowania uszkodzeń. Sformułowano następującą tezę rozprawy: zmiana parametrów betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych poprzez zastosowanie włókien do betonu ma korzystny wpływ na konstrukcję bezpodsypkowej nawierzchni kolejowej z uwagi na poprawę wytrzymałości na naprężenia pochodzące od sił pionowych.

Z uwagi na niewielką bazę dokumentów normalizacyjnych, podczas przygotowywania wariantów mieszanek posłużono się specyfikacjami technicznymi oraz zaleceniami producentów. Przygotowano cztery warianty podpór blokowych – referencyjny bez dodatku włókien oraz trzy warianty z włóknami: stalowymi, polimerowymi oraz szklanymi, dozowanymi według zaleceń producenta.

W trakcie realizacji tematu stworzony został model próbek laboratoryjnych umożliwiający analizę wytrzymałości konstrukcji nawierzchni poddanych oddziaływaniu sił pionowych. Podczas pracy badawczej wykonano elementy odwzorowujące podpory

blokowe w skali. Wymiary próbek laboratoryjnych stanowiły 30% wymiarów rzeczywistych badanego elementu. Po upływie okresu dojrzewania betonu, podpory umieszczono w formie wypełnionej betonem wykorzystywanym do wykonywania płyty torowej. Tak przygotowane próbki oddające układ warstw konstrukcji dojrzewały w warunkach normowych. Następnie poddano je badaniom wytrzymałościowym. Celem określenia parametrów betonów wykonano również próbki sześciennie i walcowe. Określono parametry betonu takie jak konsystencję, wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, mrozoodporność, a także wytrzymałość zespolenia na rozłupywanie oraz na odrywanie metodą pull-off.

Celem weryfikacji badań laboratoryjnych przygotowano model obliczeniowy w oparciu o metodę elementów skończonych i program Autodesk Robot Professional. W programie zamodelowano nawierzchnię o rzeczywistych wymiarach, wraz z obciążeniem o wartości i rozstawie zgodnym z parametrami wybranej lokomotywy. Wykorzystano parametry materiałów otrzymane podczas badań laboratoryjnych. Analiza modelu numerycznego miała za zadanie sprawdzenie czy rezultaty niszczących badań wytrzymałościowych prowadzonych dla wycinka nawierzchni znajdują potwierdzenie w skali całej konstrukcji.

W rozprawie sformułowano wnioski cząstkowe dotyczące wpływu dodatku włókien do betonu na parametry wytrzymałościowe betonu oraz na połączenie podpory blokowej z płytą torową. Do weryfikacji modelu laboratoryjnego wykorzystano analizę numeryczną. Sprawdzone czy wnioski sformułowane podczas badań laboratoryjnych są zasadne w skali całej konstrukcji. Zależność pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi podpory blokowej, a poprawą rozkładu naprężeń w konstrukcji została potwierdzona.

W podsumowaniu pracy sformułowano wniosek końcowy dotyczący potwierdzenia postawionej tezy rozprawy. Pozytywny wpływ dodatku do betonu w postaci włókien na rozkład naprężeń w płycie torowej podnosi trwałość konstrukcji nawierzchni. Prognozowane wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni pozwala ograniczyć konieczność prac naprawczych, a co za tym idzie zmniejsza nakłady niezbędne na utrzymanie linii kolejowej.

STRESZCZENIE PRACY W JĘZYKU ANGIELSKIM

Thesis summary

Subject:

INFLUENCE OF PARAMETERS OF BLOCK SUPPORTS ON THE STRENGTH OF THE BALLASTLESS RAILWAY SURFACE.

Author: Dominik Wiesław Pokropski

Supervisor: dr hab. inż. Włodzimierz Idczak, prof. WAT

Auxiliary supervisor: dr inż. Grzegorz Rogojsz

The study checked the impact of the strength parameters of block supports, made of concrete mixtures with additives in the form of concrete fibers, on the ballastless railway track.

The analysis of source literature revealed a previously unidentified problem of the influence of the block support on the track slab. Thesis shows damage to the slab pavement structure on railway lines made in different variants of the structure. The damage pattern for individual variants is similar. It concerns mainly cracks near the block supports. In the analyzed literature, the main causes of damage to the pavement structure were indicated as defective substructure or mistakes in the execution of drainage. In none of the cases described was the possibility of increasing the strength of the block support by using a concrete additive in the form of fibers as a way to reduce the occurrence of damage. The following thesis was formulated: changing the parameters of concrete used for the production of block supports by the use of fibers for concrete has a beneficial effect on the structure of the slab-free railway surface due to the improvement of the resistance to stresses resulting from vertical forces.

Due to the small base of standardization documents, technical specifications and manufacturers' recommendations were used when preparing the variants of mixtures. There were prepared four variants of block supports - the reference one without the addition of fibers, and three variants with fibers: steel, polymer and glass, dosed according to the recommendations of manufacturers.

Model of laboratory samples was created that allows the analysis of the strength of pavement structures subjected to the action of vertical forces. During the research work,

elements were made representing the block supports on the scale. The dimensions of the laboratory samples constituted 30% of the actual dimensions of the tested element. After the maturation period of the concrete, the supports were placed in the form filled with the concrete used to make the track slab. The samples prepared in this way, reflecting the structure of the structure layers, matured under standard conditions. Then they were subjected to endurance tests. In order to determine the concrete parameters, there were also made cubic and cylindrical samples. There were determined concrete parameters such as consistency, compressive strength, modulus of elasticity, frost resistance, as well as splitting strength and pull-off strength of the composite.

In order to verify the laboratory tests, a computational model was prepared based on the finite element method and the Autodesk Robot Professional program. The program modeled a surface with real dimensions, along with a load with a value and spacing consistent with the parameters of the selected locomotive. There were used parameters of the materials obtained during laboratory tests. The analysis of the numerical model was to check whether the results of the destructive strength tests conducted for the pavement section are confirmed on the scale of the entire structure

Partial conclusions were formulated in the thesis. They confirmed the influence of the addition of fibers to concrete on the strength parameters of concrete and on the connection of the block support with the track slab. It was checked whether the conclusions drawn during the laboratory tests are justified on the scale of the entire structure. The relationship between the block support strength parameters and the improvement of the stress distribution in the structure has been confirmed.

In the summary of the work, a final conclusion was formulated. They contain the confirmation of the thesis. The positive effect of the concrete additive in the form of fibers on the stress distribution in the track slab increases the durability of the track structure. Extending the life of the pavement allows to reduce the need for repair works, and reduces the cost necessary for the maintenance of the railway line.

Spis treści

Wstęp	11
1 Charakterystyka nawierzchni niekonwencjonalnych	13
1.1 Zasadność budowy nawierzchni bezpodсыpkowych.....	13
1.2 Problemy zidentyfikowane w nawierzchniach bezpodсыpkowych.....	15
2 Wymagania konstrukcyjne dla nawierzchni bezpodсыpkowych.....	22
2.1 Metodologia badań	23
2.2 Opis parametrów geometrycznych oraz materiałowych elementów konstrukcji nawierzchni bezpodсыpkowej.....	25
2.3 Obciążenie nawierzchni siłą pionową	32
3 Projektowanie betonu	36
3.1 Opis projektowania i dobór materiałów	36
3.2 Projekt betonu do wykonywania płyty torowej.....	41
3.3 Projekt betonu dla podpór blokowych.....	42
4 Badania laboratoryjne.....	47
4.1 Metodyka badań	47
4.2 Konsystencja mieszanki	48
4.3 Wytrzymałość na ściskanie	49
4.4 Badanie mrozoodporności betonu	60
4.5 Oznaczenie modułu sprężystości betonu.....	71
5 Badania połączenia elementów nawierzchni kolejowej	75
5.1 Sprawdzenie wytrzymałości na rozłupywanie	75
5.2 Badanie pull-off.....	79
5.3 Sprawdzenie wytrzymałości na rozciąganie przekroju poprzecznego nawierzchni kolejowej bezpodсыpkowej	83
5.4 Sprawdzenie wytrzymałości na rozciąganie przekroju podłużnego nawierzchni kolejowej bezpodсыpkowej	92
6 Modelowanie numeryczne.....	104
6.1 Wprowadzenie.....	104
6.2 Obliczenie reakcji podporowych.....	105

6.3	Modelowanie obciążenia nawierzchni bezpodsypkowej	107
6.4	Wnioski	116
6.5	Porównanie wyników badań laboratoryjnych i analizy numerycznej.....	118
7	Podsumowanie i wnioski końcowe	123
8	Literatura	127

Wstęp

W pracy zdefiniowano problem zależności pomiędzy właściwościami betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych, a wytrzymałością konstrukcji nawierzchni bezpodсыpkowej na obciążenia pochodzące od przejeżdżającego pociągu. Do składowych obciążenia pochodzących od pojazdu kolejowego należy siła pionowa uzależniona od ciężaru pojazdu oraz poziome siły występujące przy przyspieszaniu lub hamowaniu pojazdu. Dodatkowo, na łukach poziomych występuje siła odśrodkowa działająca na boczną powierzchnię główki szyny. W niniejszej pracy rozpatrywano pionową składową obciążenia taborem kolejowym. Wytrzymałość nawierzchni ma bezpośredni wpływ na nakłady, jakie zarządca infrastruktury musi ponieść podczas eksploatacji linii kolejowej o konstrukcji bezpodсыpkowej. W związku z coraz częstszym wykorzystaniem tego typu nawierzchni w Polsce, weryfikacja parametrów każdego z elementów nawierzchni jest zagadnieniem aktualnym.

Celem pracy jest udowodnienie tezy, którą postawiono w rozdziale drugim, po przedstawieniu zalet konstrukcji bezpodсыpkowej i wykazaniu tego, że istnieje możliwość udoskonalenia tego typu nawierzchni. W związku z tym w pracy analizowano zmiany naprężeń w konstrukcji nawierzchni bezpodсыpkowej ze względu na dodatek włókien do betonu w podporach blokowych. Wiele miejsca poświęcono wpływowi tych dodatków na zmianę wytrzymałości całej nawierzchni na rozciąganie oraz na rozkład naprężeń w płycie.

W trakcie przygotowywania niniejszej pracy przeprowadzono analizę literatury branżowej zarówno w języku polskim, jak i zagranicznej. Przegląd literatury objął zarówno pozycje książkowe, artykuły naukowe, jak i specyfikacje techniczne oraz normy i wytyczne z zakresu bezpodсыpkowych nawierzchni kolejowych. Szczególną uwagę poświęcono zapisom charakteryzującym różne typy konstrukcji oraz materiały dopuszczone do wbudowania w nawierzchnię kolejową.

Wykazane w literaturze uszkodzenia wynikające z eksploatacji nawierzchni w znacznej mierze dotyczą zniszczeń na styku podpora blokowa-płyta torowa. Możliwość zmęczenia materiału wymusza konieczność równomiernego rozkładu naprężeń w płycie. Zapewni to rozłożenie naprężeń na całej powierzchni podbudowy, co ograniczy zjawisko jej osiadania.

Wpływ na trwałość nawierzchni mają parametry wytrzymałościowe poszczególnych jej elementów. Dotychczas opracowane rozwiązania przewidują wykorzystanie włókien do betonu podczas wykonywania płyty torowej. Specyfikacje i dokumenty normalizacyjne dla

podpór blokowych charakteryzują przede wszystkim klasę betonu, nie skupiając się na możliwym poprawieniu parametrów konstrukcji poprzez dodanie odpowiednich włókien do materiału, z którego ten element konstrukcji nawierzchni kolejowej jest wykonany.

W kolejnym rozdziale scharakteryzowano konstrukcje nawierzchni bezpodsypkowych stosowane w Polsce. Wskazano zalety tego typu nawierzchni torowej. Wskazano również na typowe uszkodzenia zidentyfikowane podczas eksploatacji. Dotychczas w badaniach naukowych nie poświęcono uwagi wytrzymałości podpory blokowej oraz wytrzymałości połączenia podpory z płytą torową. Otwiera to zatem możliwość sprawdzenia wpływu tych parametrów na wytrzymałość całej konstrukcji.

1 Charakterystyka nawierzchni niekonwencjonalnych

W rozdziale zamieszczono krótką charakterystykę nawierzchni bezpodсыpkowych. Przedstawiono, w jakim celu wprowadzono do eksploatacji ten rodzaj nawierzchni. Następnie dokonano podziału nawierzchni oraz zamieszczono krótki opis trzech systemów. Rozdział zawiera opis uszkodzeń wykrytych w nawierzchniach wraz z możliwymi przyczynami ich powstania.

1.1 Zasadność budowy nawierzchni bezpodсыpkowych

Od początku budowy i eksploatacji dróg kolejowych w konstrukcjach nawierzchni kolejowych i nawierzchni miejskich systemów szynowych stosowano przeważnie podkłady belkowe lub blokowe, stanowiące wraz z szynami i elementami przytwierdzenia ruszt torowy sprężyste posadowiony na podsypce tłuczniowej.

Podstawową wadą konstrukcji podсыpkowej jest narastanie w czasie nierówności toru. Prowadzi to do konieczności wykonywania wysoce kosztownych prac utrzymaniowych. Ponadto, na czas prowadzenia remontu niezbędne są zamknięcia odcinka linii kolejowej, a co za tym idzie – zmiany rozkładów jazdy.

Wzrost prędkości pociągów, zwiększane naciski na oś, a także konieczność poprawy efektywności ekonomicznej spowodowały, że co raz częściej zaczęto stosować bezpodсыpkowe systemy konstrukcji nawierzchni szynowych [1].

Podstawowe zalety tego rozwiązania stanowi wysoka jakość stosowanych materiałów oraz zdecydowanie większa wytrzymałość w porównaniu do podsypki tłuczniowej. Rozwiązanie to charakteryzuje się również wysoką odpornością na czynniki atmosferyczne – wodę oraz ujemne temperatury. Konstrukcja bezpodсыpkowa zapewnia dobre odprowadzenie wód opadowych, a w konsekwencji podnosi stabilność i nośność podłoża gruntowego. Z powodu mniejszej wysokości konstrukcji, większość tuneli metra na świecie wykonana jest w technologii bezpodсыpkowej [11]. Wykorzystanie nawierzchni bezpodсыpkowych umożliwia również całkowitą integrację nawierzchni kolejowej i drogowej. Poprawia to komfort jazdy oraz podnosi trwałość zarówno drogi samochodowej jak i kolejowej [65].

Podczas wieloletnich badań nad liniami dużych prędkości zauważono, że przy prędkościach około 275 km/h i większych, siły aerodynamiczne powstające pomiędzy górną powierzchnią nawierzchni a spodem pociągu powodują wydmuchiwanie pojedynczych kamieni z nawierzchni [12]. Tłuczeń, który dostanie się pomiędzy obręcz koła a główkę szyny powoduje powstawanie w tym miejscu punktowych uszkodzeń zarówno na kole, jak

i na szynie. Wymusza to zwiększenie częstości napraw taboru kolejowego. Kamienie mogą zniszczyć również części układu jezdnego i hamulcowego oraz podpodłogowe anteny Europejskiego Systemu Sterowania Pociągiem (European Train Control System, ETCS) [9]. Skutkiem tego było wdrożenie nawierzchni bezpodsypkowych na linie dużych prędkości. Eliminuje ona praktycznie wszystkie opisane wyżej problemy. Na fotografii poniżej przedstawiono obręcz koła z widocznymi miejscami uszkodzenia powstałymi od tłuczni kolejowego.



Fot. 1.1. Uszkodzenie obręczy kół spowodowane tłuczniem (fotografia własna)

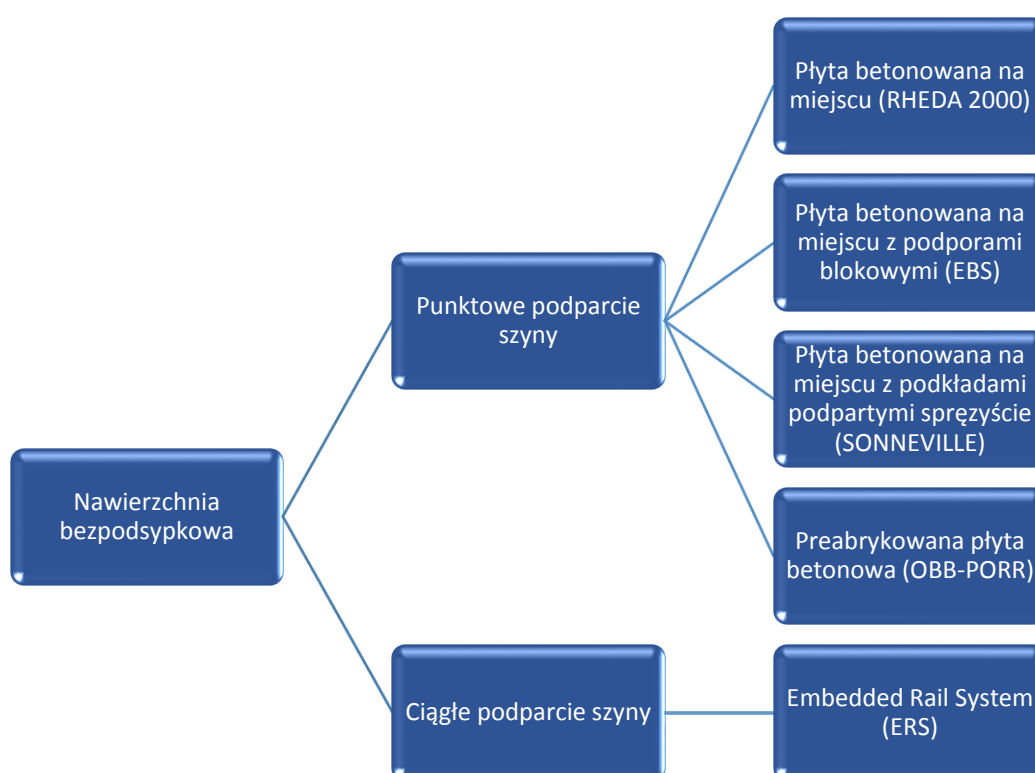
W rezultacie, w ciągu ostatnich 10–15 lat zaczęto coraz częściej wykorzystywać nawierzchnię o konstrukcji bezpodsypkowej. Pierwotnie ten typ nawierzchni wykorzystywano punktowo (w tunelach, na mostach, na odcinkach torów blisko stacji kolejowych). Obecnie jest to standardowa technologia dla linii o wysokich wymaganiach i dużych obciążeniach.

Rozpowszechnienie stosowania tego typu nawierzchni niesie za sobą coraz częściej zauważane problemy podczas eksploatacji linii dotyczące trwałości elementów betonowych: podpory blokowej i płyty torowej oraz wytrzymałości zespolenia tych elementów. Zagadnienie to dotyczy zarówno systemów prefabrykowanych, jak i konstrukcji wykonywanych w miejscu wbudowania [10], [15].

1.2 Problemy zidentyfikowane w nawierzchniach bezpodсыpkowych

W ostatnich dziesięcioleciach wykształciły się trzy główne rozwiązania systemów nawierzchni bezpodсыpkowych. Pierwszym z nich jest wykorzystanie podkładów betonowych (monoblokowe oraz dwublokowe bądź podpory blokowe), zabetonowanych w płycie torowej. Drugim rozwiązaniem jest wykorzystanie prefabrykowanych płyt betonowych układanych na wzmocnionym podłożu. Ostatnim głównym nurtem w projektowaniu jest wykorzystanie szyny z podparciem ciągłym [9].

Na diagramie poniżej przedstawiono uproszczony podział nawierzchni niekonwencjonalnych.

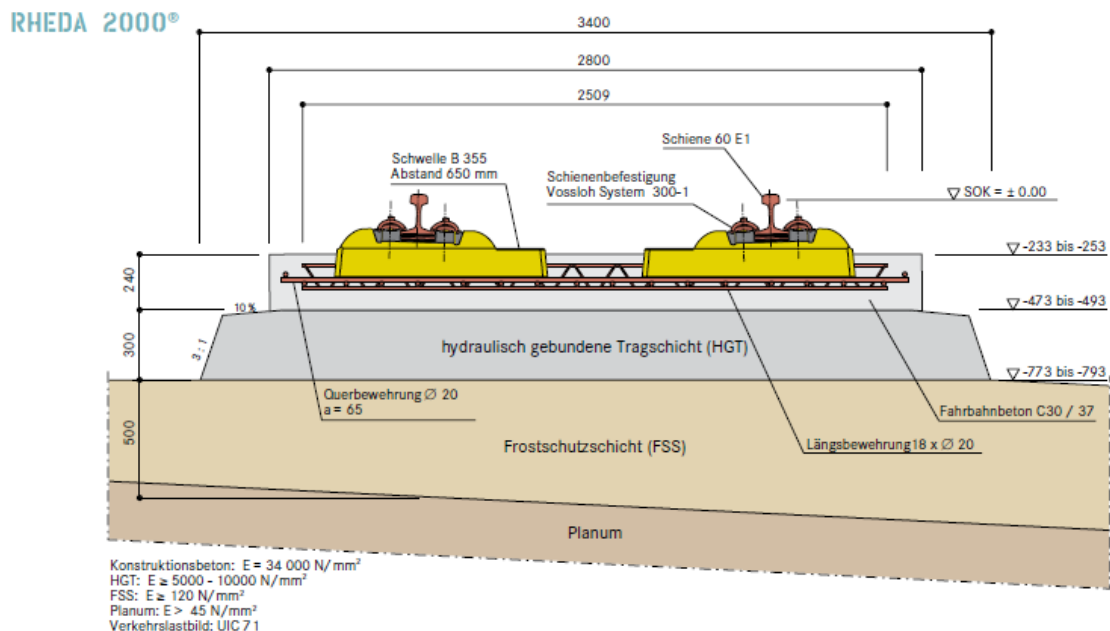


Rys. 1.1. Podział nawierzchni bezpodсыpkowych [23]

W systemach w których płyta betonowana jest na budowie, ale również na liniach z wbudowanymi płytami prefabrykowanymi, widoczne są uszkodzenia nawierzchni w postaci pęknięć płyty torowej. Poniżej zamieszczono krótki opis trzech wymienionych wyżej systemów. Każdy z wymienionych systemów podlega specyficznym uszkodzeniom, które będą opisane w kolejnym podrozdziale. Przeprowadzona analiza uszkodzeń umożliwia podjęcie próby ich wyeliminowania poprzez wzmocnienie wytrzymałości podpór blokowych oraz połączenia podpory blokowej z płytą torową.

1.2.1 System RHEDA 2000

Pod koniec lat dziewięćdziesiątych, gdy linie kolejowe dużych prędkości stawały się na terenie Niemiec coraz bardziej powszechne, opracowano system dedykowany właśnie do takich linii – RHEDA 2000 [14]. System wyróżnia się wykorzystaniem dwublokowych podkładów żelbetowych, połączonych prętami zbrojeniowymi zespalanymi w kratownicę. Przestrzeń pod podkładami oraz pomiędzy nimi wypełnia się betonem klasy C35/45. Producent dopuszcza wykorzystanie włókien do betonu, z którego wykonywana jest płyta torowa. Podbudowę płyty stanowi kruszywo bazaltowe bądź granitowe, stabilizowane cementem (Hydrogarnet Cement). Na rysunku 1.2. przedstawiono przekrój poprzeczny nawierzchni w systemie RHEDA 2000.



Rys. 1.2. Przekrój poprzeczny systemu RHEDA 2000 [14]

Warstwa podbudowy powinna zrekompensować różnice w sztywności poszczególnych warstw w kierunku podłoża. Dodatkowo powinna ona zapewnić spływ wody z konstrukcji do rowów odwadniających. Warstwa ta powinna mieć bardzo niskie wartości przepuszczalności wody (1×10^{-5} lub 1×10^{-4} m/s) [28]. Według G. Michasa, moduł odkształcenia w górnej części tej warstwy powinien wynosić $E \geq 120$ N/mm² [32].

Uniwersalność stworzonego systemu sprawiła, że system RHEDA 2000 jest obecnie najczęściej na świecie wykorzystywanym systemem nawierzchni bezpodsypkowej. Zidentyfikowane dotychczas uszkodzenia obejmują zarówno pęknięcia wzdłuż osi toru jak i zarysowania poprzeczne.



Fot. 1.2. Pęknięcia poprzeczne nawierzchni [8]



Fot. 1.3. Uszkodzenia nawierzchni przy czołach podkładów [8]

Eksperymentalny odcinek nawierzchni w Rosji, pomiędzy miejscowościami Sablino a Tosno wykonany został w systemie RHEDA 2000. Podczas kontroli w 2011 r. i 2012 r. na powierzchni płyty podporowej zauważono liczne pęknięcia. Określono je jako pęknięcia krzyżowe rozszerzające się od połowy podpory do środka płyty i do powierzchni czoła podpory. Pęknięcie, ulegające z czasem rozszerzaniu się, powoduje korozję zbrojenia, co skraca żywotność konstrukcji. Poniżej przedstawiono jedno z uszkodzeń płyty torowej na linii Sablino-Tosno. Pomimo uszkodzeń, geometryczne parametry toru, takie jak szerokość toru i przechyłka są stabilne [58].



Fot. 1.4. Uszkodzenie płyty torowej przy podporze blokowej [24]

Przedstawione na fotografiach uszkodzenia nawierzchni spowodowane są znacznymi naprężeniami w konstrukcji powstającymi na styku podkładu bądź podpory blokowej z płytą torową. Obciążenia pionowe przekazywane na płytę torową generują naprężenia na całej zabetonowanej powierzchni podpory. Dodatkowo, pęknięcia występujące przy podporach wskazują, że naprężenia nie rozkładają się równomiernie w całej konstrukcji. Wysokie naprężenia na stosunkowo małej powierzchni spodu podpory powodują uszkodzenia w płycie torowej. Wzmocnienie płyty torowej włóknami do betonu okazuje się niewystarczające. Producent systemu nie podaje informacji o możliwości wykorzystania włókien do betonu w podkładach dwublokowych. W literaturze opisujących uszkodzenia jako główną przyczynę uszkodzeń wskazano błędy w wykonaniu podbudowy.

1.2.2 System ÖBB-PORR

Austriacka nawierzchnia bezpodsypkowa, znana jako system ÖBB-PORR po raz pierwszy wykonana została w 1989 roku na zlecenie Austriackich Kolei Państwowych (Österreichische Bundesbahnen ÖBB). Jej twórcą jest przedsiębiorstwo Allgemeine Baugesellschaft - A. Porr AG. Główny element systemu stanowi sprężona płyta żelbetowa. Jest ona elementem prefabrykowanym. Standardowe wymiary płyty o masie 5 ton to [29]:

- długość 5,16 m
- szerokość 2,40 m
- wysokość 0,16 m

Długość płyty torowej dobierano uwzględniając możliwości transportu [2], [25]. Podana długość ułatwia załadunek w hali produkcyjnej, wyładunek w miejscu wbudowania, ale przede wszystkim dostosowana jest do przewozu koleją wagonami platformami typu RS. Fotografię przedstawiającą układanie przęśla zamieszczono poniżej.



Fot. 1.5. Płyty ÖBB-PORR podczas montażu [29]

Każda standardowa płyta betonowa wyposażona jest w 8 par podpór szynowych w rozstawie 0,65 m. Podpory szynowe wykonywane są jako pierwsze, z materiałów o bardzo wysokiej wytrzymałości. Producent podaje, że w przypadku podpór, klasa betonu nie powinna być niższa niż C50/6. [13]. Problemy zidentyfikowane podczas eksploatacji tego systemu są analogiczne jak dla systemów z płytą torową betonowaną na miejscu. Na fotografii poniżej zaznaczono widoczne zarysowania wzdłuż krawędzi podpór.



Fot. 1.6. Uszkodzenia nawierzchni prefabrykowanej [2]

Systemy prefabrykowane charakteryzują się większą precyzją wykonania nawierzchni, a uszkodzenia nawierzchni są zdecydowanie mniej powszechne. Jednak charakter uszkodzeń jest analogiczny jak dla wcześniej opisanego systemu. Z informacji pozyskanych od producenta systemu wynika, że do wykonywania podpór oraz płyty torowej nie są wykorzystywane włókna do betonu.

1.2.3 System EBS

Nazwa EBS to rozwinięcie skrótu Embedded Block System czyli System Podpór Blokowych. Jest to kompletny system, w którym szyny, zamiast do podkładów kolejowych, przytwierdzone są do betonowych podpór blokowych, które to zabudowane są w prefabrykowane gniazda betonowe. Elementem spajającym podpórę z prefabrykowanym gniazdem jest elastyczna masa zalewowa. Podpory blokowe zabetonowane są w płycie torowej wykonywanej w miejscu wbudowania.

Zgodnie z zapisami zawartymi w Specyfikacji Technicznej Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych dla toru bezpodsytkowego, nawierzchnia ta powinna być wykonana z betonu klasy C35/45, na kruszywie granitowym [19]. Beton użyty do nawierzchni powinien charakteryzować się niską nasiąkliwością. Parametry te nie określają jednak na przykład trwałości połączenia pomiędzy podbudową a podporami blokowymi. Zbrojenie płyty torowej wykonywane jest z prętów o średnicy 8 mm. Na fotografii 1.7. przedstawiono ułożone podpory blokowe wraz ze zbrojeniem płyty podbudowy tuż przed zabetonowaniem.



Fot. 1.7. Podpory blokowe przed zabetonowaniem [70]

System EBS wyróżnia się spośród innych systemów nawierzchni bezpodsytkowej niezależnością poszczególnych podpór blokowych. W przeciwieństwie do podkładów

dwublokowych, jakie występują na przykład w systemie RHEDA 2000, tutaj każda podpora układana jest osobno.

Największym projektem, w którym został wykorzystany system EBS na terenie Polski, jest tunel metra warszawskiego. Wieloletnia eksploatacja systemu na obu liniach metra dostarczyła informacji zarówno na temat zalet jak i wad systemu. Problemy jakie powstały podczas eksploatacji systemu zarówno w Polsce jak i na świecie to pęknięcia podpór blokowych oraz zarysowania nawierzchni [69]. Na poniższej fotografii przedstawiono zarysowania górnej części nawierzchni pomiędzy podporami blokowymi.



Fot. 1.8. Zarysowania nawierzchni [68]

Zarysowania, które zaobserwowano w górnej części płyty torowej, podczas eksploatacji linii pojawiły się na całej wysokości konstrukcji. Jako prawdopodobną przyczynę uszkodzenia wskazano wady podczas projektowania i wykonywania płyty torowej. W literaturze nie uwzględniono możliwego wpływu podpory blokowej na powstawanie uszkodzeń nawierzchni.

Przedstawione uszkodzenia nawierzchni bezpodsypkowych są dowodem na potrzebę zmiany parametrów wytrzymałościowych konstrukcji zarówno w nawierzchniach prefabrykowanych, jak i w przypadku nawierzchni, w których płyta torowa wykonywana jest na budowie. Obecnie do produkcji podpór blokowych nie wykorzystuje się włókien do betonu.

Otwiera to możliwość sprawdzenia ich wpływu na całą konstrukcję nawierzchni bezpodsypkowej.

2 Wymagania konstrukcyjne dla nawierzchni bezpodsypekowych

W poprzednim rozdziale wskazano uszkodzenia płyty torowej pojawiające się w nawierzchni bezpodsypekowej. Uszkodzenia te są przyczyną przyspieszonej degradacji całej konstrukcji. Stwierdzić można zatem, że każdy element nawierzchni ma wpływ na wytrzymałość oraz trwałość konstrukcji. W przypadku szyny oraz przytwierdzeń, wieloletnie badania wytrzymałościowe tych elementów pozwoliło określić niezbędne parametry, jakimi muszą się one charakteryzować. Większość producentów nawierzchni bezpodsypekowych zaleca stosowanie przytwierdzenia typu Vossloh. Ze względu na dobre parametry wytrzymałościowe pozwoliły one uznać szynę 60E1 jako optymalną do wykorzystania w nawierzchni bezpodsypekowej [12], [26].

Przeprowadzony na potrzeby pracy przegląd literatury branżowej wykazał ograniczone wyspecyfikowanie parametrów, jakie powinny spełniać podpory blokowe czy płyta torowa. Dokumenty na których opierają się wykonawcy zawierają najczęściej wymogi dotyczące klasy betonu, mrozoodporności czy zalecanego zbrojenia płyty torowej [60], [61], [62]. Źródła nie mówią o możliwej poprawie wytrzymałości płyty torowej w przypadku polepszenia parametrów podpór blokowych na przykład poprzez dodatek włókien do betonu. Producenci zalecają stosowanie domieszek jedynie dla płyty torowej. Z uwagi na chęć zachowania zalecanych w specyfikacjach proporcji składników betonu, modyfikację składu mieszanki przeprowadzić można poprzez dodanie różnych rodzajów włókien do betonu w podporach blokowych.

W dotychczasowych rozwiązaniach konstrukcyjnych nawierzchni bezpodsypekowej stosowano tradycyjne mieszanki betonowe, bez dodatków. Wyżej przedstawiono opisy uszkodzeń elementów betonowych pojawiających się podczas eksploatacji takich nawierzchni. W związku z tym pojawiła się możliwość poprawy wytrzymałości betonowych elementów nawierzchni bezpodsypekowej i co za tym idzie wydłużenia okresu eksploatacji tego typu nawierzchni poprzez ograniczenie opisanych uszkodzeń. W związku z powyższym sformułowano następującą tezę: **zmiana parametrów betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych poprzez zastosowanie włókien do betonu ma korzystny wpływ na konstrukcję bezpodsypekowej nawierzchni kolejowej z uwagi na poprawę wytrzymałości na naprężenia pochodzące od sił pionowych.**

Korzystny wpływ domieszek na parametry betonu pozwala założyć, że ich zastosowanie podniesie wytrzymałość podpory blokowej na naprężenia ściskające wywołane obciążeniami pionowymi. Włókna do betonu umożliwiają podniesienie

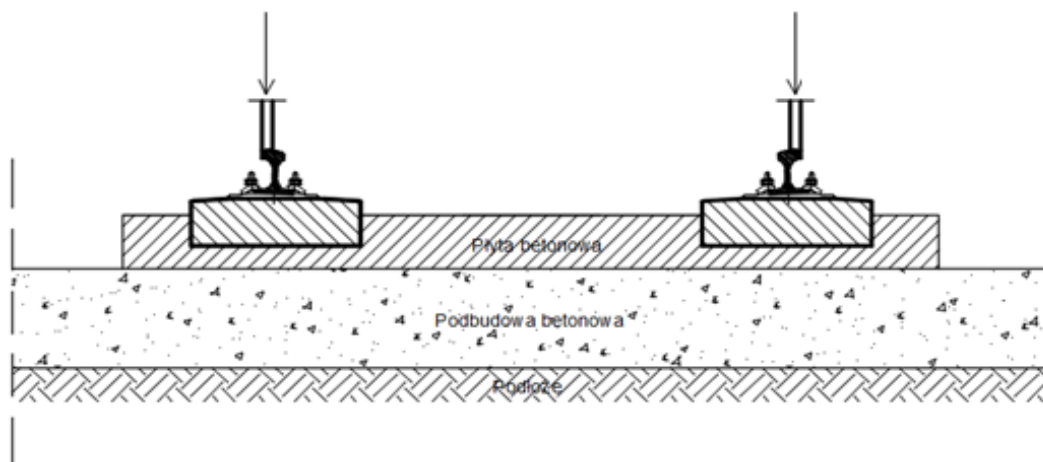
wytrzymałości na ściskanie czy rozciąganie betonu, bez zwiększenia zawartości cementu w mieszance. Dodanie włókien do betonu w podporach blokowych ma na celu poprawę parametrów wytrzymałościowych nie tylko podpór, ale przede wszystkim zmianę rozkładu naprężeń powstałych od pionowych sił nacisku taboru w płycie torowej. Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie czy modułu sprężystości materiału, z którego wykonuje się podpory blokowe zapewnić może bardziej równomierny rozkład naprężeń, a co za tym idzie – ograniczy przedstawione w poprzednim rozdziale pęknięcia płyty torowej.

2.1 Metodologia badań

Celem pracy jest sprawdzenie czy dodanie domieszek do betonu w podporach blokowych ma pozytywny wpływ na całą konstrukcję nawierzchni. Zgodnie z postawioną tezą wykorzystanie ich w podporach blokowych zmieni rozkład naprężeń w płycie torowej.

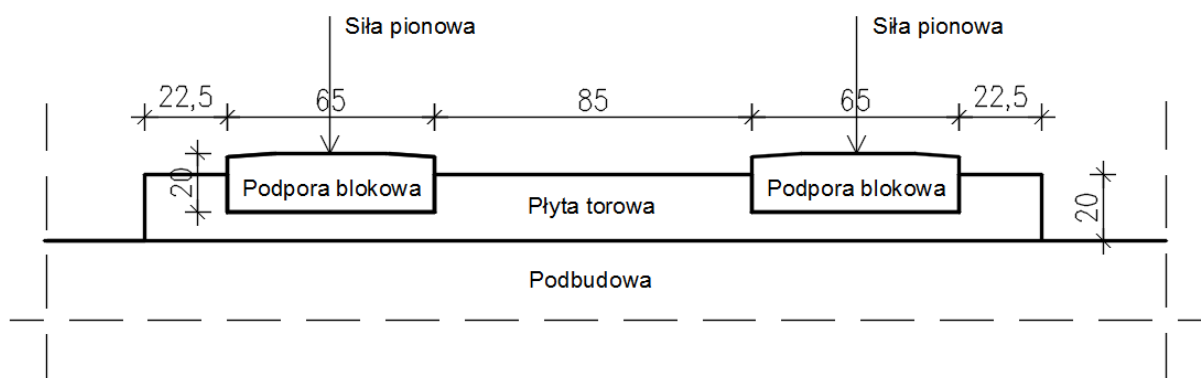
Założeniem podczas weryfikacji tezy pracy było jak najwierniejsze oddanie charakteru geometrii nawierzchni. Z uwagi na różnice w geometrii podpory blokowej czy grubości płyty betonowej w poszczególnych systemach, opracowano teoretyczny model konstrukcji nawierzchni stanowiący wypadkową pomiędzy opisanymi wcześniej systemami. Przyjęte wymiary podpory blokowej oparto o system RHEDA 2000. Jednocześnie przyjęta wysokość konstrukcji oparta jest o wymiary elementów systemu ÖBB-PORR oraz EBS. Taki dobór wymiarów wynika z konieczności wykonania próbek laboratoryjnych w skali dostosowanej do wymiarów forem dostępnych w laboratorium oraz możliwości maszyny do badań niszczących.

Na rysunku 2.1. przedstawiono przekrój poprzeczny nawierzchni bezpodsypkowej stanowiący wyjście do dalszych rozważań. Przytwierdzenia zamontowane są na podporach blokowych zabetonowanych w płycie. Płyta betonowa o grubości 20 cm ułożona jest na 30-centymetrowej podbudowie betonowej.



Rys. 2.1. Przekrój konstrukcji nawierzchni bezpodsypankowej

Zakres pracy doktorskiej obejmuje analizę połączenia podpory blokowej z płytą torową. Szczegółowe wymiary przyjętego modelu konstrukcji przedstawiono w centymetrach na rysunku poniżej.



Rys. 2.2. Model nawierzchni przyjęty do badań

Badania mające na celu sprawdzenie tezy można podzielić na dwa etapy.

Pierwszym etapem badań było sprawdzenie przygotowanych próbek w laboratorium na maszynach do badań niszczących betonu. Zaprojektowano próbki do badania wytrzymałości zespolonej konstrukcji podpory blokowej z płytą torową. Z uwagi na znaczne wymiary nawierzchni kolejowej badane próbki przygotowano w skali 0,3. Wymiary próbki laboratoryjnej stanowią 30% wymiarów modelu. Szczegóły dotyczące przygotowanych próbek wraz z wymiarami zamieszczono w dalszej części pracy.

Drugi etap badań to analiza numeryczna modelu wykorzystująca Metodę Elementów Skończonych. W modelu wykorzystano materiały, których parametry określono podczas

badań laboratoryjnych. Przygotowany model miał na celu zweryfikowanie czy wyniki badań próbek mają przełożenie dla całej konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej.

W celu zbadania zmian zachodzących w płycie torowej ze względu na wzmocnienie podpór blokowych, zaprojektowano mieszanki betonowe dla płyty torowej i podpór blokowych. Beton płyty torowej oznaczono w pracy doktorskiej symbolem Z1. Podczas wszystkich przeprowadzonych badań skład betonu Z1 pozostał niezmienny. Modyfikacje przeprowadzone dla betonów podpór blokowych polegały na dozowaniu włókien powszechnie dostępnych i wykorzystywanych w budownictwie. Przygotowano mieszanki z dodatkiem włókien stalowych, polimerowych i szklanych. Celem zbadania ich wpływu na zmianę parametrów nawierzchni przygotowano również próbki z betonu bez dodatku włókien.

Niezbędnym do przygotowania zarówno badań laboratoryjnych, jak i modelu numerycznego jest przywołanie zawartych w literaturze wymagań dla poszczególnych elementów nawierzchni bezpodsypkowej, jak i siły pionowej oddziałującej na konstrukcję nawierzchni.

2.2 Opis parametrów geometrycznych oraz materiałowych elementów konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej

Weryfikację postawionej tezy pracy przeprowadzono poprzez wykonanie próbek laboratoryjnych czy modelu numerycznego w oparciu o wymagania dla poszczególnych materiałów stosowanych w konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej. W przypadku badań laboratoryjnych sprawdzono materiały wykorzystywane do wykonania podpór blokowych i płyty torowej. Analiza numeryczna mająca na celu weryfikację tezy została przeprowadzona na modelu całej konstrukcji, z uwzględnieniem parametrów szyny oraz podbudowy.

Instrukcje wydawane przez Polskie Linie Kolejowe nie odnoszą się w sposób bezpośredni do nawierzchni bezpodsypkowych. Brak precyzyjnych przepisów dotyczy również Wspólnoty Europejskiej. Większość parametrów, jakimi powinny charakteryzować się nawierzchnie bezpodsypkowe odnaleźć można w Specyfikacjach Technicznych Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (STWiORB). Opisane w kolejnych punktach wymagania dla poszczególnych elementów konstrukcji są efektem analizy specyfikacji opracowanych dla wielu zrealizowanych już inwestycji kolejowych.

2.2.1 Podbudowa

Ze względu na dużą sztywność górnych warstw konstrukcji nawierzchni, podbudowa musi być zaprojektowana w sposób umożliwiający sprężystą pracę układu. Jednocześnie, podbudowa nie może być zbyt podatna na odkształcenia, ze względu na możliwość wystąpienia zjawiska klawiszowania w przypadku nawierzchni torowej z płyt prefabrykowanych [34]. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w materiałach producentów poszczególnych systemów, jako podbudowę projektuje się warstwę kruszywa łamanego stabilizowanego hydraulicznie [60]. Do stabilizacji kruszywa należy stosować cement portlandzki klasy 32,5 wg PN-B-19701, portlandzki z dodatkami wg PN-B-19701 lub hutniczy wg PN-B-19701 [53]. Stałość objętości cementu określono na podstawie pierścienia La Chateliera. W tabeli 2.1. przedstawiono wymagania dotyczące cementu wykorzystywanego do stabilizacji kruszywa.

Tab. 2.1. Wymagane parametry cementu stosowanego do stabilizacji podbudowy [61]

Lp.	Właściwości	Klasa cementu 32,5
1	Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach nie mniej niż:	16 MPa
2	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach nie mniej niż:	342,5 MPa
3	Początek czasu wiązania nie wcześniej niż:	60 min
4	Stałość objętości nie więcej niż:	10 mm

Do stabilizacji cementem można stosować piaski i żwiry albo mieszankę tych kruszyw. Na warstwę tę zaleca się użycie kruszywa łamanego o uziarnieniu 0-31.5 mm. Dodatkowym warunkiem jest wskaźnik filtracji, wynoszący $k \geq 0.0093$ cm/s przy stopniu zagęszczenia do $I_s \geq 1.00$. Wtórny moduł odkształcenia na górnej powierzchni wykonanej warstwy musi osiągnąć wielkość $E_2 \geq 140$ MPa.

2.2.2 Płyta torowa

Zastosowanie materiałów na płyty torowe zależy od producenta systemu. W przypadku płyt prefabrykowanych, np. w systemie ÖBB-PORR, płyty dostarczane na miejsce wbudowania wykonuje się z betonu zbrojonego siatką prętów zbrojeniowych. Płyty wykonuje się z betonu klasy C35/45 na kruszywie granitowym. Siatka zbrojeniowa zapewniająca wytrzymałość na zginanie oraz działanie sił skurczowych wykonywana jest z prętów zbrojeniowych o średnicy 8 mm. Ze względu na konieczność transportu w płycie betonowane są uchwyty stalowe. Wysokość płyty wynosi 16 cm.

W przypadku płyt torowych betonowanych na miejscu (np. RHEDA 2000, EBS) płytę torową stanowi warstwa o grubości 20–25 cm z betonu cementowego klasy C35/45 o wymaganiach przedstawionych w tabeli 2.2.

Tab. 2.2. Wymagania dla płyty torowej [63]

Lp.	Parametr	Wartość
1	Klasa wytrzymałości na ściskanie betonu	C35/45
2	Klasa ekspozycji na korozję spowodowaną karbonatyzacją według [37]	XC4
3	Klasa ekspozycji na agresję mrozową według [36]	XF1
4	Klasa ekspozycji na korozję spowodowaną chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej	XD2
5	Klasa cementu według [53]	CEM 42,5
6	Zawartość cementu w 1m ³ zagęszczonej mieszanki betonowej	≤400 kg
7	Konsystencja mieszanki betonowej	S3
8	Nasiąkliwość	≤4%
9	Wskaźnik cementowo-wodny (w/c)	≤0,5
10	Tolerancja wysokościowa płyty po związaniu mieszanki	±0.5 cm

W przypadku nawierzchni ułożonej w systemie RHEDA 2000, w dolnej warstwie płyty układa się wzmacniającą siatkę o oczkach heksagonalnych 8x10 cm z drutu stalowego ocynkowanego o średnicy \varnothing 2,2 mm, Zadaniem siatki będzie zapobieganiu powstawaniu w warstwie ścieralnej tzw. pęknięć odbitych.

Cement powinien spełniać ponadto wymagania zawarte w tabeli 2.3.

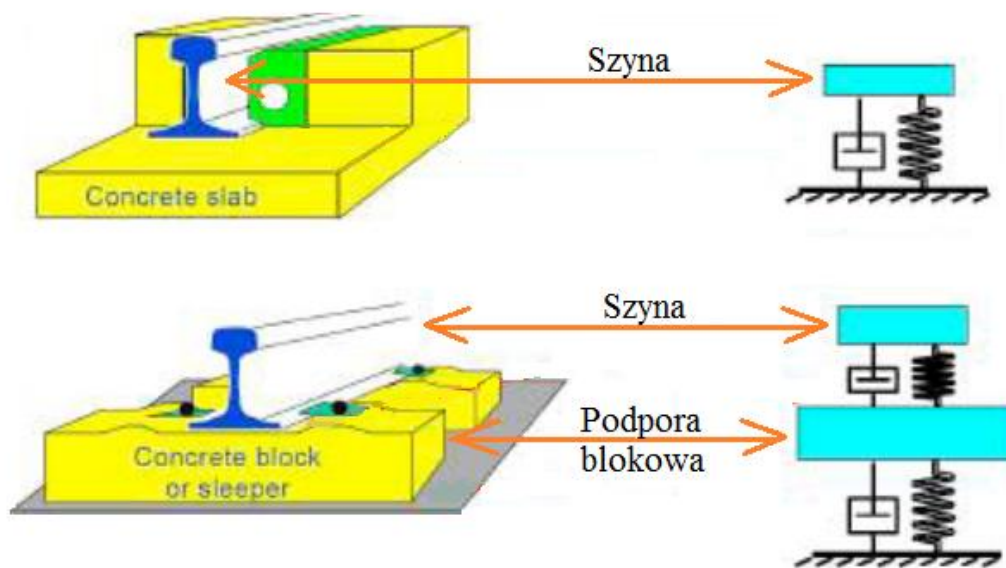
Tab. 2.3. Wymagania dla cementu [64]

Lp.	Właściwości	Klasa cementu 42,5
1	Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach nie mniej niż:	16 MPa
2	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach nie mniej niż:	42,5MPa
3	Początek czasu wiązania nie wcześniej niż:	75 min
4	Staość objętości nie więcej niż:	10 mm

Do wykonywania mieszanki betonowej należy stosować kruszywa naturalne (łamane i nie łamane) oraz sztuczne o maksymalnym wymiarze ziaren do 16 mm, posiadające właściwości odpowiadające poszczególnym kategoriom, na podstawie normy PN-EN 12620+A1:2008 oraz mieszanki tych kruszyw [45].

2.2.3 Podpora

W przypadku podpór szynowych, nawierzchnie bezpodsypkowe podzielić można na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią systemy z punktowym podparciem szyn – wykorzystujące podkłady monoblokowe, dwublokowe bądź podpory szynowe. Drugą grupę stanowią systemy z ciągłym podparciem szyny na płycie torowej [18]. Ze względu na założenia przyjęte w pracy, opisano wymagania, jakie spełniać musi materiał do wykonania nawierzchni z punktowym podparciem szyny. Na rysunku 2.3. przedstawiono obydwa sposoby podparcia szyny w torze kolejowym.



Rys. 2.3. Warianty podparcia szyny [57]

Do wykonania podpór blokowych wymagany jest beton o parametrach zawartych w tabeli 2.4.

Tab. 2.4. Wymagania dla betonu do produkcji podpór blokowych [60]

Lp.	Parametr	Wartość
1	Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach nie mniej niż:	31 MPa
2	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach nie mniej niż:	60 MPa
3	Nasiąkliwość nie więcej niż	<5%
4	Mrozoodporność	>F150
5	Ścieralność na tarczy Böhme (mm ³ /5000mm ²)	<15000

Dopuszczalne odchyłki wymiarów podstawowych podpory blokowej nie powinny przekraczać dla wysokości, długości oraz szerokości ± 5 mm. Maksymalne odchylenie powierzchni podszynowej na bloku betonowym, tj. powierzchni przylegania przekładki podszynowej, nie może różnić się więcej niż o ± 1 mm [60], [67].

Powierzchnie elementów betonowych powinny być bez rys, pęknięć, raków i miejsc niedowibrowanych oraz ciał obcych w betonie. Dopuszcza się drobne pory na pozostałych powierzchniach jako pozostałości po pęcherzykach powietrza i po wodzie, których głębokość i średnica nie przekracza 5 mm, a powierzchnia nie przekracza 10 mm². Zacieranie tych powierzchni po wyjęciu elementów z formy jest niedopuszczalne.

2.2.4 Przytwierdzenie

Zgodnie z Technicznymi Specyfikacjami Interoperacyjności (TSI), system przytwierdzeń spełniać musi sprawdzane podczas badań laboratoryjnych parametry [47]:

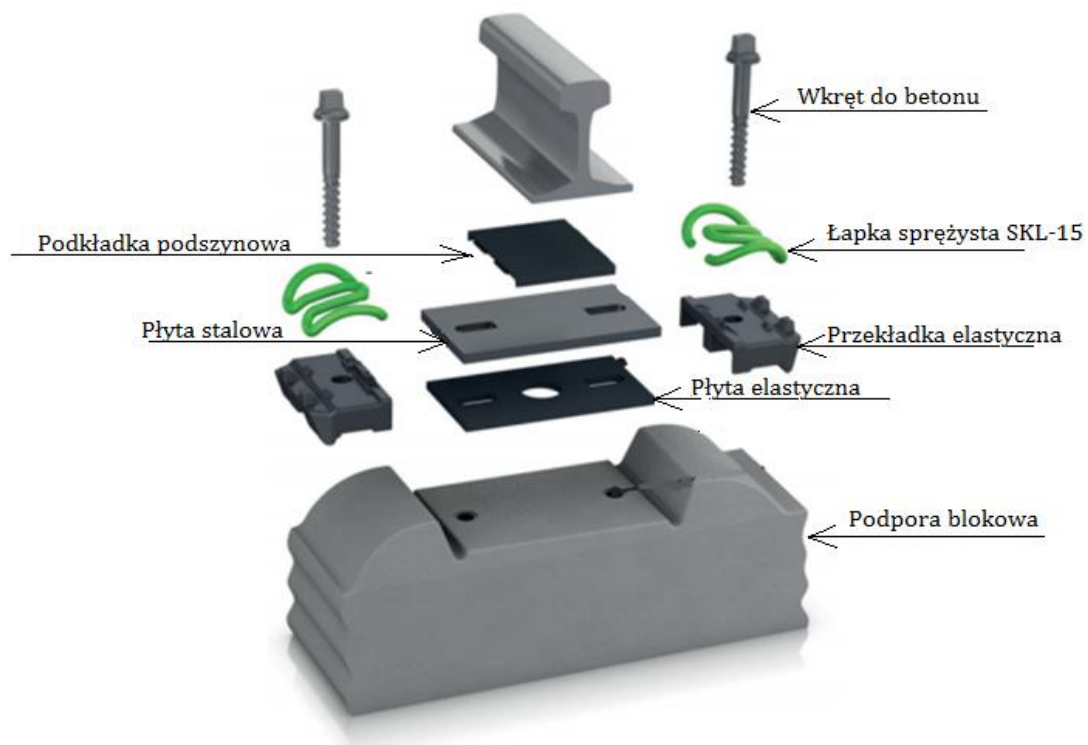
a) siła wzdłużna niezbędna do zapoczątkowania przemieszczania się szyny przez pojedyncze przytwierdzenie musi wynosić co najmniej 7 kN,

b) system przytwierdzeń musi wytrzymać przyłożenie 3 mln cykli typowych obciążeń przykładanych na ostrym łuku, tak by parametry przytwierdzenia w kategoriach siły docisku i wzdłużnej wytrzymałości toru nie zostały obniżone o więcej niż 20%.

Ponadto, norma PN-EN 13481 wymaga zapewnienia siły docisku szyny do podkładu minimum 8 kN, opór na niesprężyste przemieszczenie wzdłużne szyny w przytwierdzeniu nie mniej niż 7 kN oraz zapewnienie rezystancji toru nie mniejszą niż 5 k Ω [46].

Najpopularniejszym system wykorzystywanym w nawierzchniach bezpodsynekowych jest system Vossloh 300-1. Wykorzystywany jest on zarówno w nawierzchniach z płyt prefabrykowanych, zbudowanych z podkładów dwublokowych, jak

i podpór blokowych w elastycznej masie zalewowej. Na rysunku 2.4. przedstawiono system Vossloh eksplloatowany na liniach w których zastosowano podpory blokowe szyn.

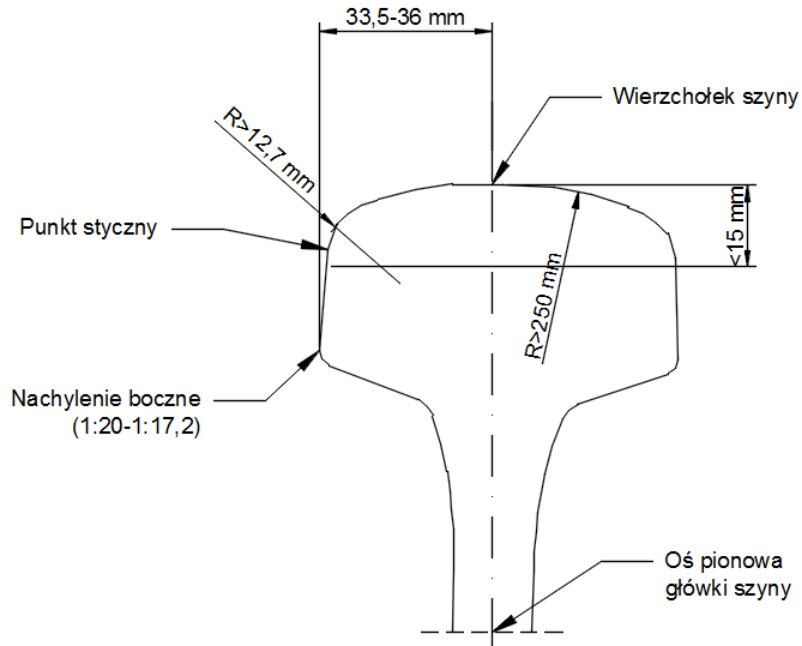


Rys. 2.4. Przytwierdzenie Vossloh 300-1 [30]

Przytwierdzenie zapewnia rozkład obciążenia od taboru na znaczną część powierzchni podkładu. Umożliwiło to przyjęcie w analizie modelu obliczeniowego w dalszej części pracy obciążenie podpory blokowej siłą powierzchniową zamiast siły skupionej.

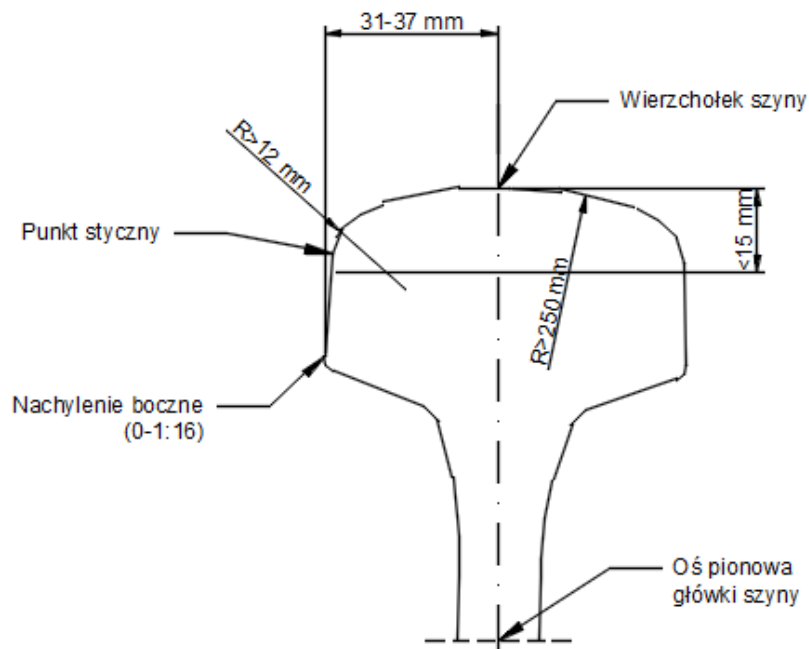
2.2.5 Szyna

Zadaniem szyny jest przenoszenie obciążeń bezpośrednio od przejeżdżającego taboru kolejowe na niższe warstwy konstrukcji. Z tego powodu jest ona narażona na największe oddziaływania dynamiczne. Wymagania Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności wskazują parametry wbudowywanych szyn z podziałem na dwie grupy. W obu przypadkach wykorzystywane są standardowo szyny Vignolesa. Poniżej przedstawiono dwie grupy szyn wskazane w TSI. Pierwszą z nich stanowią linie dużych prędkości. Rozporządzenie wskazuje na wymóg stosowania szyn UIC 60 E2. Jej parametry określone w milimetrach wskazano na rysunku 2.5 [5].



Rys. 2.5. Parametry szyny dla linii dużych prędkości [4]

Dla linii o ruchu mieszanym wymogi dotyczące stosowanych szyn kolejowych są niższe. Nie wskazano tutaj konkretnie wymaganego rodzaju wbudowywanych szyn, a jedynie sparametryzowano wymiary, jakie musi posiadać główka szyny. Na rysunku 2.6. przedstawiono wymiary główki szyny w milimetrach.



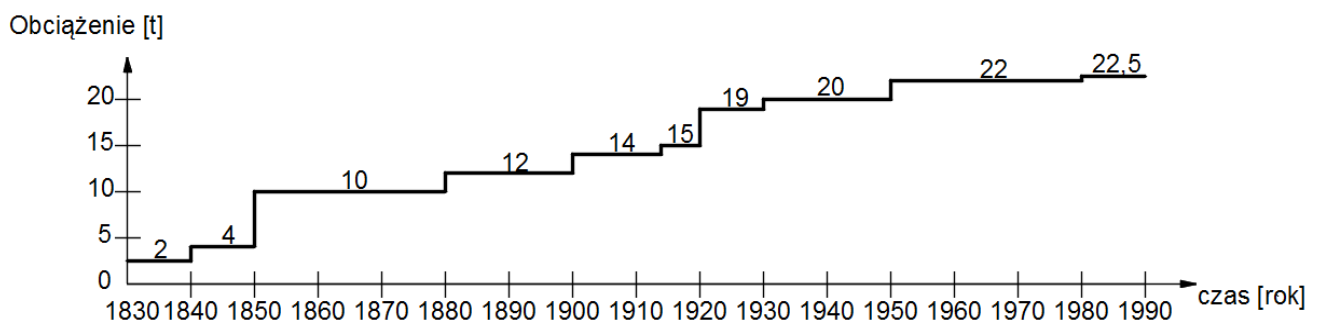
Rys. 2.6. Parametry szyny dla kolei o ruchu mieszanym [5]

Szyna kolejowa przyjęta została jako element niezmienny, nie mający wpływu na weryfikację tezy pracy doktorskiej. Do analizy numerycznej przyjęto szynę 60E1 o module Younga 210 GPa.

2.3 Obciążenie nawierzchni siłą pionową

W celu przeprowadzenia analizy wytrzymałości elementów konstrukcji nawierzchni bezpodsypankowej na obciążenie pionowe, należy przywołać zawarte w normach dopuszczalne wartości dla konstrukcji. W dalszej części pracy opisane są obciążenia wg Eurokodu. Równomiernie rozłożone naciski od osi wagonów nie powinny przekraczać 80 kN/m [3].

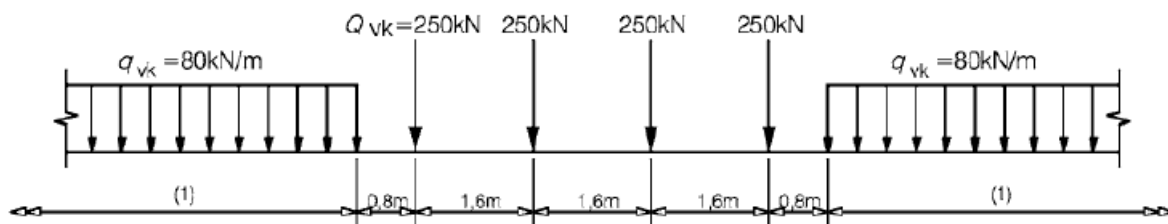
Siły pionowe działające na nawierzchnię kolejową pochodzą od taboru kolejowego. Wraz z rozwojem znaczenia transportu kolejowego wzrastały też dopuszczalne naciski na koło. W konsekwencji konstrukcja nawierzchni ciągle musiała spełniać coraz większe wymagania wytrzymałościowe. Na rysunku poniżej przedstawiono wzrost obciążeń na zestaw kołowy w trakcie historii kolei.



Rys. 2.7. Wzrost obciążeń zestawu kołowego w historii [28]

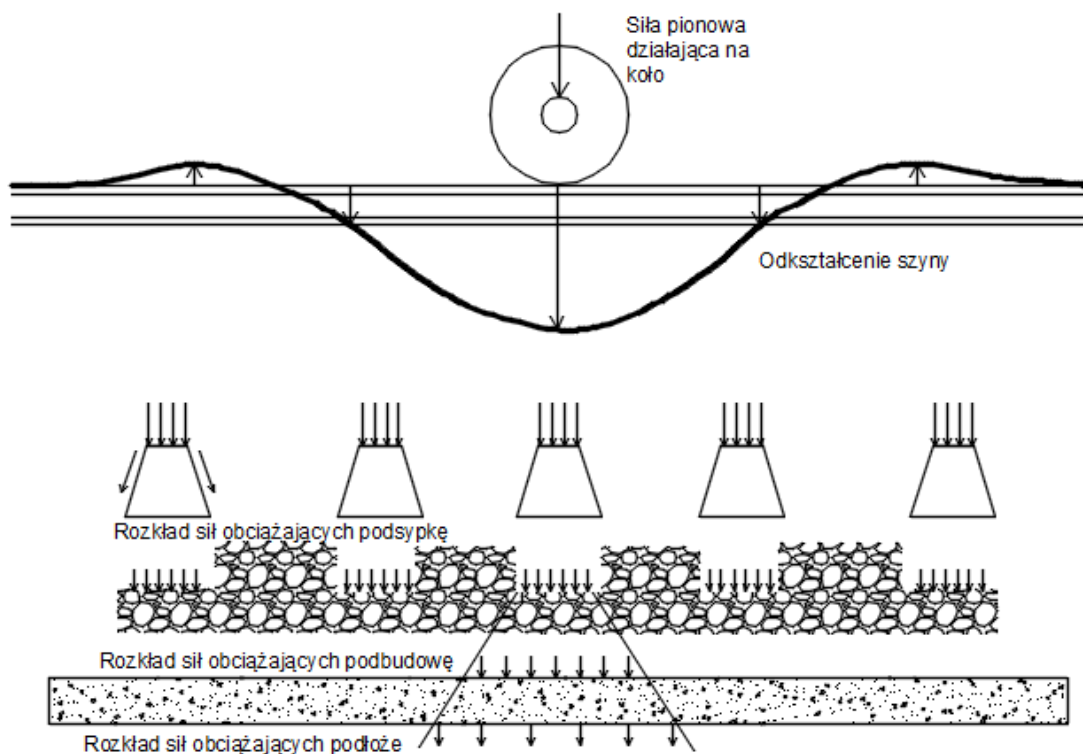
Konstrukcja nawierzchni kolejowej, jak również obiekty mostowe muszą być zaprojektowane w taki sposób, aby były zdolne przenosić pionowe obciążenia rozłożone zgodnie z następującymi modelami obciążeń, określonymi w Normie EN 1991-2: 2003:

- LM71
- SW/0
- SW/2



Rys. 2.8. Model obciążeń LM71 [39]

Producenci poszczególnych systemów nawierzchni bezpodsypkowej nie publikują danych konstrukcyjnych oraz wyników badań wytrzymałościowych. Skutkiem tego jest mocno ograniczony zakres literatury mówiący o rozkładach naprężeń oraz nośności dla tego typu konstrukcji [3]. Z uwagi na postawioną w pracy tezę niezbędne jest wskazanie modelu propagacji naprężeń od taboru kolejowego na kolejne warstwy konstrukcji. W przypadku oddziaływania sił pionowych posiłkować się należy literaturą opisującą poszczególne elementy nawierzchni kolejowej klasycznej [17]. Na rysunku 2.9. pokazany został rozkład sił w klasycznej nawierzchni kolejowej.

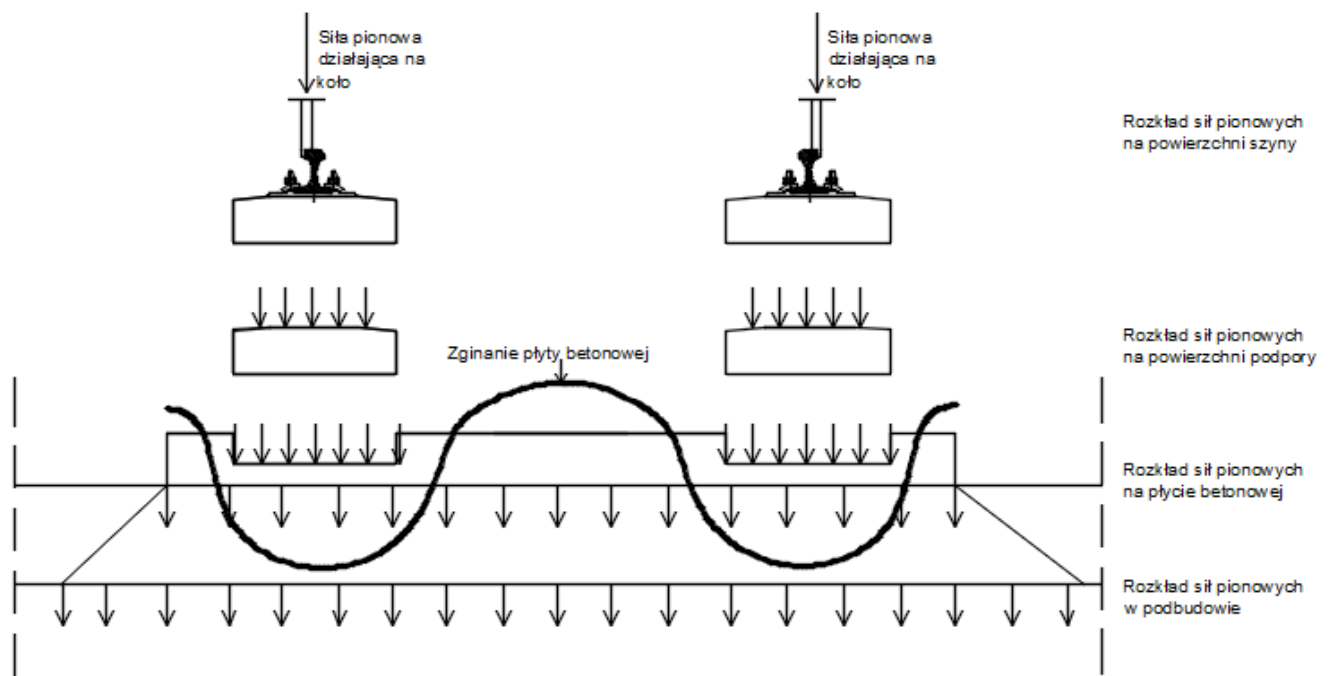


Rys. 2.9. Rozkład sił obciążających przekazywanych na kolejne elementy nawierzchni [56]

Na rysunku 2.10. przedstawiono poszczególne elementy nawierzchni kolejowej. Przy każdym z nich zaznaczono propagację sił pochodzących od elementu powyżej. Obciążenie od szyny kolejowej przekazywane jest, poprzez przytwierdzenie, na podkład kolejowy. Widoczna na rysunku pojedyncza siła rozkłada się na powierzchnię podkładu. Stąd też na podsypkę tłuczniovą siła przekazywana jest całą powierzchnią spodu podkładu. Podsypka tłuczniova zapewnia równomierny rozkład naprężeń na podtorze [24]. Zwiększenie powierzchni rozkładu siły powoduje zmniejszenie naprężeń w kolejnej warstwie.

W przypadku nawierzchni kolejowej bezpodsypkowej rozkład sił w poszczególnych warstwach konstrukcji mimo pozornych podobieństw ma inny przebieg ze względu na znacznie większą sztywność konstrukcji. Mała powierzchnia podpór blokowych w stosunku do podkładów kolejowych generuje duże naprężenia na styku podpór z płytą betonową.

Próba znalezienia bezpośredniej analogii między rozkładem sił w nawierzchni klasycznej i bezpodsypkowej spowodowała konieczność wykonania rysunku pokazującego rozkład sił w poszczególnych elementach konstrukcji tak jak dla nawierzchni klasycznej [16].



Rys. 2.10. Rozkład sił w poszczególnych warstwach konstrukcyjnych

W przypadku nawierzchni bezpodsypkowej siła pionowa od taboru przekazywana jest poprzez szynę i elementy przytwierdzenia wraz z przekładkami na podporę blokową.

Mała powierzchnia odpowiedzialna za przekazanie sił na płytę betonową powoduje powstawanie dużych naprężeń na styku podpory blokowej i płyty betonowej.

Płyta betonowa najczęściej ma szerokość około 250 cm. Na rysunku 2.10. zaznaczono siły przekazywane przez płytę betonową na podbudowę betonową. Dalej siły przekazywane są do niższych warstw konstrukcji.

W tym miejscu zauważyć należy jak istotne jest odpowiednie wykonanie podbudowy betonowej pod prefabrykowane płyty torowe. W przypadku błędów w wykonawstwie podbudowy bądź osiadania konstrukcji, płyta torowa stanowiąca element monolityczny o dużej sztywności, nie będzie podparta całą powierzchnią. Wywołuje to ryzyko bardzo szybkiego zniszczenia konstrukcji. Znaczne siły pochodzące od taboru powodują wtedy swobodne zginanie płyty betonowej. Schemat zginania płyty betonowej zaznaczono również na rysunku 2.10. Możliwe jest nawet odspojenie podpór blokowych od płyty betonowej, co skutkuje koniecznością wstrzymania ruchu oraz wymianą prefabrykowanych elementów.

Przyjęcie niepełnego podparcia płyty torowej w analizie pozwala sprawdzić, jak wytrzymałość podpory blokowej wpływa na rozkład naprężeń w płycie w warunkach laboratoryjnych. Podczas badań laboratoryjnych sprawdzono, który beton w badanym problemie będzie najlepszym materiałem do wykonania podpór blokowych.

3 Projektowanie betonu

3.1 Opis projektowania i dobór materiałów

Podstawowym celem projektowania mieszanki betonowej jest wyznaczenie ilości i proporcji jej składników tak, aby zaprojektowany beton spełniał wszystkie wymagania wytrzymałościowe. Dla betonu cementowego składnikami projektowanej mieszanki są: cement, kruszywo o dobranym stopniu uziarnienia, woda oraz dodatki i domieszki do betonu mające na celu poprawę urabialności i wytrzymałości betonu. Projektowanie mieszanki betonowej przeprowadzono w oparciu o metodę trzech równań, zakładając teoretyczne ilości poszczególnych składników. Zaprojektowaną mieszankę betonową weryfikuje się podczas badań laboratoryjnych, przed dopuszczeniem do wbudowania w obiekt.

Na potrzeby niniejszej pracy przygotowano projekt betonu wbudowywanego w płytę torową oraz projekty betonów wykorzystywanych do produkcji podpór blokowych prefabrykowanych.

Beton wbudowywany w płytę torową, oznaczany w dalszej części pracy jako Z1, musi spełniać wymagania zawarte w normach oraz specyfikacjach technicznych opracowanych dla inwestycji, w których taka płyta torowa jest wykonywana. Z racji tego, że jest to beton wbudowywany na miejscu przez wykonawcę robót, wymagania co do jego składu oraz parametrów znajdują się w wielu dokumentach przetargowych, które stanowiły podstawę opracowania receptury mieszanki. W publikacjach [36], [60], [61], [62] przedstawiono parametry, jakie musi spełniać beton.

Problemem podczas projektowania betonu wykorzystywanego do podpór blokowych był fakt, iż podpory te są elementami prefabrykowanymi. Wobec tego, projekt mieszanki stanowi tajemnicę przedsiębiorstwa. Niemniej, korzystając z informacji uzyskanych od producenta systemu ÖBB-PORR, przyjęto analogię do „Warunków Technicznych Wykonania i Odbioru Podkładów i Podrozdnic Strunobetonowych Id-101” [67]. Zgodnie z założeniami pracy dodatek do betonu stanowić będą włókna. Betony w dalszej części pracy, oznaczane będą jako:

- Z2 – beton z dodatkiem włókien stalowych,
- Z3 – beton z dodatkiem włókien polimerowych,
- Z4 – beton z dodatkiem włókien szklanych,
- Z5 – beton referencyjny, bez dodatku włókien.

W tabeli 3.1. przedstawiono parametry kruszywa i cementu wykorzystanych podczas projektowania i wykonywania mieszanek betonowych.

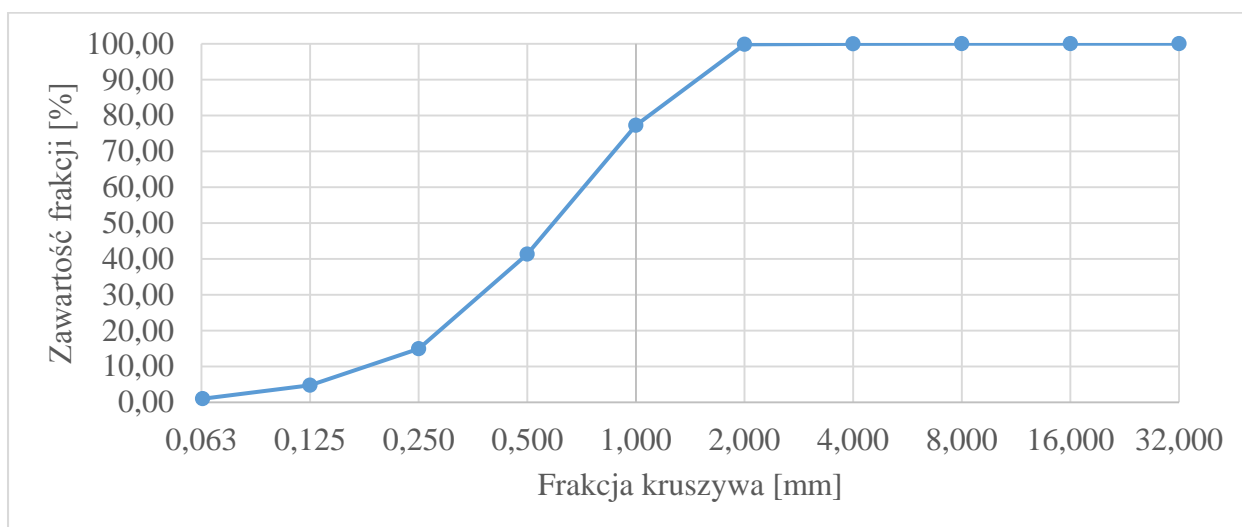
a) Kruszywo

Prace rozpoczęto od zgromadzenia zapasu kruszyw, tj. piasku 0-2 mm pochodzącego z kopalni Żabiny, granitu 2-8 mm oraz granitu 8-16 mm pochodzących z kopalni Graniczna. Dla wszystkich kruszyw wykonano analizy sitowe, których wyniki przedstawiono w tabelach 3.1., 3.2. oraz 3.3.

- piasek 0-2 mm pochodzący z kopalni Żabiny

Tab. 3.1. Wyniki analizy sitowej piasku o średnicy zastępczej 0-2 mm z kopalni Żabiny

Fracja [mm]	Próba 1		Próba 2		Próba 3		Wartości średnie:		
	Masa [g]	Zaw. [%]	Masa [g]	Zaw. [%]	Masa [g]	Zaw. [%]	Odcięta	Zaw. [%]	Rzędna [%]
0-0,063	15,30	0,92	21,00	1,23	18,00	0,88	0,063	0,01	1,01
0,063-0,125	56,20	3,39	76,40	4,46	67,30	3,29	0,125	3,71	4,72
0,125-0,25	163,30	9,85	19,60	1,53	187,50	9,15	0,250	10,18	14,90
0,25-0,5	453,30	27,33	465,80	28,18	507,90	24,80	0,500	26,44	41,33
0,5-1	581,80	35,08	604,80	35,29	766,70	37,43	1,000	35,94	77,27
1-2	396,20	23,29	345,80	20,18	497,60	24,29	2,000	22,59	99,86
2-4	2,10	0,13	2,30	0,13	3,20	0,16	4,000	0,14	99,99
4-8	0,20	0,01	0,00	0,00	0,10	0,00	8,000	0,01	100,00
8-16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,000	0,00	100,00
16-32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,000	0,00	100,00
SUMA	1658,40	100,00	1713,70	100,00	2048,30	100,00		100,00	

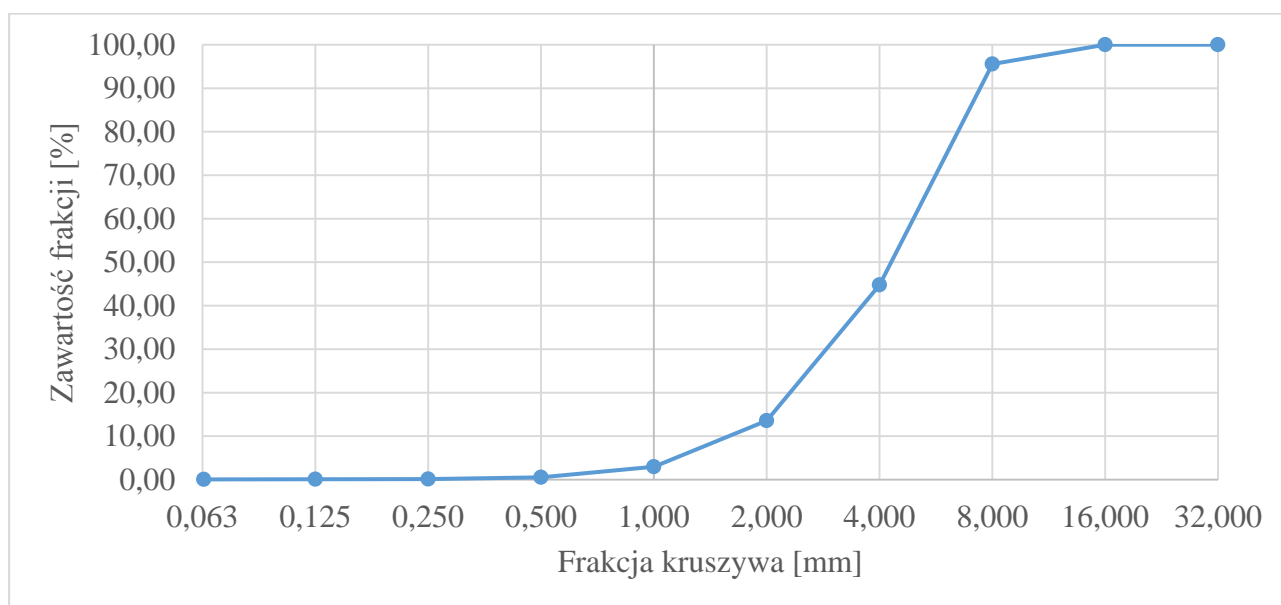


Rys. 3.1. Wykres krzywej uziarnienia dla piasku o średnicy zastępczej 0-2 mm

- Kruszywo granitowe o uziarnieniu 2-8 mm pochodzący z kopalni Graniczna

Tab. 3.2. Wyniki analizy sitowej granitu o uziarnieniu 2-8 mm z kopalni Graniczna

Frakcja [mm]	Próba 1		Próba 2		Próba 3		Wartości średnie:		
	Masa [g]	Zaw. [%]	Masa [g]	Zaw. [%]	Masa [g]	Zaw. [%]	Odcięta	Zaw. [%]	Rzędna [%]
0-0,063	1,20	0,06	1,00	0,04	1,10	0,05	0,063	0,05	0,05
0,063-0,125	1,10	0,05	0,50	0,02	0,80	0,03	0,125	0,04	0,09
0,125-0,25	1,80	0,09	1,20	0,05	0,90	0,04	0,250	0,06	0,15
0,25-0,5	10,00	0,50	9,20	0,39	7,80	0,33	0,500	0,41	0,55
0,5-1	49,30	2,16	47,00	2,01	63,80	2,71	1,000	2,39	2,95
1-2	243,20	12,16	189,30	8,08	272,40	11,57	2,000	10,60	13,55
2-4	705,70	35,27	621,50	26,54	750,40	31,88	4,000	31,23	44,78
4-8	910,90	45,53	1348,00	57,56	1160,00	49,29	8,000	50,79	95,57
8-16	77,40	3,87	124,40	5,31	96,40	4,10	16,000	4,43	100,00
16-32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,000	0,00	100,00
SUMA	2000,60	100,00	2342,10	100,00	2353,60	100,00		100,00	

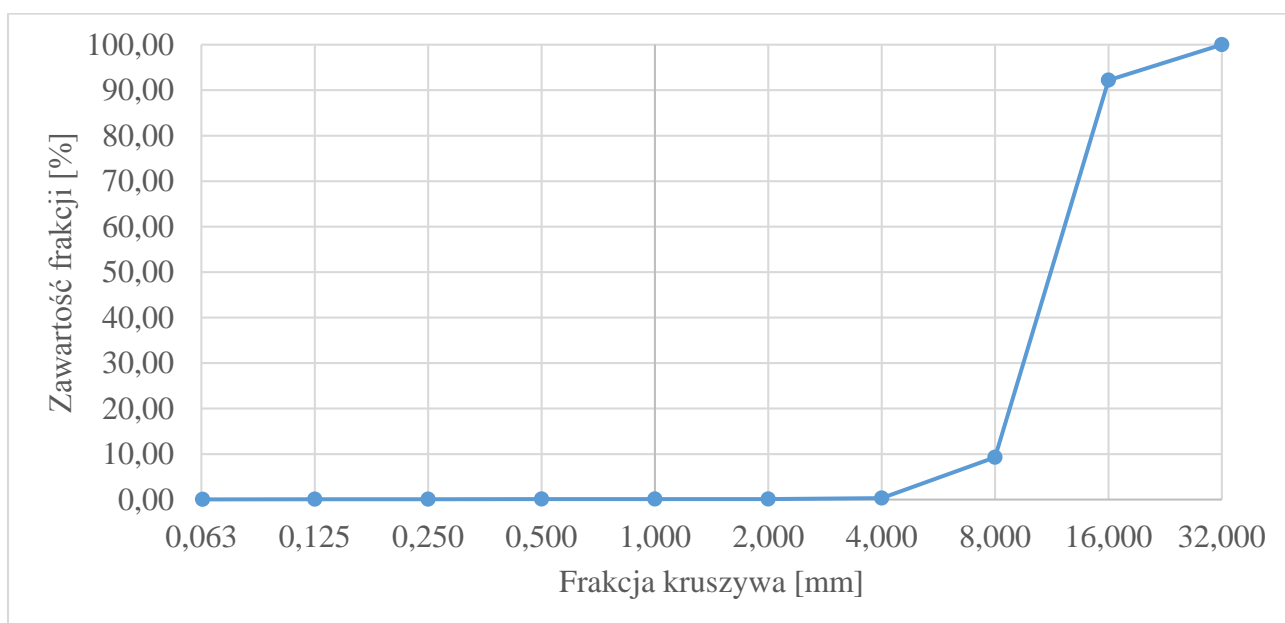


Rys. 3.2. Wykres krzywej uziarnienia dla granitu o uziarnieniu 2-8 mm

- Kruszywo granitowe o uziarnieniu 8-16 mm pochodzący z kopalni Graniczna

Tab. 3.3. Wyniki analizy sitowej granitu o uziarnieniu 8-16 mm z kopalni Graniczna

Fracja [mm]	Próba 1		Próba 2		Próba 3		Wartości średnie:		
	Masa [g]	Zaw. [%]	Masa [g]	Zaw. [%]	Masa [g]	Zaw. [%]	Odcięta	Zaw. [%]	Rzędna [%]
0-0,063	0,50	0,02	1,90	0,06	0,30	0,01	0,063	0,03	0,03
0,063-0,125	1,10	0,04	1,60	0,05	0,20	0,01	0,125	0,03	0,06
0,125-0,25	0,30	0,01	0,50	0,20	0,30	0,01	0,250	0,01	0,07
0,25-0,5	0,10	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00	0,500	0,00	0,08
0,5-1	0,10	0,00	0,40	0,01	0,10	0,00	1,000	0,01	0,08
1-2	0,40	0,02	1,50	0,05	0,20	0,01	2,000	0,02	0,10
2-4	2,70	0,10	16,30	0,49	1,80	0,07	4,000	0,22	0,30
4-8	240,80	9,19	366,00	11,08	180,40	6,60	8,000	8,96	9,28
8-16	2221,40	84,74	247,20	80,16	2293,20	83,86	16,000	82,92	92,20
16-32	154,00	5,87	267,00	8,08	258,10	9,44	32,000	7,80	100,00
SUMA	2621,40	100,00	3302,50	10,00	2734,70	0,00		100,00	



Rys. 3.3. Wykres krzywej uziarnienia dla granitu o uziarnieniu 8-16 mm

b) Cement

Mieszanekę betonową do wykonywania próbek betonu Z1 (wykorzystywanego przy wykonywaniu płyty torowej) wykonano z wykorzystaniem cementu CEM I 42,5 N/NA z firmy WARTA. Do przygotowania próbek betonów Z2 ÷ Z5 wykorzystano cement CEM 42,5 R CEMEX. W tabelach 3.4. oraz 3.5. przedstawiono dane dotyczące cementów wykorzystanych podczas wykonywania próbek laboratoryjnych.

- CEM I 42,5 N/NA wyprodukowany przez firmę WARTA

Tab. 3.4. Wybrane właściwości fizykochemiczne cementu CEM I 42,5 N/NA [7]

Właściwość	Metoda badania	Wymagania		Wynik	Jednostka
		Min	Max		
Wytrzymałość na ściskanie: po 2 dniach po 28 dniach	PN-EN 196-1: 2016	10,0 42,5	---- 62,5	19,4 52,7	MPa
Wytrzymałość na zginanie: po 2 dniach po 28 dniach	PN-EN 196-1: 2016	---- ----	---- ----	4,2 8,7	MPa
Czas wiązania: początek koniec	PN-EN 196-3: 2016	60 ---	---- ----	180 245	min
Stołość objętości	PN-EN 196-3: 2016	---	10	0,53	mm
Woda dla konsystencji normowej				25,3	%

- CEM 42,5 R wyprodukowany przez firmę CEMEX

Tab. 3.5. Wybrane właściwości fizykochemiczne cementu CEM I 42,5 R [6]

Właściwość	Metoda badania	Wymagania		Wynik	Jednostka
		Min	Max		
wytrzymałość na ściskanie: po 2 dniach po 28 dniach	PN-EN 196-1: 2016	20,0 42,5	---- 62,5	25,6 55,8	MPa
wytrzymałość na zginanie: po 2 dniach po 28 dniach	PN-EN 196-1: 2016	---- ----	--- ----	5,3 8,5	MPa
czas wiązania: początek koniec	PN-EN 196-3: 2016	60 ---	---- ----	212 248	min
stołość objętości	PN-EN 196-3: 2016	---	10	0,8	mm
woda dla konsystencji normowej				27,0	%

3.2 Projekt betonu do wykonywania płyty torowej

3.2.1 Wymagania

Wymagania do projektu betonu do wykonywania płyty torowej oparto o szereg specyfikacji technicznych wykonania i odbioru robót budowlanych stanowiących załączniki do materiałów przetargowych przy przedsięwzięciach związanych z budową nawierzchni bezpodsypkowych [61], [62], [63], [64]. Ze względu na założenia pracy, to jest analizę nawierzchni pod kątem podpór prefabrykowanych, przyjęto jeden rodzaj betonu dla płyty torowej.

Biorąc pod uwagę dane zamieszczone w tabeli 2.2., dokumenty normowe oraz specyfikacje [54], [61], [60], przyjęto następujące założenia do projektu betonu:

- klasa wytrzymałości na ściskanie wg [37] C35/45,
- klasa ekspozycji na korozję spowodowaną karbonatyzacją wg [37] - XC4,
- klasa ekspozycji na agresję mrozową wg [37] - XF1,
- stopień mrozoodporności wg [35]: F150,
- cement portlandzki klasy wg [53]: CEM 42,5,
- zawartość cementu w 1 m³ zagęszczonej mieszanki betonowej nie powinna przekraczać 400 kg,
- konsystencja mieszanki betonowej powinna być plastyczna,
- nasiąkliwość betonu nie powinna przekraczać 5%,
- wskaźnik cementowo-wodny $w/c \leq 0,50$.

3.2.2 Recepta mieszanki

Do algorytmu projektowania, w celu zapewnienia mrozoodporności betonu, przyjęto wysoki udział kruszywa 8-16 mm. Zastosowano cement CEM I 42,5 N/NA Warta, wykorzystywany do nawierzchni drogowych betonowych, w ilości 390 kg/m³. Ponadto, w celu poprawy napowietrzania w recepcie uwzględniono domieszkę napowietrzającą Sica AerPro 3 w wymiarze 0,09% masy cementu. Ze względu na wymaganą klasę konsystencji S3, podyktowaną koniecznością łatwego ułożenia mieszanki pod podporami, wykorzystano domieszkę uplastyczniającą Sica ViscoCrete. Wstępnie założono ilość domieszki 0,47% masy cementu. Stosunek w/c przyjęto bazując na doświadczeniu w projektowaniu na poziomie 0,380. Wyniki obliczeń algorytmu dla betonu Z1 przedstawia tabela 3.6.

Tab. 3.6. Projekt mieszanki betonowej Z1

1m³ betonu zawiera:	w/c=0,38	
Składniki betonu	Skład	kg
CEM I 42,5 N/NA WARTA	cement	390
woda	woda	148
piasek 0-2 mm Żabiny (bosta)	kruszywo 1	517
granit 2-8 mm Graniczna (bosta)	kruszywo 2	479
granit 8-16 mm Graniczna (bosta)	kruszywo 3	919
Version of Viscocrete	domieszka 1	3,1
Sica AerPro 3	domieszka 2	0,6
Suma		2456,67

3.3 Projekt betonu dla podpór blokowych

3.3.1 Wymagania

Wymagania do projektu betonu do podpór blokowych oparto o specyfikacje techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych [54], [62]. Ponadto, ze względu na podobieństwo do podkładów kolejowych, wykorzystano również opracowany przez Polskie Linie Kolejowe dokument „Id-101 Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Podkładów i Podrozjazdnic Strunobetonowych” [67].

Założenia do projektu zgodnie ze specyfikacjami [54], [60], [67]:

- klasa wytrzymałości na ściskanie wg [37] C50/60,
- klasa ekspozycji na korozję spowodowaną karbonatyzacją wg [37] - XC4,
- klasa ekspozycji na agresję mrozową wg [37] - XF1,
- stopień mrozoodporności wg [35]: F125,
- cement portlandzki klasy wg [53]: CEM 42,5,
- konsystencja mieszanki betonowej powinna być gęstoplastyczna,
- nasiąkliwość betonu nie powinna przekraczać 4%,
- wskaźnik cementowo-wodny $w/c \leq 0,45$.

3.3.2 Recepta mieszanki

Zgodnie z założeniami, w celu uzyskania mrozoodporności betonu przyjęto wysoki udział kruszywa 8-16 mm. Do projektowania wykorzystano cement CEM I 42,5 R CEMEX w ilości 420 kg/m³. W celu poprawy napowietrzania w receptie uwzględniono domieszkę napowietrzającą Sika AerPro 3 w wymiarze 0,10% masy cementu. W celu poprawy urabialności mieszanki wykorzystano domieszkę uplastyczniającą Sika ViscoCrete. Wstępnie założono ilość domieszki 0,40% masy cementu. Stosunek w/c przyjęto bazując na doświadczeniu w projektowaniu na poziomie 0,380. Wyniki obliczeń algorytmu dla betonu Z5 przedstawia tabela 3.7.

Tab. 3.7. Projekt mieszanki betonowej Z5

1m³ betonu zawiera:	w/c=0,37	
Składniki betonu :	Skład	kg
CEM 42,5 R CEMEX	cement	420
woda	woda	155
piasek 0-2 mm Żabiny	kruszywo 1	486
granit 2-8 mm Graniczna	kruszywo 2	523
granit 8-16 mm Graniczna	kruszywo 3	860
Version of ViscoCrete	domieszka 1	3,3
Sika AerPro 3	domieszka 2	0,7
Suma		2448,68

3.3.3 Dodatki do betonu

Zgodnie z założeniami pracy, weryfikacja wpływu wytrzymałości podpór blokowych na konstrukcję nawierzchni przeprowadzona została poprzez zastosowanie dodatków do betonu w postaci włókien. Wszystkie włókna dodawano do zaprojektowanego betonu o klasie wytrzymałości C50/60. Dobór włókien odbył się z wykorzystaniem normy z grupy PN-EN 14889 Włókna do betonu [50]. Dawkowanie włókien przeprowadzono w oparciu o zalecenia producentów.

- Z2 – dodatek w postaci włókien stalowych

W pracy doktorskiej wykorzystano włókna stalowe do betonu firmy Siatpol, o długości 50 mm. Dawkowanie włókien w ilości 25 kg/m³ oparto o zalecenia producenta oraz zapisy normowe [51], [72]. Na fotografii 3.1. przedstawiono włókna wykorzystane do wykonania betonu Z2.



Fot. 3.1. Włókna stalowe wykorzystane jako dodatek do betonu Z2 (fot. własna).

Parametry włókien stalowych wykorzystanych w badaniach zamieszczono w tabeli 3.8.

Tab. 3.8. Parametry włókien stalowych do betonu [72]

Lp.	Parametr	Wartość
1	średnica	1,0mm±10%
2	długość	50mm ±10%
3	kąt zagięcia zbrojenia	42°±10%
4	dawkowanie	25-35 kg/m ³
5	stosunek w/c	<0,6

- Z3 – dodatek w postaci włókien polimerowych

Wykorzystane do wykonania betonu Z3 włókna polimerowe Polyex Duro spełniają wymagania zapisane w normie dotyczącej włókien polimerowych do betonu [52]. Zgodnie z zaleceniami producenta dawkowanie włókien przyjęto w ilości 4,5 kg/m³. Na fotografii 3.2. przedstawiono włókna wykorzystane do wykonania betonu Z3.



Fot. 3.2. Włókna polimerowe wykorzystane jako dodatek do betonu Z3 (fot. własna).

Parametry włókien polimerowych wykorzystanych w badaniach zamieszczono w tabeli 3.9.

Tab. 3.9 Parametry włókien polimerowych do betonu [22]

Lp.	Parametr	Wartość
1	średnica	0,6 mm
2	długość	25 mm ±10%
3	dawkowanie	3-9 kg/m ³
4	wytrzymałość na rozciąganie	550-650 MPa

- Z4 – dodatek w postaci włókien szklanych

Jako trzecie do modyfikacji parametrów betonu wykorzystano włókna szklane Cem-Fil Hp Macro. Ich długość wynosi 36 mm. Dawkowanie włókien przyjęto, zgodnie z zaleceniami producenta, w ilości 1 kg/m³. Na fotografii 3.3. przedstawiono włókna wykorzystane do wykonania betonu Z4.



Fot. 3.3. Włókna szklane wykorzystane jako dodatek do betonu Z4 (fot. własna)

Parametry włókien szklanych wykorzystanych w badaniach zamieszczono w tabeli 3.10.

Tab. 3.10. Parametry włókien szklanych do betonu [74]

Lp.	Parametr	Wartość
1	średnica	0,01 mm
2	długość	36 mm ±10%
3	dawkowanie	0,5-2 kg/m ³
4	wytrzymałość na rozciąganie	2500 MPa

4 Badania laboratoryjne

4.1 Metodyka badań

Pierwszą część badań laboratoryjnych przeprowadzono w celu zweryfikowania właściwości zaprojektowanych mieszanek betonowych dla płyty torowej oraz podpór blokowych. Wykonano pięć rodzajów mieszanek betonowych: jeden dla płyty torowej oraz cztery dla betonu do produkcji podpór blokowych. Celem drugiego etapu badań laboratoryjnych było zweryfikowanie tezy pracy doktorskiej o wpływie dodatków do betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych na całą konstrukcję nawierzchni bezpodsypkowej. Ponadto otrzymane wyniki badań wykorzystano do zamodelowania konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej w programie do analizy numerycznej. Wprowadzenie danych otrzymanych w badaniach laboratoryjnych do programu obliczeniowego, umożliwiło dokładną analizę konstrukcji i określenie wpływu dodatków do betonu na powstające naprężenia w konstrukcji.

W celu zweryfikowania poprawności zaprojektowanych betonów wykonano następujące badania laboratoryjne:

- oznaczenie konsystencji metodą opadu stożka,
- oznaczenie wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach,
- oznaczenie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach,
- badanie mrozoodporności betonu (150 cykli zamrażania/odmrażania),
- oznaczenie modułu sprężystości.

W celu sprawdzenia zespolenia na styku podpora blokowa - beton nawierzchniowy przeprowadzono następujące badania:

- badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu,
- badanie wytrzymałości na odrywanie pull-off,
- badanie wytrzymałości na zginanie poprzeczne konstrukcji nawierzchni,
- badanie wytrzymałości na zginanie podłużne konstrukcji nawierzchni.

Próbki do badań betonu stwardniałego przechowywano w następujących warunkach:

- przez pierwsze 2 dni od wykonania próbek pozostawały one w formach – celem uniknięcia uszkodzenia podczas rozformowywania,
- po wyjęciu z forem próbki umieszczono w wodzie o temperaturze $18\pm 2^{\circ}\text{C}$,

- w dniu badania próbki wyjęto z wody, otarto i przewieziono do laboratorium badawczego.

4.2 Konsystencja mieszanki

Konsystencję mieszanki dla betonów o uziarnieniu do 31,5 mm bada się z wykorzystaniem klasycznego stożka Abramsa. Każdą z mieszanek ułożono w formie w 3 warstwach oraz zagęszczono poprzez sztychowanie (25 razy na każdą warstwę). Po zdjęciu stożka dokonano pomiarów opadu stożka, tj. różnicy pomiędzy wysokością formy, a najwyższym punktem rozformowanej próbki. Całość badania przeprowadzono w oparciu o zapisy normowe [40]. Klasy konsystencji według metody opadu stożka przedstawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Klasy konsystencji betonu [36]

Klasa konsystencji	Opad stożka [mm]	Tolerancja [mm]
S1	10-40	±10
S2	50-90	±20
S3	100-150	±30
S4	160-210	
S5	≥ 220	

Zgodnie z założeniami podczas projektowania mieszanki, dla betonu przeznaczonego do wykonania płyty torowej Z1 klasę konsystencji mieszanki określono jako S3. Wynika to z faktu konieczności łatwego i precyzyjnego ułożenia mieszanki oraz możliwości jej zagęszczenia tak, aby mieszanka znalazła się również pod podporami blokowymi.

Dla betonów przeznaczonych do wykonywania podpór blokowych (Z2-Z5) założono klasę konsystencji S2. W przypadku elementów prefabrykowanych prostopadłościennych równomierne ułożenie mieszanki w formach jest uproszczone, nie ma zatem potrzeby zwiększania klasy konsystencji.

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Wyniki pomiaru opadu stożka

Rodzaj betonu	Opad stożka [mm]	Klasa konsystencji
Z1	140	S3
Z2	80	S2
Z3	70	
Z4	60	
Z5	80	

Wyniki zestawione w tabeli pokazują, że dla wszystkich betonów spełnione jest założenie co do klasy konsystencji. W przypadku betonów Z2-Z5 największy opad stożka zaobserwowano w przypadku betonu bez dodatku włókien oraz z włóknami stalowymi. Najmniejszy zaś dla betonu z dodatkiem włókien szklanych. Przyczyną tego jest wpływ włókien na urabialność i konsystencję mieszanki. Drobne włókna stalowe rozpropagowały się w mieszance powodując poprawę jej stabilności. Włókna stalowe, ze względu na sztywność oraz większy rozmiar nie zapewniły tej właściwości. Beton bez dodatku włókien, jako wynik referencyjny potwierdza tę tezę.

4.3 Wytrzymałość na ściskanie

4.3.1 Opis badania

Wymiary oraz kształty próbek przygotowywanych do badania cech wytrzymałościowych betonu są szczegółowo określone w poszczególnych normach. Zgodnie z normą PN-EN 12390-1, elementy wykorzystywane do badań wytrzymałości na ściskanie powinny mieć kształt sześciątów oraz walców.

Zgodnie z normą, podstawowy wymiar próbki sześcienniej przeznaczonej do określania wytrzymałości na ściskanie wynosi 15x15x15 cm, natomiast dla próbek walcowych jest to 15 cm średnicy podstawy oraz wysokość 30 cm [41]. Ponadto przyjmuje się, że wytrzymałość określona na próbkach sześciennych o boku 15 cm jest równoważna wytrzymałości określonej na walcu o średnicy podstawy i wysokości 10 cm [59].

Norma PN-EN 12390-1 dopuszcza badania wytrzymałościowe na elementach o mniejszych bądź większych wymiarach. Należy jednak pamiętać, że w takim przypadku próbki przeznaczone do badań pomimo wykonania z tej samej mieszanki betonowej, dostarczą innych wyników zależnych od kształtu i wielkości elementów. Z tego powodu wskazano współczynniki korygujące, pozwalające sprowadzić otrzymane wyniki do wartości wiarygodnych. I tak na przykład dla badania na kostkach sześciennych o boku

10 cm, wyniki należy pomnożyć przez współczynnik 0,9. Współczynniki wyznaczone zostały doświadczalnie i odnaleźć je można zarówno w dokumentach normatywnych jak i w literaturze [48].

Ze względu na dużą liczbę zmiennych, norma wymusza pobranie określonej liczby próbek do badania wytrzymałości. Wg PN-EN 206.2014 próbek powinno być co najmniej sześć [36]. Umożliwia to ograniczenie wpływu czynników niepożądanych, takich jak na przykład nierównomierne rozłożenie kruszywa w mieszance, nieidentyczny czas zagęszczania, a w przypadku próbek pobieranych z konstrukcji również błędy podczas wykonywania odwiertów.

Badanie wytrzymałości przeprowadza się przy użyciu prasy wytrzymałościowej, wraz z dopasowanymi do próbki głowicami otrzymującymi próbkę we właściwej pozycji. Zapewniają one równomierny rozkład sił na powierzchni badanego elementu. Próbka zgniatana jest do momentu wystąpienia pęknięcia. Na fotografii poniżej przedstawiono prasę do badania stanowiącą wyposażenie Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT. Wyniki przesyłane są bezpośrednio do komputera. Wszystkie badania ściskania oraz rozłupywania próbek przeprowadzone zostały na widocznej prasie.



Fot. 4.1. Prasa do badań wytrzymałościowych (fot. własna)

Pomiary wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 7 oraz 28 dniach. Wszystkie próbki zgodnie z przyjętą metodyką poddane były pielęgnacji wodnej w wanienkach do dnia badania. Pierwsze badanie przeprowadzono po 7 dniach celem

zweryfikowania zaprojektowanej mieszanki betonowej. Zgodnie z doświadczeniem autora pracy, betony zastosowane w pracy już po 7 dniach powinny wykazywać wytrzymałość zbliżoną do wymaganej klasą. Niemniej, wiążącym w dalszych analizach badaniem jest sprawdzenie wytrzymałości po 28 dniach od wykonania próbek.

4.3.2 Badanie zarobów próbnych

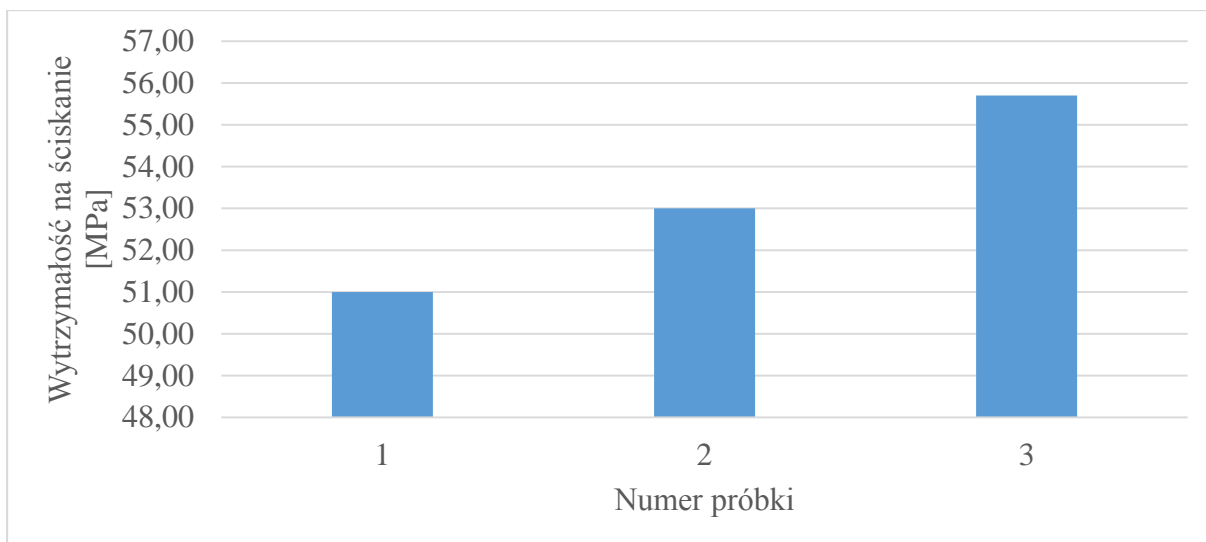
Zgodnie z wytycznymi producentów systemów nawierzchni bezpodsypekowych, beton do wykonania płyty torowej musi zostać zaprojektowany o minimalnej klasie C35/45. Minimalna wytrzymałość w przypadku betonu do podpór blokowych to klasa C50/60.

W związku z tym oczekiwana wytrzymałość dla zarobu próbnego po 7 dniach w przypadku płyty torowej wynosiła 45 MPa na próbkach sześciennych. Zgodnie z wcześniej przyjętymi oznaczeniami, beton przeznaczony do wykonania płyty torowej oznaczono jako Z1.

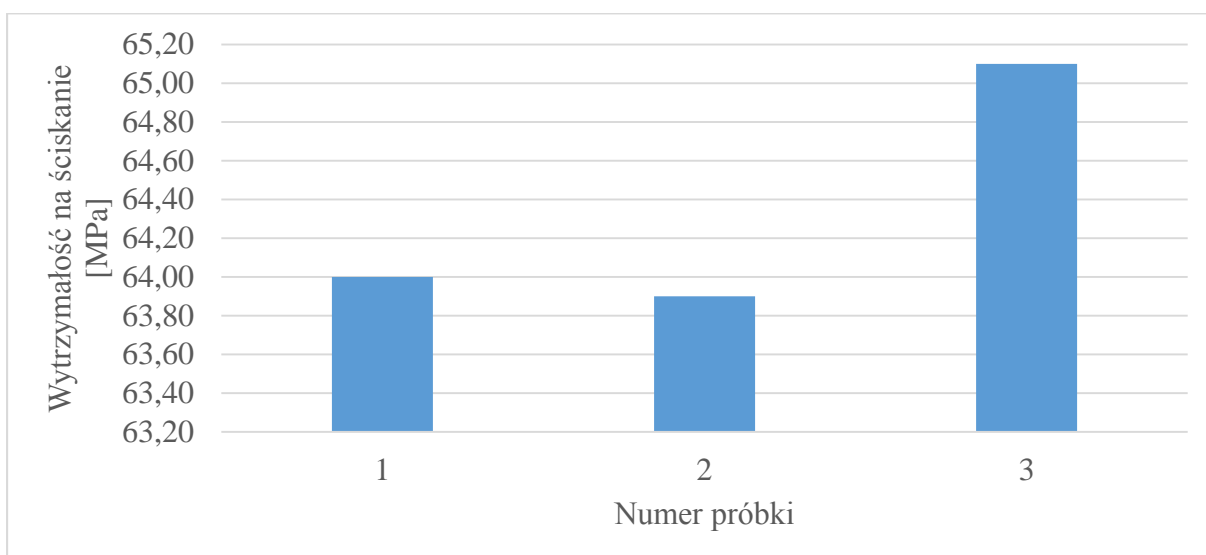
W przypadku betonu do podpór blokowych zarób próbny wykonano bez dodatków w postaci włókien (oznaczenie Z5). Wynika to z faktu, iż zgodnie z założeniem, włókna nie pogarszają wytrzymałości na ściskanie. Zarób próbny wykonano zatem dla wariantu najmniej bezpiecznego. Zaroby próbne wykonano w dniu 28 czerwca 2020 r. Badania przeprowadzono dokładnie po 7 dniach od wykonania próbek. Dla obu rodzajów betonu wykonano po 3 próbki. W tabeli 4.3. przedstawiono zestawienie wyników otrzymanych na prasie do badań wytrzymałościowych.

Tab. 4.3. Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach

Nr próbki	Z1		Z5	
	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	8099,20	51,00	8045,30	64,00
2	8105,10	53,00	8039,20	63,90
3	8108,50	55,70	7994,40	65,10
Wartość średnia	8104,27	53,23	8026,30	64,33
Odchylenie stand.		2,36		0,67
Rozstęp próby		4,70		1,20



Rys. 4.1. Wykres wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach dla zarobu Z1



Rys. 4.2. Wykres wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach dla zarobu Z5

Jak widać, w obu przypadkach wytrzymałość na ściskanie jest wyższa od wytrzymałości wymaganej dla danej klasy betonu. Dla betonu Z1 średnia wartość wytrzymałości wynosi 53,23 MPa. Dla betonu Z5 średnia wartość wynosi 64,33 MPa. Wartość dla betonu Z1 przekracza minimalną wartość normową o ponad 8 MPa. Beton nawierzchniowy szybciej uzyskuje minimalną wytrzymałość ze względu na konieczność wykonania dalszych prac na szlaku bądź udostępnienia odcinka do ruchu. W przypadku betonu Z5 również spełniony został warunek minimalnej wytrzymałości, jednak przy średniej wytrzymałości 64,33 MPa bufor bezpieczeństwa jest mniejszy. Wynika to jednak

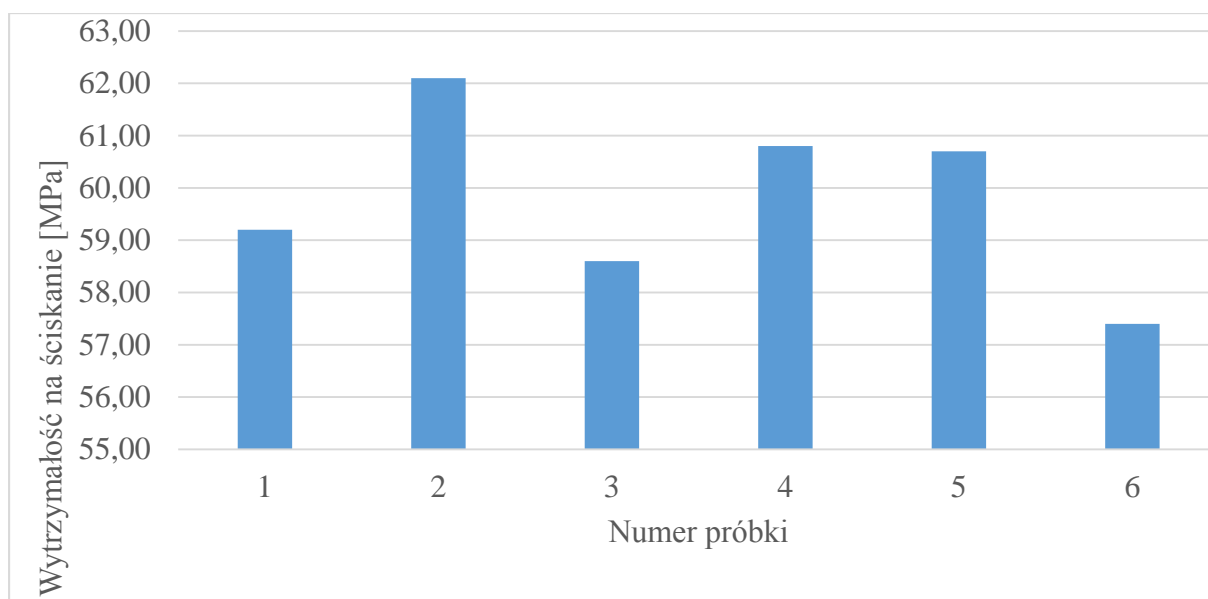
z faktu, iż beton do elementów prefabrykowanych nie zakłada w swojej recepturze potrzeby szybszego przyrostu wytrzymałości. Ostateczną ocenę betonu można jednak podjąć po badaniach wytrzymałościowych na próbkach 28-dniowych. W obu przypadkach otrzymane wartości pozwoliły przyjąć wstępne założenie poprawnie zaprojektowanej mieszanki betonowej oraz możliwość wykorzystania jej w kolejnym etapie badań.

4.3.3 Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu płyty torowej

Pielęgnacja próbek przeprowadzona została zgodnie z opisanymi we wcześniejszej części pracy procedurami. Po wyjęciu z wody i obeschnięciu, próbki poddano badaniu niszczącemu na wytrzymałość na ściskanie. W tabeli 4.4. przedstawiono wyniki ważenia oraz badania.

Tab. 4.4. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z1

Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	7896,90	59,20
2	7972,30	62,10
3	8123,30	58,60
4	7957,90	60,80
5	7963,10	60,70
6	7899,20	57,40
Wartość średnia	7968,80	59,80
Odchylenie standardowe		2,12
Rozstęp próby		5,70



Rys. 4.3. Wyniki badania próbek wykonanych z betonu Z1

Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu Z1 wynosi 60,1 MPa. Zgodnie z normą „PN-EN 206+A1:2016-12 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”, beton Z1 zakwalifikować można do klasy wytrzymałości C45/55 [36]. Jak zaznaczono we wcześniejszej części pracy, receptura ta wykorzystywana była przy inwestycjach infrastrukturalnych w Polsce. Wyniki badań przeprowadzone na próbkach wykonanych na tych samych składnikach pobieranych na budowie były niższe. W warunkach laboratoryjnych beton wykonany był z kruszyw niezapylnych, wysuszonych a cement, woda i domieszki dobrane były z bardzo dużą dokładnością. Stąd też, ze względu na planowane wykonywanie betonu Z1 w mniej sprzyjających warunkach można uznać, że otrzymane wyniki są poprawne i nie należy zmieniać receptury betonu. Na poniższej fotografii przedstawiono zniszczone próbki betonu. Wszystkie badane elementy po zniszczeniu miały zbliżony wygląd. Po przeliczeniu średnia gęstość betonu wyniosła 2361 kg/m³.



Fot. 4.2. Próbkki betonu po przeprowadzeniu badania (fot. własna)

4.3.4 Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu podpór blokowych

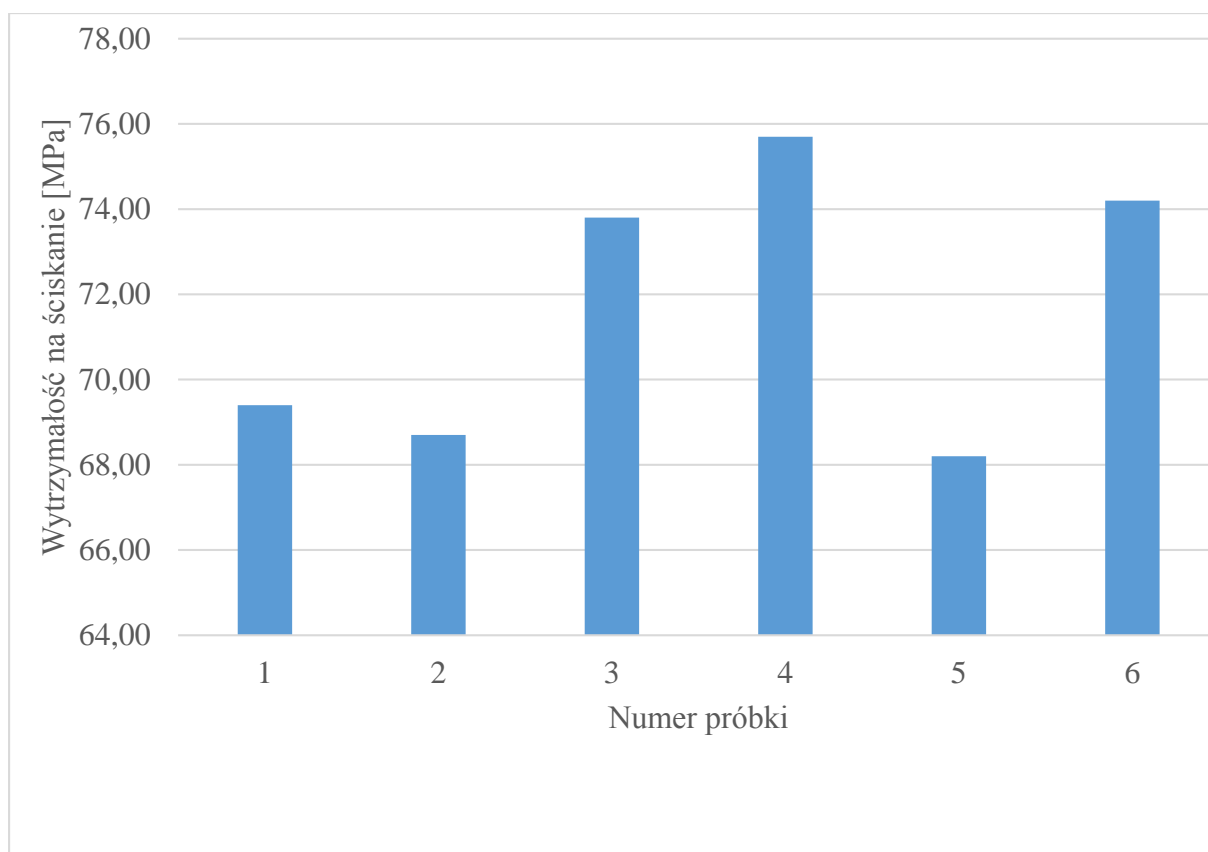
Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono dla betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych. Poniżej zamieszczono wyniki badań betonu z dodatkami w postaci włókien oraz betonu referencyjnego.

- Beton Z2 (z dodatkiem włókien stalowych)

Wyniki badań próbek wykonanych z betonu Z2 przedstawiono w tabeli 4.5.

Tab. 4.5. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z2

Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	7984,80	69,40
2	7931,80	68,70
3	8023,20	73,80
4	8158,70	75,70
5	7943,30	68,20
6	8105,30	74,20
Wartość średnia	8024,52	71,67
Odchylenie standardowe		3,26
Rozstęp próby		7,50



Rys. 4.4. Wyniki badania próbek wykonanych z betonu Z2

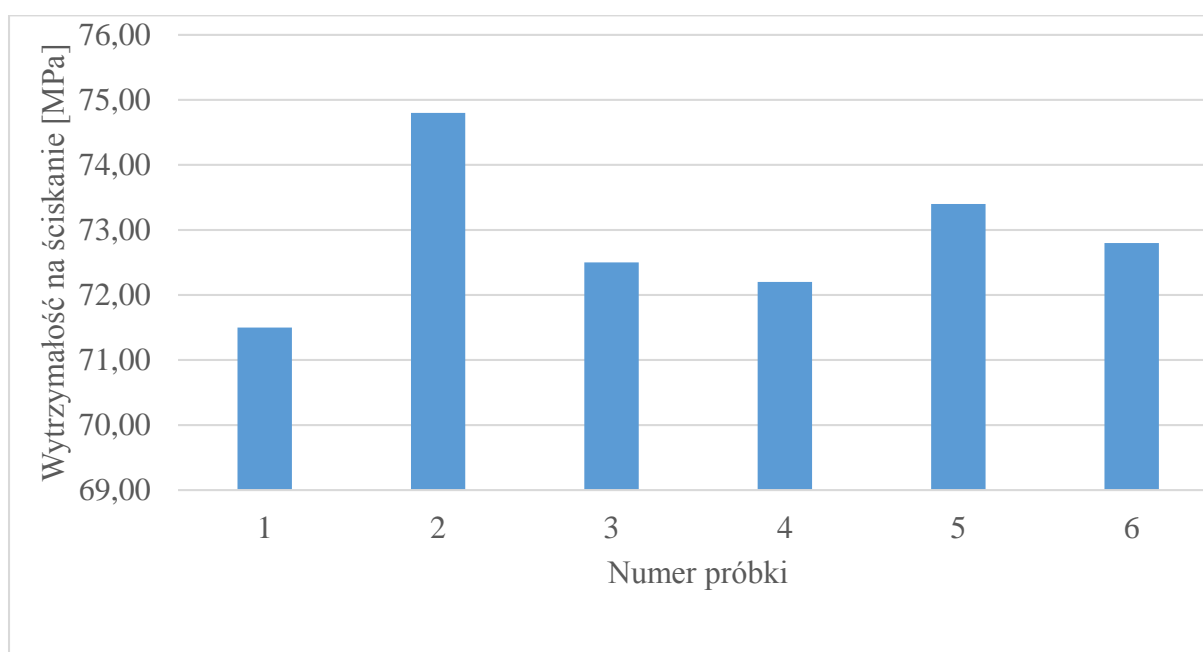
Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z2 wynosi 71,7 MPa. Zgodnie z normą „PN-EN 206+A1:2016-12 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”, beton Z2 zakwalifikować można do klasy wytrzymałości C55/67, a zatem nawet o jedną klasę wyżej od zakładanej C50/60 [36]. Zapas wytrzymałości 11,7 MPa wynikający z dodania włókien, jest dopuszczalny i pozwala przyjąć, że beton został zaprojektowany poprawnie. Betony do produkcji podpór blokowych wykonywane są w fabryce, nie są przewożone, zatem ryzyko utraty wytrzymałości jest niższe. Po przeliczeniu, średnia gęstość betonu wyniosła 2378 kg/m³.

- Beton Z3

Wyniki badań próbek wykonanych z betonu Z3 przedstawiono w tabeli 4.6.

Tab. 4.6. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z3

Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	7789,80	71,50
2	7859,30	74,80
3	7701,90	72,50
4	7690,00	72,20
5	7773,80	73,40
6	7625,30	72,80
Wartość średnia	7740,02	72,87
Odchylenie standardowe		1,14
Rozstęp próby		3,30



Rys. 4.5. Wyniki badania próbek wykonanych z betonu Z3

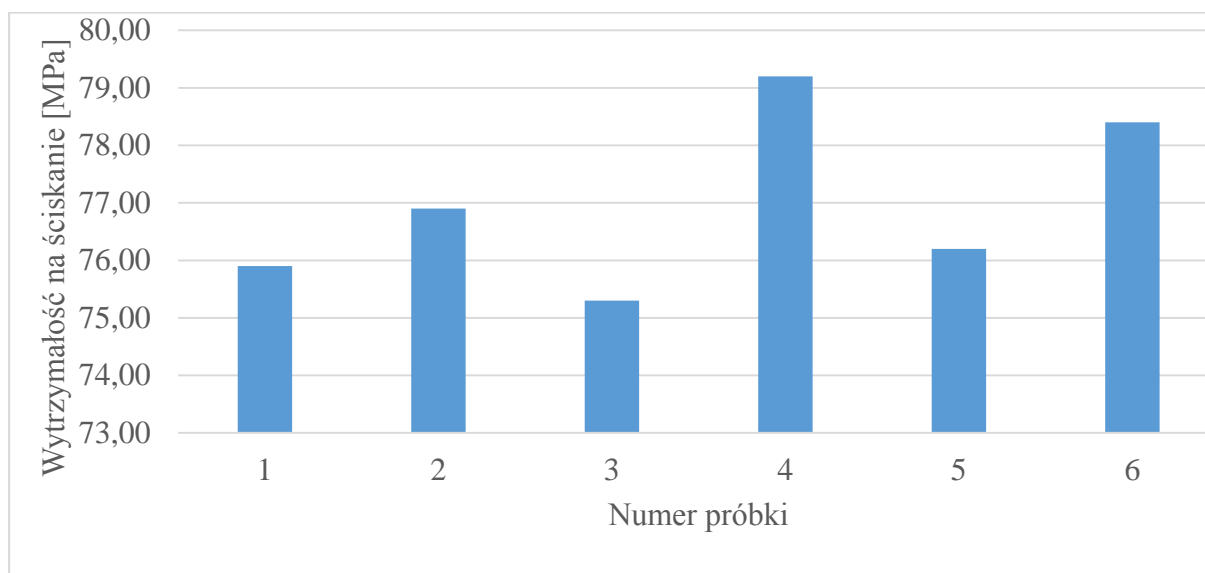
Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z3 wynosi 72,9 MPa. Zgodnie z normą „PN-EN 206+A1:2016-12 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”, beton Z3 zakwalifikować można do klasy wytrzymałości C55/67, a zatem nawet o jedną klasę wyżej od zakładanej C50/60 [36]. Osiągnięte w badaniu wartości pozwalają przyjąć założenie, że beton Z3 został zaprojektowany poprawnie. Po przeliczeniu, średnia gęstość betonu wyniosła 2294 kg/m³.

- Beton Z4

Wyniki badań próbek wykonanych z betonu Z4 przedstawiono w tabeli 4.7.

Tab. 4.7. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z4

Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	7872,50	75,90
2	7900,90	76,90
3	8120,90	75,30
4	7846,60	79,20
5	7914,10	76,20
6	7995,30	78,40
Wartość średnia	7941,72	76,98
Odchylenie standardowe		1,52
Rozstęp próby		3,90



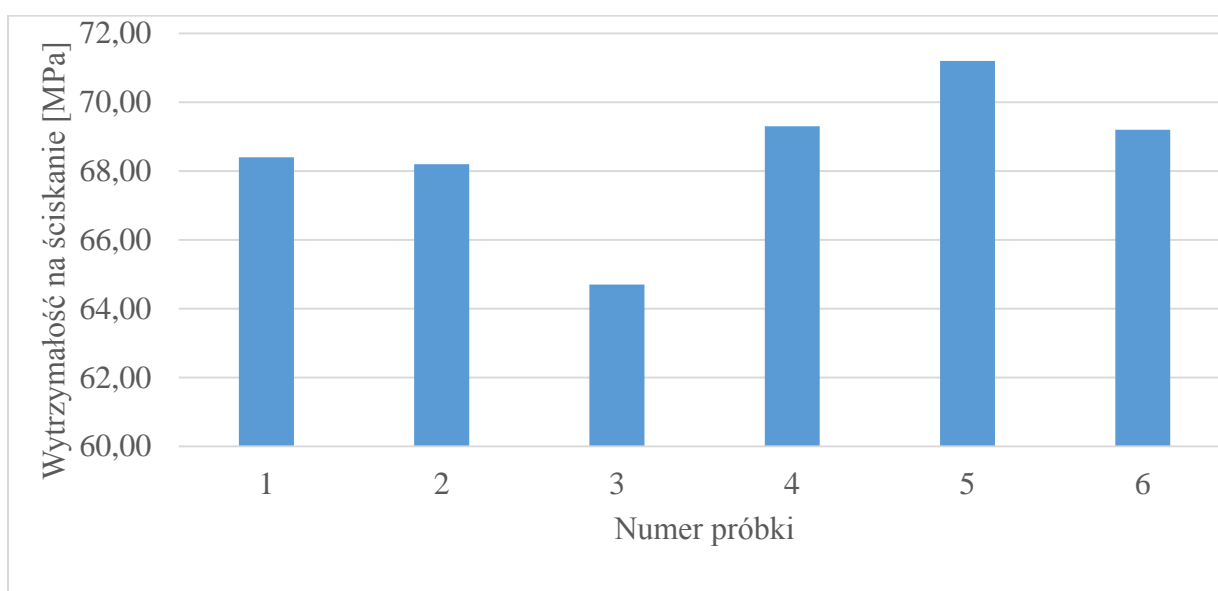
Rys. 4.6. Wyniki badania próbek wykonanych z betonu Z4

Beton do produkcji podpór blokowych z dodatkiem włókien szklanych osiągnął średnią wytrzymałość na ściskanie 77,0 MPa. Wartość ta widocznie przewyższa założenia normowe dla klasy C50/60, a w oparciu o zapisy normowe pozwala zakwalifikować beton do klasy wytrzymałości C60/75 [36]. Ze względu na to, iż wszystkie rodzaje betonów wykonywane były w tym samym czasie, z tych samych substratów, przyjęć należy założenie, że wzrost wytrzymałości wynika z zastosowanych włókien, a nie jest skutkiem błędu podczas wykonywania próbek. Pozwala to przyjąć pierwszy wniosek o możliwym wpływie dodatku włókien na wytrzymałość podpór blokowych. Po przeliczeniu, średnia gęstość betonu wyniosła 2353 kg/m³.

- Beton Z5

Tab. 4.8. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z5

Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	8110,00	68,40
2	8098,40	68,20
3	7991,80	64,70
4	8181,80	69,30
5	7919,00	71,20
6	8102,30	69,20
Wartość średnia	8067,22	68,50
Odchylenie standardowe		2,14
Rozstęp próby		4,60



Rys. 4.7. Wyniki badania próbek wykonanych z betonu Z5

Beton do produkcji podpór blokowych bez dodatku włókien osiągnął średnią wytrzymałość na ściskanie 68,5 MPa. Jest to najniższa wartość spośród badanych mieszanek. Pozwala ona zakwalifikować beton do klasy wytrzymałościowej C55/67 [36]. Po przeliczeniu średnia gęstość betonu wyniosła 2390 kg/m³.

4.3.5 Wnioski

Otrzymane wyniki badania wytrzymałości na ściskanie wskazują na poprawne opracowanie receptur betonu. Zarówno beton do wykonywania płyty torowej, jak i ten do produkcji podpór blokowych spełnia wymagania dla swojej klasy.

Beton Z1 został zaprojektowany z zapasem wytrzymałości. Jak wspomniano, wykonywanie badania w laboratorium umożliwiło wyeliminowanie błędów technologicznych, a co za tym idzie otrzymana wytrzymałość na ściskanie jest wyższa.

Betony do produkcji podpór blokowych Z2, Z3, Z4, Z5 osiągnęły wymaganą wytrzymałość na ściskanie. W przypadku betonu Z4 zauważalna jest dużo wyższa wartość wytrzymałości. Pozwala to sformułować założenie o możliwym wpływie dodatków do betonu w postaci włókien na trwałość konstrukcji. W przypadku betonu Z5 wytrzymałość na poziomie 68,5 MPa wskazuje, że brak dodatku włókien zapewnia wytrzymałość założoną w projekcie betonu, jednak zapas bezpieczeństwa jest mniejszy.

Co interesujące, dla wszystkich betonów obliczona średnia gęstość jest bardzo zbliżona i nie ma ona wpływu na wytrzymałość betonu. Analizując betony Z2, Z3, Z4 oraz Z5 nie można określić zależności pomiędzy gęstością betonu a wytrzymałością na ściskanie.

4.4 Badanie mrozoodporności betonu

4.4.1 Opis badania

W polskiej normie PN-88/B-06250 [35] wskazano dwie metody badania mrozoodporności betonu. Jest to metoda zwykła i metoda przyspieszona. Dla metody przyspieszonej głównym kryterium trwałości jest stopień zewnętrznej destrukcji. Stopień ten określany jest wizualnie oraz oceniany ubytkiem objętości próbki. Beton uznaje się za mrozoodporny, jeśli po badaniu metodą przyspieszoną próbki nie wykazują pęknięć, a ubytek objętości betonu, w postaci złuszczeń, odłamków i odprysków, nie przekracza w żadnej próbce wartości $0,05 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2$ powierzchni zanurzonej w wodzie [20].

Badanie mrozoodporności betonu metodą zwykłą polega na weryfikacji założonego podczas projektowania mieszanki stopnia mrozoodporności F betonu. Stopień ten odpowiada natomiast wskaźnikowi N, który równy jest liczbie przewidywanych lat użytkowania konstrukcji. W normie wskazano przedziały dla liczby lat użytkowania: od N25 do N200 i N powyżej 200. Wymagana liczba lat wzrasta, gdy beton narażony jest na przykład na kapilarne podciąganie wody. Innymi czynnikami są działanie środków odladzających, a także wbudowanie elementu w strefie zmieniającego się poziomu wody

[20]. Zgodnie z wymaganiami zawartymi w specyfikacji T.11.10.06 [60], beton w nawierzchni kolejowej bezpodsypkowej musi spełniać stopień mrozoodporności F150.

Metoda zwykła umożliwia uwzględnienie stopnia wewnętrznego zniszczenia betonu, charakteryzowanego przez wytrzymałość próbki, jak również destrukcję zewnętrzną, określaną wizualnie i poprzez ubytek masy próbki. Stopień mrozoodporności betonu jest osiągnięty, jeżeli po wymaganej w jego symbolu liczbie cykli zamrażania i odmrażania próbek betonowych, spełnione zostaną następujące warunki: [55]

- brak widocznych pęknięć próbek,
- masa ubytków betonu w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków, itp. nie przekracza 5% masy próbek przed rozpoczęciem cykli badania,
- spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrażanych nie jest większy niż 20%.

Do badania mrozoodporności betonu metodą zwykłą stosuje się próbki po upływie 28 dni dojrzewania. Badanie rozpoczyna się od nasycenia próbek betonowych wodą. Próbki porównawcze, tzw. „próbki-świadki” przeznaczone do badania wytrzymałości na ściskanie pozostawia się w wodzie w temperaturze $+18\pm 2^{\circ}\text{C}$ przez cały czas badania w komorze. Próbki układa się w komorze zamrażarki zachowując minimalny odstęp 20 mm. Zamrażarka poddaje je cyklicznemu zamrażaniu w temperaturze $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ przez okres 4 godzin i odmrażaniu przez całkowite zanurzenie w wodzie w temperaturze $+18\pm 2^{\circ}\text{C}$ w ciągu 4 godzin [21].

Próbki betonu nawierzchniowego Z1 oraz betonu do produkcji podpór blokowych Z2-Z5 wykonano w formie sześciątów o boku 10 cm. Dla każdego zarobu wykonano po 12 próbek. Próbki zostały wykonane 10 lipca 2020 roku. Następnie, po rozformowaniu umieszczono je w wodzie. Po czasie pielęgnacji wodnej próbki do badania (po 6 sztuk) otarto z wody, zważono, a następnie umieszczono w komorze zamrażarki, natomiast świadki badania pozostały w kąpielu wodnej. Kostki oznaczone numerami od 1 do 6 dla poszczególnych zarobów umieszczono w komorze zamrażarki, próbkami porównawczymi były próbki oznaczone numerami od 7 do 12. Na fotografii poniżej przedstawiono próbki betonów Z1-Z5 umieszczone w komorze zamrażarki.



Fot. 4.3. Próbków betonów Z1-Z5 ułożone w komorze zamrażarki (fot. własna)

Po ostatnim odmrażaniu przeprowadza się badanie wytrzymałości na próbkach porównawczych i poddawanych działaniu mrozu. Średni spadek wytrzymałości próbek po badaniu oblicza się za wzoru:

$$\Delta R = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \cdot 100\% \quad (4.1.)$$

gdzie:

R_1 - średnia wytrzymałość na ściskanie próbek porównawczych [MPa]

R_2 - średnia wytrzymałość na ściskanie próbek badanych, po zakończeniu cykli [MPa]

Po otarciu próbek z wody należy sprawdzić również ubytek masy każdej próbki, a następnie obliczyć średnią zgodnie ze wzorem:

$$\Delta G = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100\% \quad (4.2.)$$

gdzie:

G_1 - średnia masa próbek przed rozpoczęciem badania [g]

G_2 - średnia masa próbek po zakończeniu cykli zamrażania/odmrażania [g]

4.4.2 Badanie betonu powierzchniowego

Po 150 cyklach zamrażania/odmrażania próbki betonu Z1 wyjęto z komory zamrażarki. Próbków porównawcze wyjęto z wody. Wszystkie próbki otarto i poważono oraz

przeprowadzono badanie wytrzymałości na ściskanie. W tabelach 4.9. oraz 4.10. przedstawiono wyniki ważenia oraz badania wytrzymałości na ściskanie.

Tab. 4.9. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonu Z1 po wyjęciu z komory zamrażarki

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa przed badaniem [g]	Masa po badaniu [g]	Ubytek masy [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka poddana badaniu mrozoodporności	1	2411,1	2406,1	5	57,2
	2	2359,1	2354,2	4,9	56,5
	3	2397,3	2392,3	5	59,3
	4	2398,5	2393,3	5,2	60,4
	5	2389,7	2385,1	4,6	56,3
	6	2388,2	2383,6	4,6	59,6
Wartość średnia		2390,7	2385,8	4,9	58,2
Odchylenie standardowe					1,76
Rozstęp próby					4,10

Tab. 4.10. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek porównawczych betonu Z1

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka porównawcza	7	2440,6	60,4
	8	2378,7	58,4
	9	2419	56,5
	10	2423	61,8
	11	2407,1	60,7
	12	2396,9	61,2
Wartość średnia		2410,9	59,8
Odchylenie standardowe			2,00
Rozstęp próby			5,3

Zgodnie z równaniem (4.1.) obliczono średni ubytek wytrzymałości na ściskanie próbek po badaniu:

$$\Delta R_{Z1} = \frac{59,8\text{MPa} - 58,2\text{MPa}}{59,8\text{MPa}} \cdot 100\% = 2,67\%$$

Zgodnie z równaniem (4.2.) obliczono średni ubytek masy próbek:

$$\Delta G_{Z1} = \frac{2390,65\text{g} - 2385,8\text{g}}{2390,65\text{g}} \cdot 100\% = 0,21\%$$

Obliczony ubytek wytrzymałości na ściskanie na ściskanie betonu Z1 osiągnął wartość 2,67%, przy dopuszczalnym ubytku 20%. Ubytek masy próbek ma wartość 0,21% przy dopuszczalnym 5%. Pozwala to stwierdzić, że beton Z1 spełnia warunek mrozoodporności założony przy projektowaniu.

4.4.3 Badanie betonu podpór blokowych

Analogiczne badania przeprowadzono dla betonów Z2 do Z5 wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych. Poniżej zamieszczono wyniki badań.

- Beton Z2

W tabelach 4.11. oraz 4.12. przedstawiono wyniki ważenia oraz badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z2.

Tab. 4.11. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonu Z2 po wyjęciu z komory zamrażarki

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa przed badaniem [g]	Masa po badaniu [g]	Ubytek masy [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka poddana badaniu mrozoodporności	1	2386	2380,6	5,4	71
	2	2457,5	2451,1	6,4	72,8
	3	2433,4	2428,7	4,7	72,3
	4	2365,1	2358,2	6,9	69,5
	5	2419,5	2412,4	7,1	71,9
	6	2440,7	2434,2	6,5	74,4
Wartość średnia		2417,0	2410,9	6,2	72,0
Odchylenie standardowe					1,66
Rozstęp próby					4,90

Tab. 4.12. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek porównawczych betonu Z2

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka porównawcza	7	2416	73,9
	8	2436	74,5
	9	2391,8	74,8
	10	2442,9	73,9
	11	2386,9	72,7
	12	2421,4	69,7
Wartość średnia		2415,8	73,3
Odchylenie standardowe			1,88
Rozstęp próby			5,1

Zgodnie z równaniem (4.1.) obliczono średni ubytek wytrzymałości po badaniu:

$$\Delta R_{Z2} = \frac{73,3\text{MPa} - 72,0\text{MPa}}{73,3\text{MPa}} \cdot 100\% = 1,77\%$$

Zgodnie z równaniem (4.2.) obliczono średni ubytek masy próbek:

$$\Delta G_{Z2} = \frac{2417,0\text{g} - 2410,9\text{g}}{2417,0\text{g}} \cdot 100\% = 0,25\%$$

Obliczony ubytek wytrzymałości na ściskanie betonu Z2 osiągnął wartość 1,77%, przy dopuszczalnym ubytku 20%. Ubytek masy próbek ma wartość 0,25% przy dopuszczalnym 5%. Pozwala to stwierdzić, że beton Z2 spełnia warunek mrozoodporności założony przy projektowaniu.

- Beton Z3

Wyniki ważenia oraz badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z3 przedstawiono w tabelach 4.13. oraz 4.14.

Tab. 4.13. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonu Z3 po wyjęciu z komory zamrażarki

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa przed badaniem [g]	Masa po badaniu [g]	Ubytek masy [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka poddana badaniu mrozoodporności	1	2367,1	2360,2	6,9	72,3
	2	2409,2	2401,8	7,4	72,4
	3	2314,8	2308,6	6,2	69,3
	4	2390,2	2383,8	6,4	66,9
	5	2328,5	2321,3	7,2	74,1
	6	2321,2	2315	6,2	73,3
Wartość średnia		2355,2	2348,5	6,7	71,4
Odchylenie standardowe					2,73
Rozstęp próby					7,20

Tab. 4.14. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek porównawczych betonu Z3

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka porównawcza	7	2319,3	72,7
	8	2391,6	73
	9	2368,6	73
	10	2380,7	73,1
	11	2371	74
	12	2409,9	72,7
Wartość średnia		2373,5	73,1
Odchylenie standardowe			0,48
Rozstęp próby			1,3

Zgodnie z równaniem (4.1.) obliczono średni ubytek wytrzymałości na ściskanie po badaniu:

$$\Delta R_{Z2} = \frac{73,1\text{MPa} - 71,4\text{MPa}}{73,1\text{MPa}} \cdot 100\% = 2,34\%$$

Zgodnie z równaniem (4.2.) obliczono średni ubytek masy próbek:

$$\Delta G_{Z2} = \frac{2355,2\text{g} - 2348,5\text{g}}{2355,2\text{g}} \cdot 100\% = 0,28\%$$

Obliczony ubytek wytrzymałości na ściskanie betonu Z3 osiągnął wartość 2,34%, przy dopuszczalnym ubytku 20%. Ubytek masy próbek ma wartość 0,28% przy dopuszczalnym 5%. Pozwala to stwierdzić, że beton Z3 spełnia warunek mrozoodporności założony przy projektowaniu.

- Beton Z4

W tabelach 4.15 oraz 4.16 przedstawiono wyniki ważenia oraz badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z4.

Tab. 4.15. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonu Z4 po wyjęciu z komory zamrażarki

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa przed badaniem [g]	Masa po badaniu [g]	Ubytek masy [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka poddana badaniu mrozoodporności	1	2377,7	2371,2	6,5	73,8
	2	2384,7	2376,5	8,2	74,6
	3	2358,9	2350,9	8	73,2
	4	2361	2352,3	8,7	76,9
	5	2401,8	2394,7	7,1	75,2
	6	2363,2	2355,8	7,4	75,6
Wartość średnia		2374,6	2366,9	7,6	74,9
Odchylenie standardowe					1,32
Rozstęp próby					3,70

Tab. 4.16. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek porównawczych betonu Z4

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka porównawcza	7	2408,2	75,9
	8	2353,6	73,2
	9	2363	76,7
	10	2388,3	77,4
	11	2367,2	75,6
	12	2405,6	79,2
Wartość średnia		2381,0	76,3
Odchylenie standardowe			2,00
Rozstęp próby			6

Zgodnie z równaniem (4.1.) obliczono średni ubytek wytrzymałości na ściskanie po badaniu:

$$\Delta R_{z2} = \frac{76,3\text{MPa} - 74,8\text{MPa}}{76,3\text{MPa}} \cdot 100\% = 1,97\%$$

Zgodnie z równaniem (4.2.) obliczono średni ubytek masy próbek:

$$\Delta G_{z2} = \frac{2374,6\text{g} - 2366,9\text{g}}{2374,6\text{g}} \cdot 100\% = 0,32\%$$

Obliczony ubytek wytrzymałości na ściskanie betonu Z4 osiągnął wartość 1,97%, przy dopuszczalnym ubytku 20%. Ubytek masy próbek ma wartość 0,32% przy

dopuszczalnym 5%. Pozwala to stwierdzić, że beton Z4 spełnia warunek mrozoodporności założony przy projektowaniu.

- Beton Z5

W tabelach 4.17. oraz 4.18. przedstawiono wyniki ważenia oraz badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z betonu Z5.

Tab. 4.17. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonu Z5 po wyjęciu z komory zamrażarki

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa przed badaniem [g]	Masa po badaniu [g]	Ubytek masy [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka poddana badaniu mrozoodporności	1	2382,1	2372	10,1	67,2
	2	2405,4	2396,5	8,9	67,9
	3	2411,3	2402,1	9,2	68,6
	4	2388,3	2385,2	3,1	67
	5	2396,2	2386,2	10	71,1
	6	2390,3	2382,4	7,9	72
Wartość średnia		2395,6	2387,4	8,2	69,0
Odchylenie standardowe					2,10
Rozstęp próby					5,00

Tab. 4.18. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek porównawczych betonu Z5

Rodzaj próbki	Nr próbki	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
Próbka porównawcza	7	2414,5	68,5
	8	2429,3	77,1
	9	2370,3	70
	10	2439,5	73
	11	2389,3	68,2
	12	2388,4	71,1
Wartość średnia		2405,2	71,3
Odchylenie standardowe			3,34
Rozstęp próby			8,9

Zgodnie z równaniem (4.1.) obliczono średni ubytek wytrzymałości na ściskanie po badaniu:

$$\Delta R_{Z2} = \frac{71,3\text{MPa} - 69,0\text{MPa}}{71,3\text{MPa}} \cdot 100\% = 3,23\%$$

Zgodnie z równaniem (4.2.) obliczono średni ubytek masy próbek:

$$\Delta G_{Z2} = \frac{2395,6\text{g} - 2387,4\text{g}}{2395,6\text{g}} \cdot 100\% = 0,34\%$$

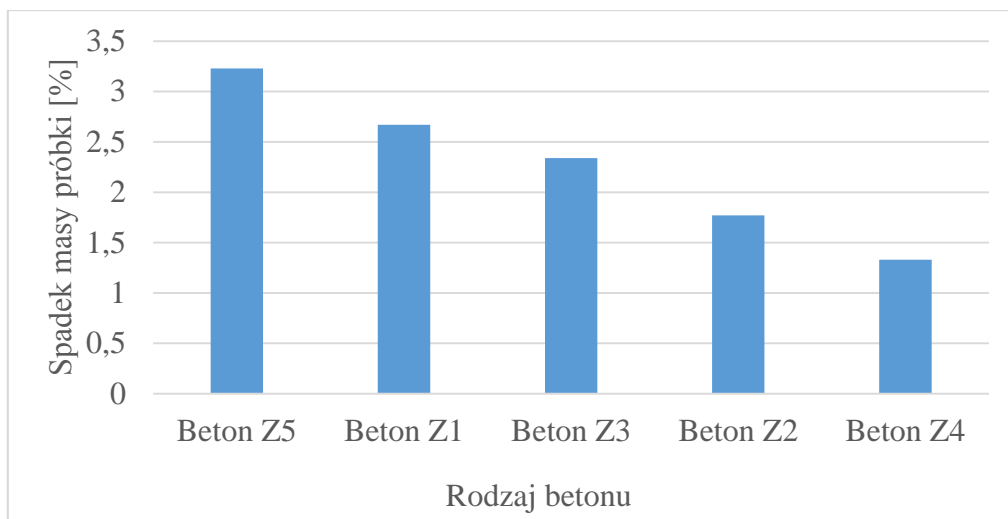
Obliczony ubytek wytrzymałości na ściskanie betonu Z5 osiągnął wartość 3,23%, przy dopuszczalnym ubytku 20%. Ubytek masy próbek ma wartość 0,34% przy dopuszczalnym 5%. Pozwala to stwierdzić, że beton Z5 spełnia warunek mrozoodporności założony przy projektowaniu.

4.4.4 Podsumowanie

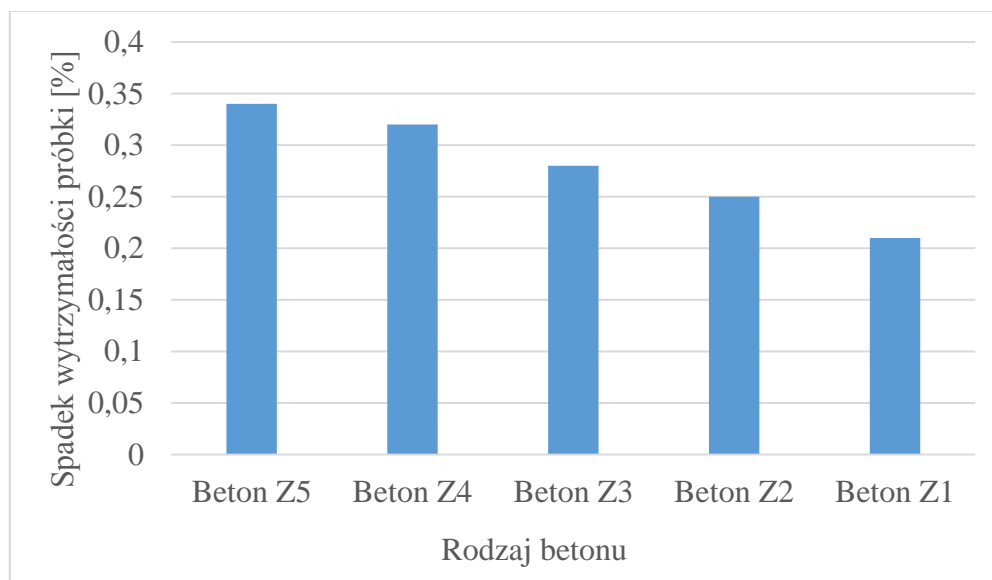
Badanie mrozoodporności betonu do wykonywania płyty torowej Z1 oraz betonów do produkcji podpór blokowych Z2-Z5 wykazało, że wszystkie zaprojektowane receptury betonu spełniają wymagane w normie opisującej warunki mrozoodporności [36]. Zarówno utrata masy wskutek odprysków czy złuszczenia, jak i badanie wytrzymałości na ściskanie wykazało duży zapas bezpieczeństwa. W tabeli 4.19. oraz na wykresie przedstawiono podsumowanie obliczonych procentowych strat masy i wytrzymałości na ściskanie.

Tab. 4.19. Spadek wartości masy oraz wytrzymałości na ściskanie w badaniu mrozoodporności betonów Z1-Z5

Rodzaj betonu	Spadek masy próbki [%]	Spadek wytrzymałości na ściskanie [%]
Beton Z1	2,67	0,21
Beton Z2	1,77	0,25
Beton Z3	2,34	0,28
Beton Z4	1,33	0,32
Beton Z5	3,23	0,34



Rys. 4.8. Procentowy spadek masy próbek po badaniu mrozoodporności



Rys. 4.9. Procentowy spadek wytrzymałości betonów na ściskanie

Badanie mrozoodporności wykazało, że w przypadku wykorzystania dodatku do betonu w postaci włókien, poprawia się wytrzymałość na ściskanie próbki. Najmniejszy spadek wytrzymałości na ściskanie występuje w przypadku dodatku włókien szklanych – beton Z4. Wartość spadku wytrzymałości wyniosła zaledwie 1,9%. Jednocześnie, podobnie jak w poprzednim badaniu, wartości wytrzymałości na ściskanie są dla tego betonu najwyższe. Dla betonu Z5 – referencyjnego, tj. bez dodatku w postaci włókien do betonu, spadek wytrzymałości na ściskanie był największy i wyniósł 3,23%. Badanie potwierdza założenie wpływu włókien na wszystkie właściwości wytrzymałościowe betonu. Ich wpływ wynika z mocniejszego zespolenia próbki. Włókna szklane są niewielkich rozmiarów, bardzo dobrze mieszają się z betonem. Działają jak swego rodzaju wewnętrzne „ściągi”

w mieszance, zapewniając większą stabilność przy powstających podczas zamrażania i odmrażania naprężeniach w betonie. Nie stwierdzono jednak wpływu włókien na utratę masy próbek. Wyniki przedstawione na wykresie nie pozwalają przyporządkować włóknom możliwości zapewnienia większej stabilności masy. Wynika to z faktu, iż włókna nie wpływają znacznie na powierzchnię próbki, a co za tym idzie na powierzchniowe ubytki masy betonu.

Otrzymane podczas badania wartości utraty masy i wytrzymałości na ściskanie są bardzo niskie, co pozwala przyjąć założenie, że nawet beton wykonywany mniej precyzyjnie, zwłaszcza beton Z1, który wbudowuje się na miejscu ułożenia nawierzchni z całą pewnością spełnia wymagania mrozoodporności.

4.5 Oznaczenie modułu sprężystości betonu

W celu oznaczenia modułu sprężystości zaprojektowanych betonów przygotowano próbki walcowe o średnicy podstawy 15cm oraz wysokości próbki 30 cm. Próbki zostały przygotowane w oparciu o zapisy normowe [41]. Stosunek średnicy podstawy do wysokości próbki musi mieścić się w zakresie 2 do 4. Po okresie dojrzewania próbek w kąpeli wodnej przeprowadzono dwa badania mające na celu wyznaczenie wartości modułu sprężystości betonu.

Pierwszym przeprowadzonym badaniem była weryfikacja z wykorzystaniem metody rezonansowej. Do badania wykorzystano urządzenie Emodumeter amerykańskiej firmy NDT James Instruments. Urządzenie określa moduł Younga na podstawie propagacji fal w próbce. Drgania wywoływane są poprzez uderzenie kółki o odpowiednio dobranej średnicy w podstawę walca. Urządzenie określa częstotliwość drgań oraz bezpośrednio określa moduł sprężystości badanego materiału [71]. Na fotografii poniżej przedstawiono próbkę podczas badania.



Fot. 4.4. Nieniszczące badanie modułu sprężystości betonu (fot. własna)

Następnie przeprowadzone zostało badanie modułu sprężystości w oparciu o normę PN-EN 12390-13-2014-02 [44]. Przygotowanie próbek do badania polegało na przyklejeniu na ściance próbki baz pomiarowych, a następnie umieszczeniu w nich tensometrów. Dla każdej próbki przygotowano trzy linie pomiarowe. Badanie polegało na obciążaniu próbki trzema cyklami badanej. Pierwsze obciążenie realizuje się do zakresu 0,1-0,15 wartości wytrzymałości betonu na ściskanie. Następnie próbka poddawana jest obciążeniu cyklem obciążenia, właściwym do wartości 0,33 wytrzymałości betonu na ściskanie f_{cm} . Czas trwania cykli obciążeń jest szczegółowo opisany w normie oraz literaturze [31]. Na poniższej fotografii przedstawiono próbkę podczas oznaczania modułu sprężystości w prasie ściskającej.



Rys. 4.10. Próbką podczas badania (fot. własna)

Bezpośrednim wynikiem badania jest wartość odkształcenia przy określonej wartości naprężeń ściskających. W celu obliczenia wartości modułu sprężystości posłużono się wzorem:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.3.)$$

gdzie:

$\Delta\sigma$ – przyrost naprężeń ściskających [MPa]

$\Delta\varepsilon$ – odkształcenie próbki

Tab. 4.20. Wyniki oznaczenia modułu sprężystości betonów

Rodzaj betonu	Nr próbki	Masa [g]	Moduł Younga zgodnie z PN-EN 12390-13-2014-02 [MPa]	Wartość średnia [MPa]	Moduł Younga zgodnie z PN-EN 12390-13-2014-02 [MPa]	Wartość średnia [MPa]
Z1	1	12446	40100	40467	38200	38567
	2	12468	41100		39100	
	3	12474	40200		38400	
Z2	1	12371	45500	45433	43800	44100
	2	12360	45500		44200	
	3	12360	45300		44300	
Z3	1	12443	46500	46667	45700	45233
	2	12484	46500		44900	
	3	12485	47000		45100	
Z4	1	12386	47000	46933	45400	45267
	2	12349	46700		44900	
	3	12320	47100		45500	
Z5	1	12199	44500	44800	43200	43567
	2	12205	45100		43800	
	3	12022	44800		43700	

W tabeli przedstawione zostały wartości dla każdej badanej próbki oraz wartości średnie dla poszczególnych betonów. Dla wszystkich rodzajów betonu widoczna jest nieznaczna różnica pomiędzy badaniem metodą rezonansową, a badaniem tensometrami. Wyniki otrzymane metodą rezonansową są wyższe, jednak różnica pomiędzy rezultatami wynosi ok. 2% do 4%. Pozwala to zatem sformułować wniosek, że oba badania przyniosły podobne rezultaty, a co za tym idzie wykonane zostały poprawnie. Do dalszej analizy przyjęto wyniki otrzymane podczas badania modułu sprężystości przy ściskaniu betonu.

5 Badania połączenia elementów nawierzchni kolejowej

Betony stosowane do nawierzchni, zarówno drogowych jak i kolejowych oprócz wytrzymałości na ściskanie muszą spełniać przede wszystkim właściwości wytrzymałości na rozciąganie. We wcześniejszym rozdziale pracy opisano sposób przekazywania obciążeń poprzecznych w nawierzchni kolejowej. Ważnym punktem jest przeniesienie sił poprzecznych z podpory blokowej na płytę torową.

5.1 Sprawdzenie wytrzymałości na rozłupywanie

Aby sprawdzić zjawisko odłupywania betonu w połączeniu podpory blokowej z płytą torową wykonano próbki w kształcie sześcianu. W badaniach laboratoryjnych odzwierciedlało to rzeczywisty sposób przenoszenia sił między tymi elementami i pozwalało zbadać wytrzymałość połączenia na rozciąganie przy rozłupywaniu. Próbki wykonano w następujący sposób:

- formę sześcienną wypełniono do połowy betonem wykorzystywanym do produkcji podpór blokowych (Z2-Z5),
- próbki poddano pielęgnacji, bez wyciągania z formy,
- po upływie 7 dni formę uzupełniono betonem nawierzchniowym Z1,
- po upływie kolejnych 2 dni próbki rozformowano oraz poddano pielęgnacji zgodnie z warunkami normowymi.

Po zakończeniu pielęgnacji betonu próbki wyjęto z wody, otarto, zważono, a następnie poddano badaniu w maszynie do badań wytrzymałościowych zgodnie z zaleceniami normowymi [43].

5.1.1 Wyniki

- Połączenie betonów Z1 i Z2

Tab. 5.1. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu połączenia Z1/Z2

Nr próbki	Z1/Z2	
	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	7885,1	1,85
2	8018,2	2,1
3	8024,9	3,9
4	8208,6	3,45
5	8106,2	3,95
Wartość średnia	8048,6	3,05
Odchylenie standardowe		1,00
Rozstęp próby		2,10

Po przeprowadzeniu badania obliczono wartość średnią wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu na poziomie 3,05 MPa. Zgodnie z normą PN-EN 13877-1 wartość ta pozwala zakwalifikować wynik do klasy wytrzymałości S3,0 [49].

- Połączenie betonów Z1 i Z3

Tab. 5.2. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu połączenia Z1/Z3

Nr próbki	Z1/Z3	
	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	7901	1,95
2	8083,9	2,8
3	7985,8	3,9
4	7869	3,1
5	8073,3	3,75
Wartość średnia	7982,6	3,1
Odchylenie standardowe		0,79
Rozstęp próby		1,95

Po przeprowadzeniu badania obliczono wartość średnią wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu na poziomie 3,10 MPa. Zgodnie z normą PN-EN 13877-1 wartość ta pozwala zakwalifikować wynik do klasy wytrzymałości S3,0 [49].

- Połączenie betonów Z1 i Z4

Tab. 5.3. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu połączenia Z1/Z4

Nr próbki	Z1/Z4	
	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	8285,1	1,85
2	8250,2	3,05
3	8086,7	3,75
4	8134,5	4,45
5	8200,1	3,35
Wartość średnia	8191,3	3,29
Odchylenie standardowe		0,96
Rozstęp próby		2,60

Po przeprowadzeniu badania obliczono wartość średnią wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu na poziomie 3,29 MPa. Zgodnie z normą PN-EN 13877-1 wartość ta pozwala zakwalifikować wynik do klasy wytrzymałości S3,0 [49].

- Połączenie betonów Z1 i Z5

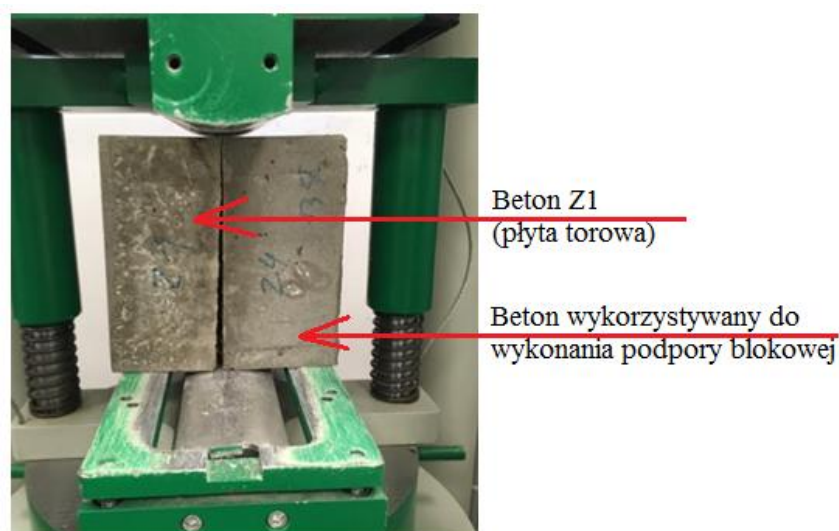
Tab. 5.4. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu połączenia Z1/Z5

Nr próbki	Z1/Z5	
	Masa [g]	Wytrzymałość [MPa]
1	8190	2,6
2	8088	2,45
3	8225,4	3,15
4	8030,1	2,55
5	8023	3
Wartość średnia	8111,3	2,75
Odchylenie standardowe		0,31
Rozstęp próby		0,70

Po przeprowadzeniu badania obliczono wartość średnią wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu na poziomie 2,75 MPa. Zgodnie z normą PN-EN 13877-1 wartość ta pozwala zakwalifikować wynik do klasy wytrzymałości S2,7 [49].

5.1.2 Podsumowanie przeprowadzonych badań

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono poprzez przyłożenie obciążenia w miejscu połączenia betonu nawierzchniowego z betonem do produkcji podpór blokowych. Z tego względu badanie nie może zostać uznane za normowe. Niemniej, w celu przyjęcia punktu odniesienia do wartości normowych wszystkie wyniki sklasyfikowano według kryteriów zawartych w normie „PN-EN 13877-1 Nawierzchnie betonowe. Część 1-Materiały”. Najwyższą wartość wytrzymałości na rozłupywanie osiągnięto dla połączenia betonów Z1 i Z4. Dla połączenia betonu Z1 z betonami Z2, Z3, Z4, wartości wytrzymałości można sklasyfikować jako klasę S3,0. Dla połączenia betonu Z1 z betonem bez dodatku włókien Z5 osiągnięto wartość 2,75, co pozwoliło sklasyfikować beton w klasie S2,7. Na fotografii 5.1. przedstawiono charakterystykę zniszczeń próbek w próbie rozłupywania.



Fot. 5.1. Charakterystyka zniszczenia podczas próby rozłupywania (fot. własna)

Wszystkie próbki uległy rozłupaniu wzdłuż linii styku materiałów. Przyczyną takiego stanu jest idealnie osiowe przyłożenie obciążenia do próbek. Zauważalna mniejsza wartość wytrzymałości na rozłupywanie betonu bez dodatku włókien wynika z bardziej gładkiej powierzchni na linii styku. Zastosowane podczas wykonywania próbek włókna ułożyły się w sposób losowy, część włókien wystawała ponad warstwę betonu, stanowiąc swego rodzaju małych rozmiarów kotwy w beton Z1. Podparciem tej tezy jest podobieństwo wyników dla betonów Z2, Z3 oraz Z4. W rzeczywistości powierzchnia prefabrykowanych podpór blokowych jest zacierana, a zatem wpływ wystających włókien jest marginalny.

5.2 Badanie pull-off

Określenie szczepności warstw betonu Z1 z betonami przeznaczonymi do produkcji podpór blokowych sprawdzono podczas badania pull-off. Próbki do badania wykonano analogicznie do kostek do badania rozciągania przy rozłupywaniu, z tym że w przypadku badania pull-off próbki wykonano jako belki o długości 70 cm. W celu lepszej przyczepności krążka pomiarowego wierzchnią warstwę próbek zeszlifowano po upływie 28 dni od wykonania próbek.

5.2.1 Opis badania

Badanie pull-off rozpoczyna się od nawiercenia wiertłem koronowym diamentowym otworu o średnicy 50 mm pod kątem 90° do płaszczyzny próbki. Ze względu na dwuwarstwowy układ próbki głębokość wiercenia dobrano tak, aby wiertło zagłębiło się 15 mm w drugą warstwę. Po wykonaniu otworów (po 5 na każdy rodzaj betonu do wykonywania podpór blokowych) wierzchnią warstwę próbek oczyszczono acetonem. Podobnie odtłuszczono krążek metalowy stanowiący element urządzenia pomiarowego. Następnie na powierzchnię krążka nałożono cienką warstwę kleju na bazie żywicy epoksydowej. Krążek metalowy przyciśnięto do próbki w miejscu otworu, a następnie obrócono tak, aby klej dokładnie rozmieścił się na całej powierzchni. Po związaniu kleju przystąpiono do badania. Na poniższej fotografii przedstawiono próbki betonowe przygotowane do badania.



Fot. 5.2. Próbki betonowe przygotowane do badania pull-off (fot. własna)

Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia BPS Wennigsen. Wynikiem pomiaru badania pull-off jest wartość wyrażona w Megapaskalach (MPa), obliczona na podstawie siły, przy której nastąpiło oderwanie warstwy naciętego materiału do której przymocowano krążek pomiarowy.

Badanie pull-off opisuje norma PN-EN 1542 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych - Metody badań - Pomiar przyczepności przez odrywanie. Norma ta określa również typ zniszczenia próbki, zależny od warstwy w której nastąpiło rozerwanie [38].

5.2.2 Wyniki badania

W tabeli poniżej przedstawiono wyniki badania pull-off dla próbek betonowych. Tabela przedstawia wartości przeliczone na MPa. Dla każdego betonu określono średnią wartość oderwania próbki.

Tab. 5.5. Wyniki badania pull-off

Nr próbki	Wytrzymałość połączenia [MPa]			
	Z1/Z2	Z1/Z3	Z1/Z4	Z1/Z5
1	4,19	4,84	4,48	2,18
2	4,1	4,79	5,02	4,12
3	4,8	4,62	5,03	4,97
4	4,56	4,65	4,45	4,65
5	3,83	5,06	5,2	2,42
Wartość średnia	4,3	4,79	4,84	3,67
Odchylenie stand.	0,38	0,18	0,35	1,29
Rozstęp próby	0,97	0,44	0,75	2,79

5.2.3 Podsumowanie

Po obliczeniu wartości średnich dla poszczególnych rodzajów betonu stwierdzono, że najniższą wartość przyczepności ma beton Z5 – bez dodatku włókien. Najwyższy natomiast beton Z4, z dodatkiem włókien szklanych. Jest to sytuacja analogiczna do tej stwierdzonej przy weryfikacji wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. W przypadku badania pull-off najczęstszym miejscem rozerwania nie było połączenie warstw, a beton Z1. W żadnej próbce nie doszło do zerwania w płaszczyźnie kleju. Na fotografii poniżej przedstawiono przykład rozerwania próbki w dolnej warstwie wraz z zaznaczoną powierzchnią połączenia warstw.



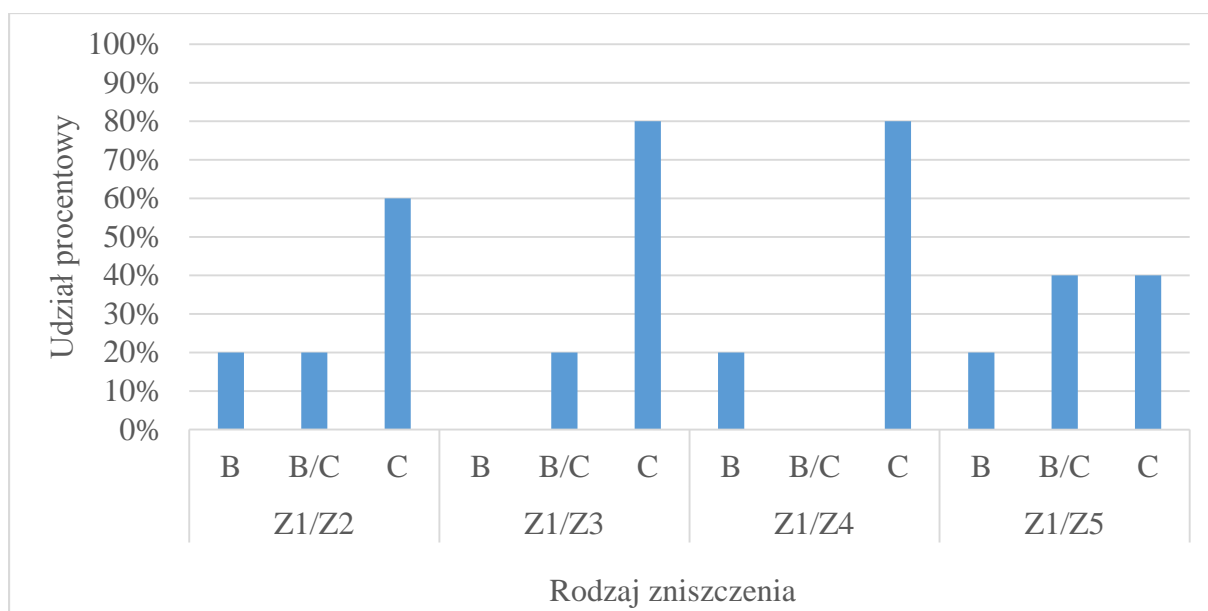
Fot. 5.3. Próbką po przeprowadzeniu badania z miejscem połączenia betonów (fot. własna)

Zgodnie z normą [38] sporządzono procentową klasyfikację uszkodzeń w oparciu o miejsce rozerwania. Wyniki zawarto w tabeli 5.6. Zgodnie z normą przyjęto następujące oznaczenia:

- B- zniszczenie w warstwie wykonanej z betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych (Z2-Z5)
- B/C – zniszczenie w miejscu połączenia warstw
- C – zniszczenie w warstwie wykonanej z betonu wykorzystywanego do budowy płyty torowej (Z1)

Tab. 5.6. Rozkład procentowy zniszczenia w próbkach

Rodzaj połączenia	Rodzaj zniszczenia	Udział procentowy ilości zniszczeń w ogólnej liczbie próbek
Z1/Z2	B	20%
	B/C	20%
	C	60%
Z1/Z3	B	0%
	B/C	20%
	C	80%
Z1/Z4	B	20%
	B/C	0%
	C	80%
Z1/Z5	B	20%
	B/C	40%
	C	40%



Rys. 5.1. Rozkład rodzaju zniszczenia próbek w badaniu pull-off

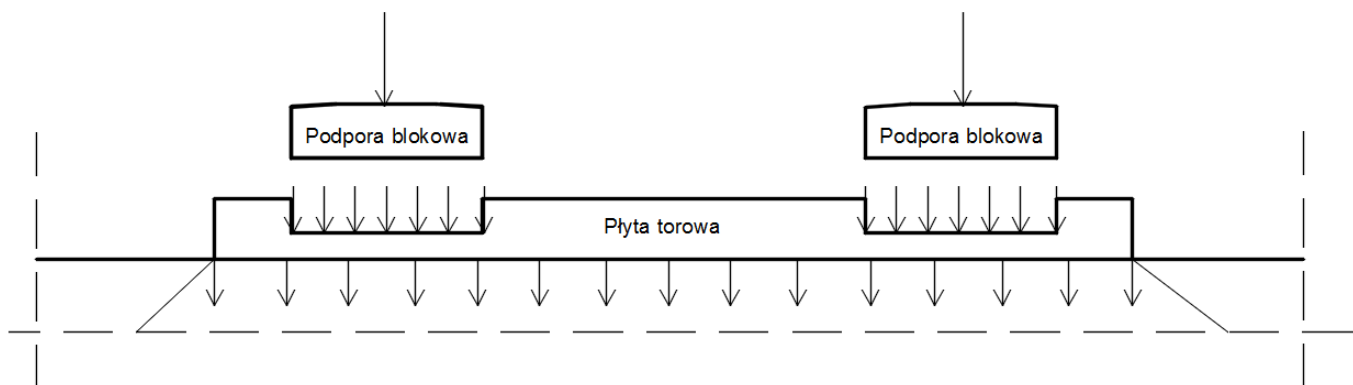
Najwięcej razy miejscem zerwania był beton Z1. Wynika to z faktu, że jest on materiałem słabszym od betonu do produkcji podpór blokowych. Zastanawiające jest natomiast, że w przypadku betonu Z5 zarówno wartości oderwania wyrażone w Megapaskalach, jak i procentowy rozkład miejsca oderwania jest inny. Wskazuje to jednoznacznie na wpływ dodatków w postaci włókien również na ten parametr wytrzymałościowy. Niemniej, należy zauważyć, że rozerwanie następowało w betonie Z1, zatem zastanawiające jest, w jaki sposób włókna wpływają na rozerwanie w warstwie niżej. Wynika to najpewniej z przyczepności między warstwową oraz lepszego rozkładu naprężeń rozciągających. Włókna w betonie górnym przyczyniły się do lepszego przeniesienia siły całą powierzchnią na niższą warstwę. Wpływ dodatku włókien na rozkład sił widoczny jest ponadto poprzez rozerwanie betonu w górnej warstwie jedynie w dwóch pomiarach.

Stosunkowo wysokie wartości osiągnięte podczas badania pull-off umożliwiają stwierdzenie, że w przypadku wystąpienia wysokich naprężeń zginających w szynach nie zachodzi niebezpieczeństwo wyrwania podpór blokowych z płyty torowej.

5.3 Sprawdzenie wytrzymałości na rozciąganie przekroju poprzecznego nawierzchni kolejowej bezpodsypankowej

5.3.1 Model rozkładu obciążenia na elementach nawierzchni

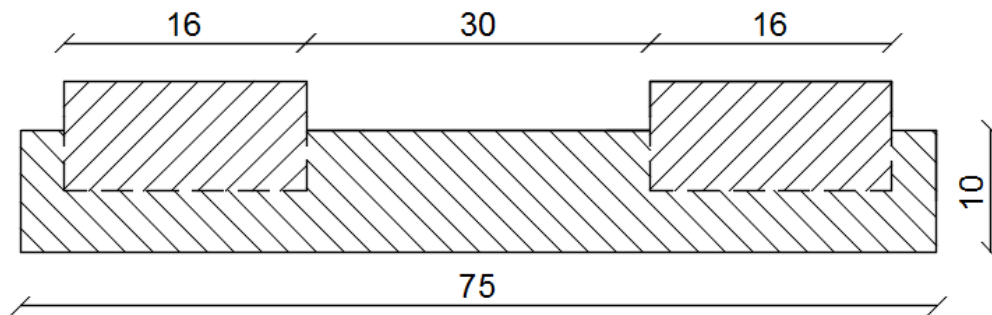
Określenie wpływu wytrzymałości podpór blokowych na wytrzymałość całej nawierzchni bezpodsypankowej przeprowadzono w oparciu o obciążenie przekroju poprzecznego nawierzchni. Zgodnie z przyjętym wcześniej modelem, w płycie torowej występują naprężenia rozciągające beton. Przy czym pod podporami blokowymi siły od pojazdu kolejowego powodują rozciąganie betonu ku dołowi, a w środku długości płyty wywoływane jest zjawisko usiłowania „podnoszenia” płyty. Model obciążenia płyty przyjęty do badania przekroju poprzecznego przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys. 5.2. Model rozkładu obciążeń przyjęty do badania

Ze względów na duży ciężar, przygotowanie próbki badawczej dla przekroju poprzecznego o wymiarach rzeczywistych było niemożliwe. Dlatego, celem sprawdzenia wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu konstrukcji rzeczywistej w skali laboratoryjnej przygotowano próbki o wymiarach 10x15x75 cm. Konstrukcję nawierzchni pomniejszono tak, że próbka stanowi 30% wymiarów rzeczywistych - przyjęty współczynnik skali wynosi 0,3. Dobór skali podyktowany był dostępnością form w laboratorium w ilości wystarczającej do wykonania wszystkich próbek. W laboratorium, w którym przeprowadzano badania dostępne były formy o długości 70 cm, 75 cm oraz 100 cm. Formy o długości 75 cm okazały się optymalnym rozwiązaniem ze względu na ich dostępną ilość. Model konstrukcji rozpatrywany w pracy ma szerokość 260 cm, zatem w skali 0,3 jest to niewiele ponad 75 cm. Taki dobór skali umożliwił wierne odtworzenie wymiarów i rozstawów podkładów kolejowych. Ponadto, przyjęcie współczynnika skali 0,3 uwarunkowane było również parametrami maszyny do badania wytrzymałości na rozciąganie belek – nie było możliwości

odzworowania przekroju poprzecznego w wymiarach rzeczywistych. Na rysunku 5.3. przedstawiono zaprojektowaną próbkę do badań wraz z wymiarami. Dodatkowo na fotografii 5.4. widoczna jest przygotowana próbka do badania.



Rys. 5.3. Model próbki laboratoryjnej (wymiarzy na rysunku podano w cm)



Fot. 5.4. Próbkę podczas ważenia (fot. własna)

Przygotowano również próbki mające na celu sprawdzenie czy podpory blokowe zespoliły się z betonem z płyty torowej. W próbkach tego rodzaju miejsce na podpory blokowe pozostawiono puste – podczas betonowania w formie umieszczono styropianowe prostopadłościany. Obciążenie takiej próbki wykaże, czy do jej zniszczenia potrzebna jest siła mniejsza niż do zniszczenia próbek z zabetonowanymi podporami blokowymi. Gdy siły te będą porównywalne oznaczać to będzie, że dwa rodzaje betonów nie ulegają zespoleniu, a podpora blokowa przekazuje obciążenie na płytę torową prostopadle. Poniżej przedstawiono próbki bez podpór blokowych.



Fot. 5.5. Próbkę referencyjną do sprawdzenia zespolenia betonów (fot. własna)

5.3.2 Próbkę z podporami blokowymi

Badania przeprowadzono dla wszystkich założonych rodzajów betonu. Obciążenie przyłożono w środku podpór blokowych, tak aby wiernie odwzorować siły występujące w konstrukcji. Punkty podparcia przyjęto w odległości 5 cm od krawędzi. Przyjęcie takiego rozstawu podpór ma na celu odtworzenie wariantu zniszczenia podbudowy podczas eksploatacji linii kolejowej. Zniszczenie to polega na osiadaniu bądź wymyciu podbudowy z centralnej części podpory. Maszyna do badania wytrzymałości określiła wartość siły jaką należy przyłożyć, aby próbkę uległa zniszczeniu. Wartość naprężeń w próbkach określono na podstawie poniższego wzoru [27, 42]:

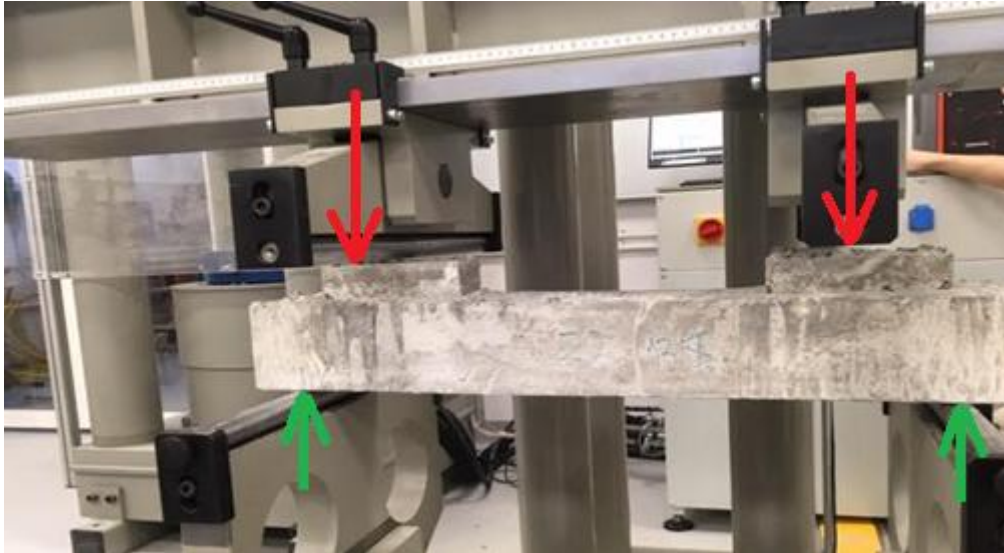
$$\sigma_g = \frac{P \cdot z}{2 \cdot W_g} \quad (5.1.)$$

gdzie:

P – siła działająca na próbkę [kN],

z – odległość siły od podpory – 0,05 m

W_g – wskaźnik wytrzymałości przekroju prostokątnego na zginanie względem osi pionowej [m³].



Fot. 5.6. Próbkę podczas badania wytrzymałości na rozciąganie, strzałkami oznaczono miejsca przyłożenia sił oraz podparcia (fot. własna)

- Beton z dodatkiem włókien stalowych Z2

Wyniki badań przedstawiono w tabeli poniżej.

Tab. 5.7. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla podpór z betonu Z2

Nr próbki	Z2	
	Wartość obciążenia próbki [kN]	Wytrzymałość [MPa]
1	35,88	6,82
2	32,30	6,14
3	36,30	6,90
Wartość średnia	34,83	6,62
Odchylenie standardowe	2,20	0,42
Rozstęp próby	4,00	0,76

- Beton z dodatkiem włókien polimerowych Z3

Wyniki badań przedstawiono w tabeli poniżej.

Tab. 5.8. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla podpór z betonu Z3

Nr próbki	Z3	
	Wartość obciążenia próbki [kN]	Wytrzymałość [MPa]
1	31,40	5,97
2	32,42	6,16
3	31,74	6,03
Wartość średnia	31,85	6,05
Odchylenie standardowe	0,52	0,10
Rozstęp próby	1,02	0,19

- Beton z dodatkiem włókien szklanych Z4

Wyniki badań przedstawiono w tabeli poniżej.

Tab. 5.9. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla podpór z betonu Z4

Nr próbki	Z4	
	Wartość obciążenia próbki [kN]	Wytrzymałość [MPa]
1	39,06	7,42
2	36,09	6,86
3	35,89	6,82
Wartość średnia	37,01	7,03
Odchylenie standardowe	1,78	0,34
Rozstęp próby	3,17	0,60

- Beton bez dodatku włókien Z5

Wyniki badań przedstawiono w tabeli poniżej.

Tab. 5.10. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla podpór z betonu Z5

NR PRÓBKII	Z5	
	Wartość obciążenia próbki [kN]	WYTRZYMAŁOŚĆ [MPa]
1	32,34	6,14
2	31,33	5,95
3	30,72	5,84
Wartość średnia	31,46	5,98
Odchylenie standardowe	0,82	0,16
Rozstęp próby	1,62	0,31

5.3.3 Próbki bez podpór blokowych

Analogicznie do poprzednich próbek, badania wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzono dla próbek bez podpór blokowych. W tabeli poniżej zamieszczono siły, przy jakich próbki uległy zniszczeniu. Dodatkowo na fotografii przedstawiono próbkę po przeprowadzeniu badania.

Tab. 5.11. Wyniki badań dla próbki bez podpór blokowych

Nr próbki	Masa [kg]	Siła [kN]
1	24,47	26,90
2	24,91	25,70
3	24,96	23,59
Wartość średnia	24,78	25,40
Odchylenie standardowe	0,27	1,68
Rozstęp próby	0,49	3,31



Fot. 5.7. Próbką po zniszczeniu (fot. własna)

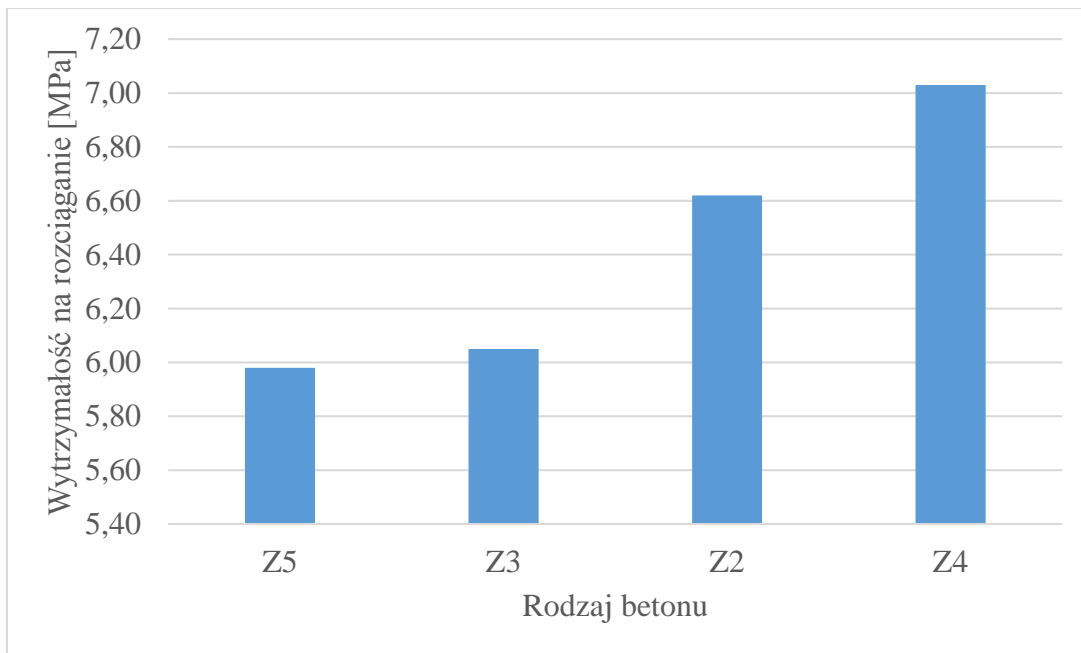
Średnia wartość siły potrzebnej do zniszczenia próbki wyniosła 25,40 kN. Jest to wartość zauważalnie niższa od próbek z podporami blokowymi. Zgodnie z przypuszczeniami próbka uległa zniszczeniu w miejscu o najmniejszym przekroju. W żadnej z próbek nie stwierdzono zniszczenia ścianki otworu na podporę blokową, a zatem stwierdzono, że wszystkie próbki dały miarodajne wyniki umożliwiające sformułowanie wniosków.

5.3.4 Podsumowanie

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla zaprojektowanego modelu obciążenia przeprowadzono zarówno dla belek z podporami blokowymi, jak i dla trzech belek z pustymi gniazdami w miejscu wbetonowania podpór blokowych.

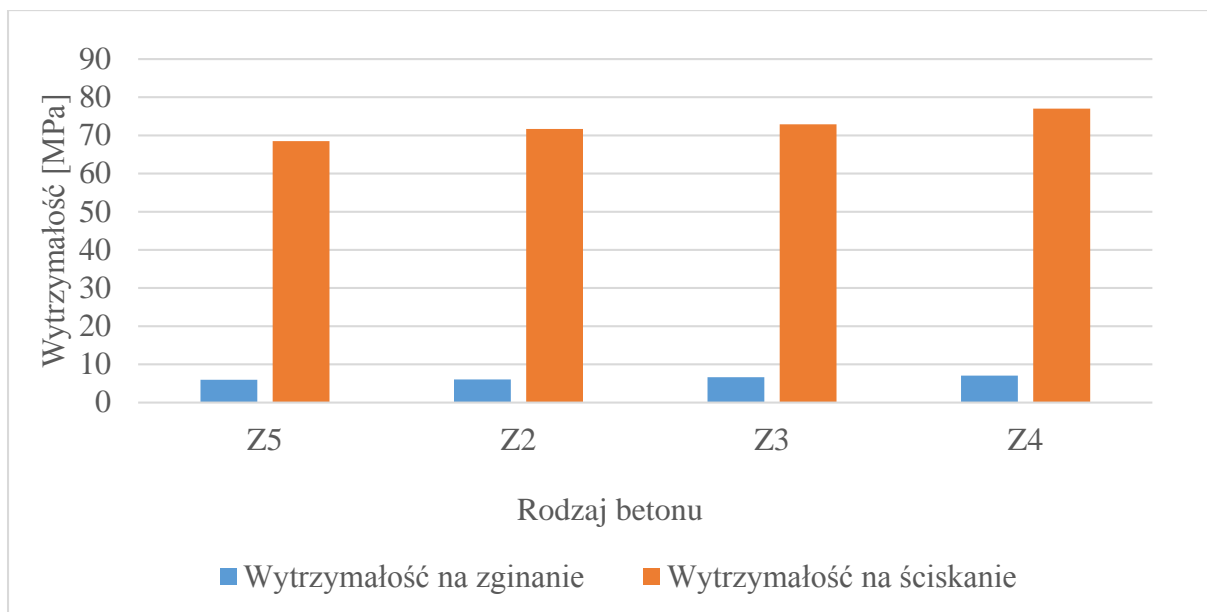
Próbki zbadano w maszynie do badań laboratoryjnych umożliwiającej przeprowadzenie zginania czteropunktowego. Zgodnie z wcześniejszym opisem, miejsce podparcia na krawędziach belki miało zasymulować utratę ciągłości podparcia nawierzchni. Obciążenie przyłożono do obu podpór blokowych.

Otrzymane rezultaty badań zamieszczono w poszczególnych tabelach. Na poniższym wykresie przedstawiono zestawienie wartości średnich dla betonów Z2 do Z5 wraz z odchyleniami od wartości średniej.



Rys. 5.4. Zestawienie wyników badania wytrzymałości na rozciąganie przekroju poprzecznego nawierzchni

Przedstawiona na wykresie wartość średnia wyników badania wytrzymałości na rozciąganie dla wszystkich badań wyniosła 6,42 MPa. Najmniejszą wytrzymałość na rozciąganie oznaczono dla próbek Z5, zatem z betonem w podporach blokowych bez dodatku włókien. Najwyższa wartość wytrzymałości otrzymano dla betonu Z4, z dodatkiem włókien szklanych. Pomimo, iż podpory blokowe stanowiły niewielki procent objętości próbki, to wpływ wytrzymałości podpór blokowych na cały układ jest zauważalny. Porównując otrzymane wartości z rezultatami wcześniejszych badań można stwierdzić korelację pomiędzy wytrzymałością na ściskanie betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych, a wytrzymałością na zginanie całej belki. Na poniższym wykresie przedstawiono zależność między wytrzymałością na ściskanie betonu do produkcji podpór blokowych, a wytrzymałością przekroju poprzecznego nawierzchni na zginanie.



Rys. 5.5. Zależność między wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na zginanie dla przekroju poprzecznego nawierzchni bezpodsypkowej

Widoczne na wykresie duże różnice w wytrzymałości na ściskanie betonów nie przedłożyły się na znaczną różnicę w wynikach wytrzymałości na zginanie modelu nawierzchni. Różnice w wynikach badania zginania dla poszczególnych betonów wynikać mogą ze zdolności podpór blokowych do rozkładu siły na powierzchnię płyty torowej.

Przyczyną wzrostu wytrzymałości na zginanie może być wzrastająca czynna powierzchnia styku podpory i płyty torowej. Poprawa docisku podpory do płyty jest skorelowana ze wzrostem wytrzymałości betonu, z którego wykonana jest podpora blokowa na ściskanie. W celu zweryfikowania rozkładu siły w podporze wykonano model obliczeniowy nawierzchni, którego analiza przeprowadzona została w kolejnym rozdziale pracy.

Co istotne, żadna z belek z podporami blokowymi nie uległa zniszczeniu pod podporą – to znaczy w miejscu gdzie płyta torowa jest najcieńsza. Na poniższej fotografii przedstawiono typowe zniszczenie belek w próbie wytrzymałościowej.



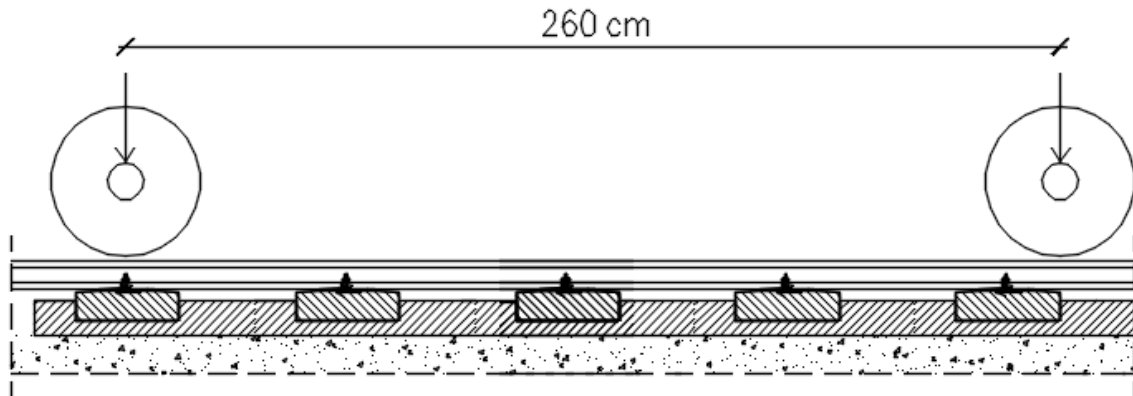
Fot. 5.8. Próbką po badaniu (fot. własna)

Taki charakter zniszczenia belki pozwala stwierdzić, że beton Z1 (płyta torowa) uległ w pewnym zakresie zespoleniu z podporami blokowymi i pracuje jako jednolity element. Na potwierdzenie tego przeprowadzono badania wytrzymałości na zginanie dla belki z pustymi gniazdami w miejscu podpór. W tym przypadku siły potrzebne do zniszczenia belki miały znacznie mniejsze wartości. Ponadto, jak pokazano na fotografii, próbki ulegały zniszczeniu w gnieździe, tj. najmniejszym przekroju poprzecznym belki.

5.4 Sprawdzenie wytrzymałości na rozciąganie przekroju podłużnego nawierzchni kolejowej bezpodsypkowej

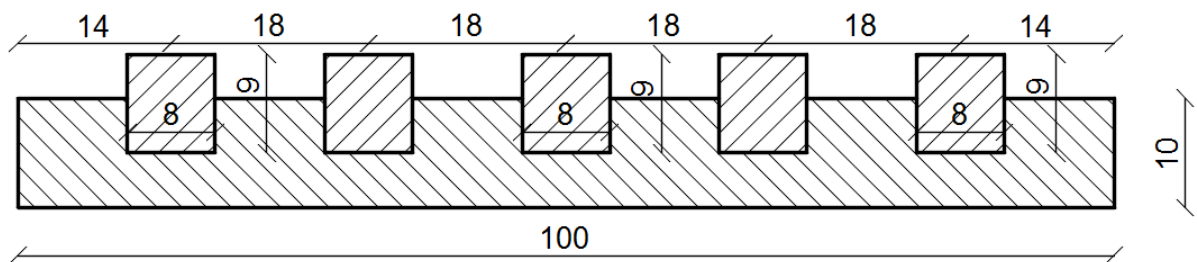
5.4.1 Model obciążenia

Kolejnym badaniem mającym na celu określenie wpływu wytrzymałości podpór blokowych na wytrzymałość całej nawierzchni było sprawdzenie wytrzymałości przekroju podłużnego. Badanie to miało na celu sprawdzenie nośności w kierunku wzdłuż toru, pochodzące od obciążenia osiami wózka lokomotywy AEG12X, o rozstawie 2,60 m. Nacisk osi lokomotywy wynosi 210 kN. Model obciążenia płyty przyjęty do badania przekroju podłużnego przedstawiono na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Schemat obciążenia nawierzchni kolejowej lokomotywą

Celem sprawdzenia wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wzdłuż nawierzchni przygotowano próbki o wymiarach 10x15x100 cm. Konstrukcję nawierzchni wykonano w skali 0,3. Jest to zatem taki sam współczynnik skali, jak w przypadku badania przekroju poprzecznego. Poza ograniczoną dostępnością dużych form do wykonania próbek, dobór współczynnika skali w tym badaniu podyktowany był możliwościami maszyny do badań wytrzymałościowych. Na rysunku 5.7. przedstawiono zaprojektowaną próbkę do badań wraz z wymiarami podanymi w cm. Dodatkowo na zamieszczonej fotografii 5.9. widoczna jest przygotowana próbka do badania.



Rys. 5.7. Schemat próbki do badań



Fot. 5.9. Przygotowana próbka do badania wytrzymałości na zginanie (fot. własna)

5.4.2 Wyniki badań

Badania przeprowadzono dla czterech rodzajów betonów podpór blokowych. Obciążenie przyłożono w środku podpór blokowych. Punkty podparcia przyjęto w odległości 5 cm od krawędzi, tj. analogicznie do badania zginania w kierunku poprzecznym.

Wartość naprężeń w próbkach określono analogicznie jak w poprzednim przypadku, z tym że dla tego badania odległość „z” siły obciążającej od podpory wyniosła 9 cm. Wyniki dla poszczególnych rodzajów betonu przedstawiono poniżej.

- Beton z dodatkiem włókien stalowych Z2

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.12.

Tab. 5.12. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla podpór z betonu Z2

Nr próbki	Siła [kN]	Wytrzymałość [MPa]
1	34,03	8,17
2	32,67	7,84
3	31,09	7,46
Wartość średnia	32,60	7,82
Odchylenie standardowe	1,47	0,36
Rozstęp próby	2,94	0,71

- Beton z dodatkiem włókien polimerowych Z3

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.13.

Tab. 5.13. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla podpór z betonu Z3

Nr próbki	Siła [kN]	Wytrzymałość [MPa]
1	32,4	7,78
2	34,2	8,21
3	31,56	7,57
Wartość średnia	32,72	7,85
Odchylenie standardowe	1,35	0,27
Rozstęp próby	2,64	0,64

- Beton z dodatkiem włókien szklanych Z4

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.14.

Tab. 5.14. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla podpór z betonu Z4

Nr próbki	Siła [kN]	Wytrzymałość [MPa]
1	34,23	8,22
2	33,68	8,08
3	31,2	7,49
Wartość średnia	33,04	7,93
Odchylenie standardowe	1,61	0,39
Rozstęp próby	3,03	0,73

- Beton bez dodatku włókien Z5

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.15.

Tab. 5.15. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie dla podpór z betonu Z5

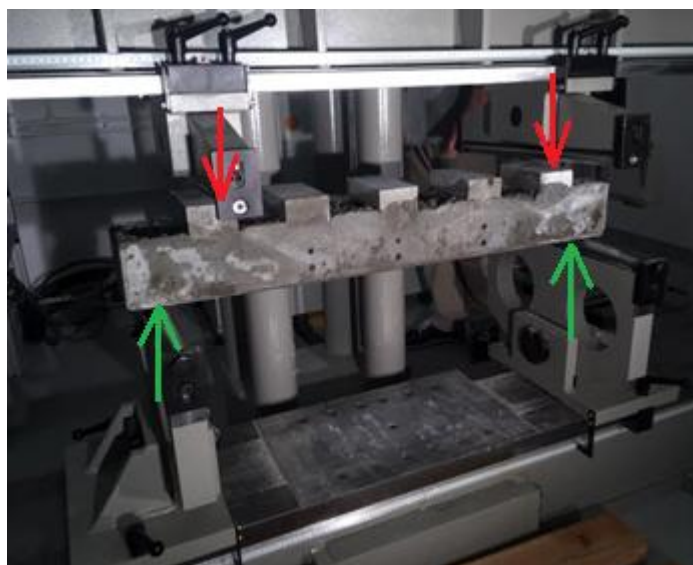
Nr próbki	Siła [kN]	Wytrzymałość [MPa]
1	30,21	7,25
2	29,94	7,19
3	31,06	7,45
Wartość średnia	30,40	7,30
Odchylenie standardowe	0,58	0,14
Rozstęp próby	1,12	0,26

5.4.3 Analiza kamerą do badań poklatkowych

Podczas przeprowadzania badań wytrzymałości na rozciąganiu w próbie zginania belek podłużnych stanowisko badawcze zostało rozbudowane o szybką kamerę dynamiczną do rejestracji zjawisk szybkozmiennych w czasie.

Celem analizy poklatkowej z wykorzystaniem kamery było pozyskanie informacji o zmianie położenia punktów umieszczonych na belce w czasie. Co za tym idzie, umożliwiło to sprawdzenie przemieszczenia poziomego i pionowego belki w czasie badania.

Pomiar kamerą dynamiczną wymusza przyjęcie na belce pomiarowej punktów charakterystycznych o znanym położeniu. W przypadku belek przygotowanych do analizy ugięcia podłużnego konstrukcji nawierzchni, punkty pomiarowe wyznaczone zostały odpowiednio 3 cm oraz 6 cm ponad dolną krawędzią płyty. Umieszczone zostały w osi podpór blokowych. Powodem takiego założenia był najmniejszy przekrój płyty torowej w tym miejscu, a w konsekwencji założenie największego prawdopodobieństwa największych przemieszczeń pod podporą oraz zniszczenia belki właśnie w tym miejscu. Na fotografii 5.10. przedstawiono stanowisko do badania przemieszczeń kamerą dynamiczną podczas zginania. Na belce widoczne są zaznaczone punkty pomiarowe zaznaczone kolorem czarnym. Dodatkowo strzałkami oznaczono miejsce przyłożenia sił i podparcia belki.



Fot. 5.10. Stanowisko do badania wytrzymałości na zginanie wzdłuż toru (fot. własna)

5.4.3.1 Opis urządzenia pomiarowego

Kamera wykorzystana podczas badania to VISION RESEARCH MODEL PHANTOM MIRO LC310. Kamera została ustawiona na statywie zapewniającym całkowitą stabilność podczas badania. Dodatkowo, celem zapewnienia wystarczającego oświetlenia miejsca badania, stanowisko zostało doświetlone dwoma reflektorami halogenowymi o wysokiej mocy. Kamera wraz z reflektorami ustawiona została w odległości 250 cm od stanowiska badawczego. Zalecany przez producenta kamery dystans pomiędzy stanowiskiem badawczym a kamerą nie powinien przekraczać 300 cm [33]. Takie ustawienie kamery oraz reflektorów umożliwiło równomierne doświetlenie belek badawczych. Ponadto w takiej odległości belki pomiarowe mogły znaleźć się w centralnej części kadru. Dodatkowo, odległość 250 cm umożliwiła swobodne przemieszczanie się pomiędzy maszyną do badań wytrzymałościowych a kamerą, a także zabezpieczyła statyw przed naruszeniem odpryskami betonu.

Kamera PHANTOM MIRO LC310 stanowi wyposażenie Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej. Umożliwia ona przeprowadzanie analizy pokłatkowej dla badań wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych. Na poniższej fotografii pokazano kamerę do badań dynamicznych wraz z reflektorami oraz komputerem rejestrującym dane.



Rys. 5.8. Kamera PHANTOM MIRO LC310 wraz z wyposażeniem na stanowisku pomiarowym (fot. własna)

Kamera umożliwia nagrywanie filmów z prędkością 3200 klatek na sekundę. Ze względu na rodzaj przeprowadzanych analiz, podczas badania wykorzystano nagrywanie w trybie monochromatycznym. Szczegółowe parametry kamery PHANTOM MIRO LC310 przedstawiono w tabeli 5.16.

Tab. 5.16. Parametry kamery do rejestracji zjawisk szybkozmiennych [33]

Kamera PHANTOM MIRO LC310		
Lp.	Parametr	Wartość
1	rozdzielczość maksymalna	1280x800
2	maksymalna ilość klatek na sekundę	3200
3	wydajność	3,2 Gpx/s
4	rozmiar obiektywu	25,6x16,0 mm
5	rozmiar piksela	20 μm
6	minimalny czas ekspozycji	1 μs
7	dotatkowe właściwości	tryb serii, możliwość skracania nagrania

Integralną częścią zespołu pomiarowego jest oprogramowanie do obróbki filmów poklatkowych TEMA MOTION ANALYSIS. Oprogramowanie umożliwia import sekwencji obrazów oraz ciągle automatyczne śledzenie dowolnego obiektu w całej sekwencji za pomocą zestawu algorytmów śledzenia. Wyniki umieszczane są w tabelach w programie Microsoft Excel [66].

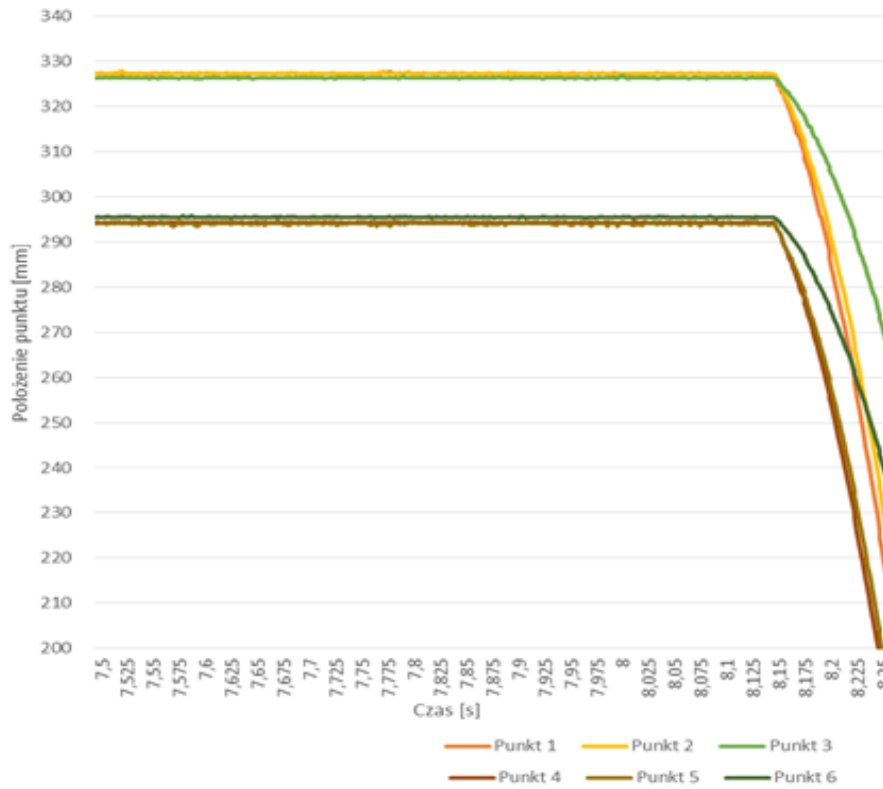
W przypadku analizy przemieszczenia punktów na belce podczas zginania, pierwszy etap stanowiło obranie początku układu współrzędnych. Dla badanych belek punkt (0,0) umiejscowiony został w narożu przedniej płaszczyzny belki. Następną czynnością było wskazanie w programie punktów, które muszą być śledzone podczas analizy. Tak jak wskazano wcześniej w pracy, dla każdej belki naniesiono 6 punktów pomiarowych – po 2 punkty pod podporami blokowymi nieobciążonymi. Następnie, wykorzystując możliwość kamery, skrócono film o czas w którym punkty wykazały zerowe przemieszczenia. Po przeprowadzeniu analizy program wygenerował tabele z wartościami przemieszczeń oraz wykresy przemieszczeń w czasie.

5.4.3.2 Rezultaty analizy kamerą do badań poklatkowych

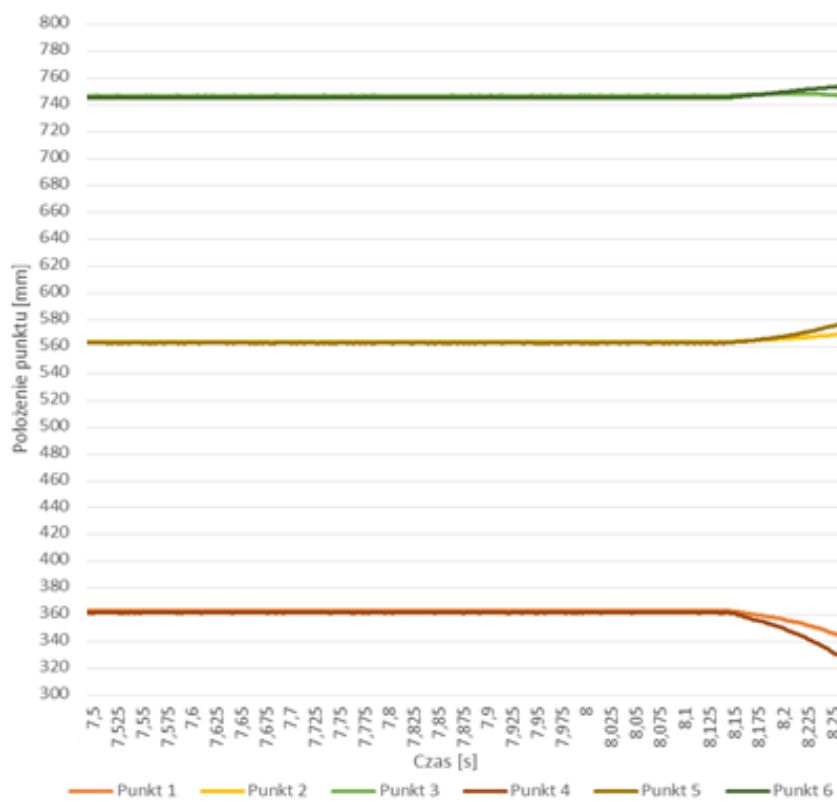
Przeprowadzona analiza kamerą do badań poklatkowych pomogła scharakteryzować mechanizm zniszczenia próbki. Rejestrację wideo przeprowadzono podczas niszczenia wszystkich próbek betonowych. Niemniej, ze względu na niemal identyczny mechanizm zniszczenia poniżej opisano rezultaty otrzymane dla próbki nr 1 betonu Z2. Na fotografii 5.11. przedstawiono próbkę w momencie zniszczenia. Następnie, na kolejnych rysunkach przedstawiono wykresy przemieszczeń dla punktów pomiarowych.



Fot. 5.11. Moment zniszczenia próbki wraz z widocznymi punktami pomiarowymi
(fot. własna)



Rys. 5.9. Wykres przemieszczeń pionowych dla punktów pomiarowych



Rys. 5.10. Wykres przemieszczeń poziomych dla punktów pomiarowych

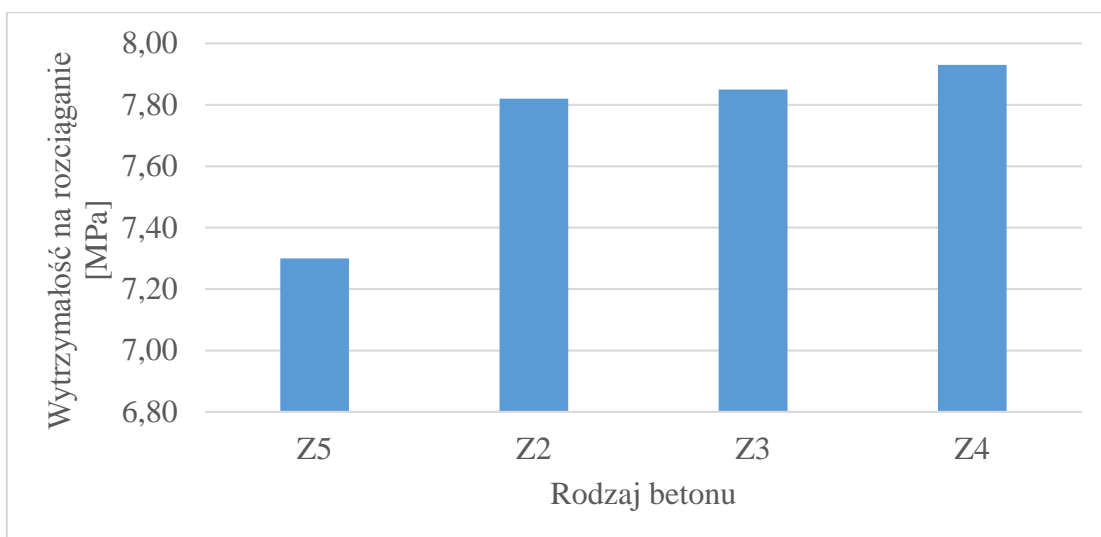
Na wykresach wskazano położenie punktów pomiarowych podczas końcowej fazy badania. Czas do 7,5 sekundy, ze względu na brak przemieszczeń i czytelność wykresu pominięto. Ponadto, w zakresie od 7,5 do 8 sekundy widać na wykresie minimalne zmiany położenia próbki. Wynikać one mogą z pracy maszyny do badań wytrzymałościowych. Znaczne zmiany położenia punktów rozpoczynają się od około 8,1 sekundy. Mają one charakter gwałtowny. Rozpoczynają się tuż przed zniszczeniem badanego elementu. Rejestracja procesu do analizy zakończona jest w sekundzie 8,25. Jest to moment gdy zniszczona próbka wypadła z maszyny badawczej. Analogicznie jest w przypadku przemieszczeń poziomych weryfikowanych punktów. Tutaj również podczas wzrostu siły obciążającej nie stwierdzono przemieszczeń punktów. Zaobserwowany ruch pochodzi wyłącznie od drgań urządzenia badawczego.

Badanie kamerą do badań poklatkowych wykazało, że płyta torowa wykonana z betonu Z1 ze względu na brak zbrojenia nie wykazała zdolności do odkształcenia pod wpływem działających sił. Oznaczać to może, że w żadnym z analizowanych przypadków wartości sił potrzebnych do zniszczenia próbek nie zwiększyły się w skutek „odpowiedzi” betonu Z1. Z bardzo dużą dozą prawdopodobieństwa stwierdzić można, że określone badaniem wytrzymałości próbek na rozciąganie przy zginaniu zależą zatem głównie od wytrzymałości betonów w podporach blokowych.

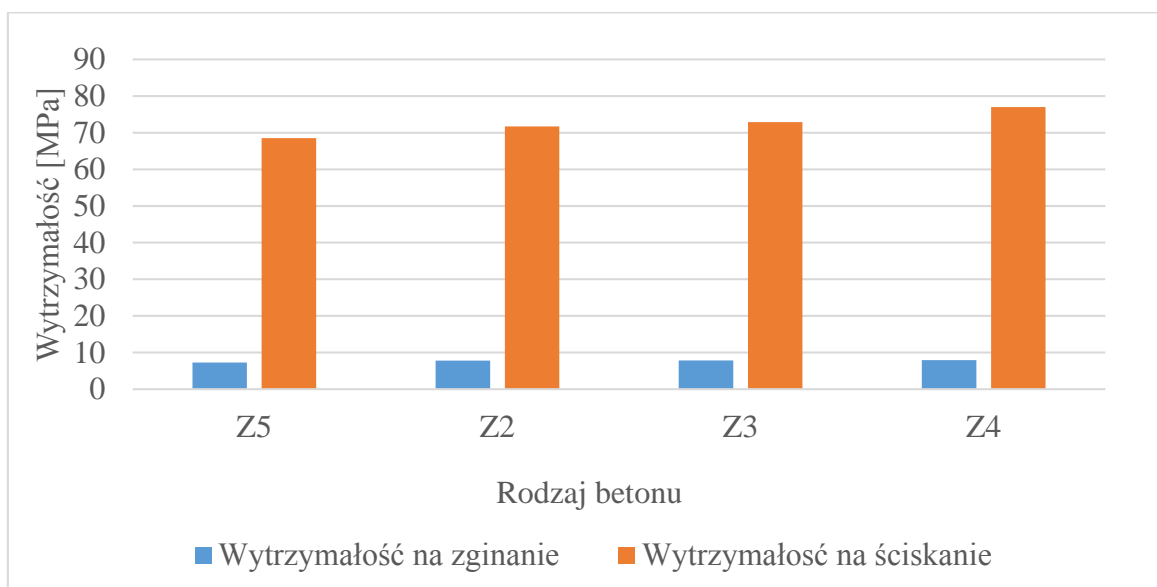
5.4.4 Podsumowanie badania wytrzymałości na rozciąganie przekroju podłużnego

Kolejnym badaniem wytrzymałościowym dla zaprojektowanych betonów była próba wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Zaproponowany model próbek miał na celu jak najlepsze zobrazowanie w warunkach laboratoryjnych rzeczywistego układu konstrukcyjnego.

Podobnie jak w przypadku badania przekroju poprzecznego nawierzchni, tutaj również próbki zbadano w maszynie do badań laboratoryjnych umożliwiającej przeprowadzenie zginania czteropunktowego. Miejsce podparcia dobrano analogicznie do próbek poprzecznych. W obu przypadkach dobór miejsca podparcia nie był podyktowany wymaganiami normowymi, a przede wszystkim chęcią odwzorowania rzeczywistości, bez zagrożenia zniszczenia końcowych części belki. Siły przyłożono do skrajnych podpór blokowych tak, aby odtworzyć obciążenie taborem kolejowym. Na wykresach przedstawiono zestawienie wartości średnich wyników otrzymanych podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla betonów Z2 do Z5.



Rys. 5.11. Zestawienie wyników



Rys. 5.12. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie w belce podłużnej

Analogicznie do badania belek odwzorowujących przekrój poprzeczny nawierzchni, również w tym przypadku duże różnice w wytrzymałości na ściskanie betonów nie przedłożyły się na znaczną różnicę w wynikach wytrzymałości na zginanie modelu nawierzchni. Potwierdza to wniosek płynący z poprzedniego badania o nieznacznym wpływie wytrzymałości na ściskanie na zdolność eksploatacyjną całej konstrukcji nawierzchni.

Żadna z belek z podporami blokowymi nie uległa zniszczeniu pod podporą – tam gdzie płyta torowa jest najcieńsza. Na fotografii 5.12. przedstawiono typowe zniszczenie belek w próbie wytrzymałościowej.



Fot. 5.12. Próbką po badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (fot. własna)

Charakter zniszczenia belki wskazuje na zespolenie płyty z podporami blokowymi. Belka pracuje jednorodnie. W celu zweryfikowania rozkładu naprężeń pod podporą blokową w przekroju podłużnym przeprowadzono analizę numeryczną konstrukcji.

6 Modelowanie numeryczne

Dzięki wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych i oprogramowania komputerowego, przeprowadzona została analiza naprężeń w płycie nawierzchni bezpodsypkowej pochodzących od rzeczywistego obciążenia kołami lokomotywy. Umożliwiło to sprawdzenie, czy w rzeczywistej konstrukcji różnica w wytrzymałości betonu podpór blokowych przekłada się na rozkład naprężeń w płycie torowej. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

6.1 Wprowadzenie

W celu zapewnienia korelacji badań laboratoryjnych z analizą numeryczną, wszystkie materiały wprowadzone do programu miały właściwości fizyczne i wytrzymałościowe otrzymane w badaniach betonów w laboratorium. Do programu wprowadzono między innymi wytrzymałość betonu na ściskanie oraz moduł sprężystości betonu. Obliczenia przeprowadzono dla szyny kolejowej 60E1. Przyjęto podłoże jednorodne, sprężyste pod całą powierzchnią płyty. Parametry materiałów wykorzystane do przygotowania modelu numerycznego zamieszczono w tabeli 6.1.

Tab. 6.1. Parametry konstrukcji nawierzchni wykorzystane do analizy numerycznej

Lp.	Parametr	Wartość
1	nacisk na oś	210 kN
2	nacisk na koło	105 kN
3	rozstaw kół	2,6 m
4	rozstaw podkładów	0,6 m
5	moduł sprężystości podbudowy	216 000 kN/m
6	moduł Younga szyny 60E1	210 000 Mpa
7	wytrzymałość na ściskanie betonu dla płyty torowej (Z1)	59,8 MPa
8	moduł Younga betonu dla płyty torowej (Z1)	38 600 MPa
9	wytrzymałość na ściskanie betonu dla podpory blokowej (Z2)	71,7 MPa
10	moduł Younga betonu płyt dla podpory blokowej (Z2)	44 100 MPa
11	wytrzymałość na ściskanie betonu dla podpory blokowej (Z3)	72,9 MPa
12	moduł Younga betonu płyt dla podpory blokowej (Z3)	45 200 MPa
13	wytrzymałość na ściskanie betonu dla podpory blokowej (Z4)	77 MPa
14	moduł Younga betonu płyt dla podpory blokowej (Z4)	45 300 MPa
15	wytrzymałość na ściskanie betonu dla podpory blokowej (Z5)	68,5 MPa
16	moduł Younga betonu płyt dla podpory blokowej (Z5)	43 600 MPa

Model konstrukcji nawierzchni do analizy numerycznej przygotowany został na podstawie powyższych danych oraz wymiarów konstrukcji zgodnych z Rys. 2.2. Analiza numeryczna umożliwiła sprawdzenie rzeczywistego układu konstrukcyjnego. Zakres pracy doktorskiej nie obejmuje analizy wpływu szyny na konstrukcje nawierzchni. Parametry szyny przyjęte zostały jako niezmiennie. Wobec tego, aby zapewnić przejrzystość modelu, dokonano podziału analizy numerycznej na dwa etapy.

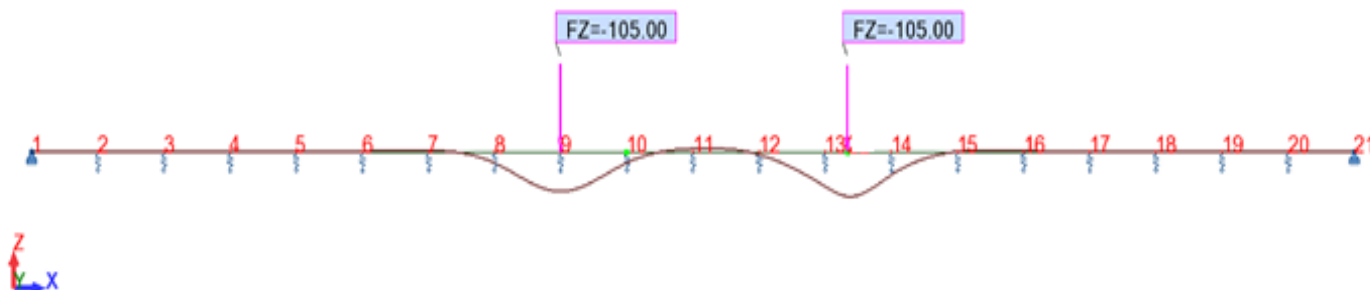
W pierwszym etapie obliczono rozkład sił pochodzących od nacisku lokomotywy AEG12X, o rozstawie osi 2,6 m, na niższe warstwy konstrukcji. Tok szynowy zamodelowano jako belkę podpartą sprężystości w rozstawie 0,6 m. Zgodnie z założeniem pracy, zmiana parametrów podpór blokowych nie ma wpływu na wartości rozkładu sił na podpory. Obliczone wartości wykorzystano w kolejnym etapie analizy.

Drugi etap polegał na zamodelowaniu płyty torowej z podporami blokowymi oraz obciążeniu jej obliczonymi wcześniej wartościami rozkładu sił. Elementy konstrukcji zamodelowano jako obiekty objętościowe. Rezultatem analizy jest opracowana dla każdego rodzaju betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych mapa naprężeń dla przekroju poprzecznego i podłużnego konstrukcji nawierzchni. Przedstawione w kolejnych podrozdziałach mapy naprężeń dotyczą tych przekrojów nawierzchni, w których obliczone naprężenia były największe.

6.2 Obliczenie reakcji podporowych

Pierwszym etapem analizy było obliczenie reakcji podporowych w podporach blokowych pochodzących od nacisku lokomotywy. Do obliczeń przyjęto lokomotywę AEG12X. Jest to lokomotywa niemieckiej produkcji, o układzie osi Bo'-Bo'. Rozstaw osi lokomotywy wynosi 2,6 m, a nacisk 210 kN na oś. Zatem na koło przypada nacisk 105 kN. Przyjęto rozstaw podpór blokowych równy 0,6 m. Wartość parametru sprężystości podpory „k” przyjęto w oparciu o moduły sprężystości dla materiałów, z których wykonano płytę torową i podpory blokowe. Wynik obliczeń sił przekazywanych przez koła poprzez szynę na niższe warstwy konstrukcji nawierzchni przedstawiono na Rys. 6.1. Sprężyny widoczne na rysunku przedstawiają podkłady kolejowe na których oparta jest szyna, przedstawiona w postaci belki. Siłą FZ o wartości 105 kN to nacisk koła lokomotywy AEG12X na szynę, równy połowie wartości nacisku osi. Układ współrzędnych w programie Robot charakteryzuje się osią pionową skierowaną ku górze. Z tego względu na rysunkach

stanowiących wydruki z programu wartości sił działające na nawierzchnię mają znaki ujemne.



Rys. 6.1. Rozkład sił pochodzących od koła lokomotywy na niższe warstwy konstrukcji nawierzchni

Po przeprowadzeniu obliczeń otrzymano rezultaty dla każdej podpory. Wyniki zamieszczono w tabeli 6.2.

Tab. 6.2. Obliczony rozkład sił na podpory blokowe

Numer podpory	Siła pionowa [kN]	Numer podpory	Siła pionowa [kN]
1	0	12	4,8
2	0	13	63,44
3	0	14	42,24
4	0,08	15	-0,74
5	0,1	16	-2,37
6	-1,27	17	-0,08
7	-3,02	18	0,13
8	20,24	19	0,01
9	72,96	20	0
10	19,71	21	0
11	-6,22		

Jak pokazują wyniki przedstawione w tabeli, największa wartość występuje bezpośrednio pod obciążeniem kołem lokomotywy, to jest w podporze numer 10. Drugie koło wózka lokomotywy, ze względu na rozstaw osi zawsze trafia pomiędzy dwa podkłady kolejowe. Z tego powodu siła rozkłada się między sąsiadujące podpory. Dla części podpór obliczone wartości mają znak ujemny. Wskazuje to miejsca, gdzie obciążenie taborem usiłuje niejako podnieść szynę. Wszystkie wartości zostały przeniesione do kolejnego modelu konstrukcji nawierzchni.

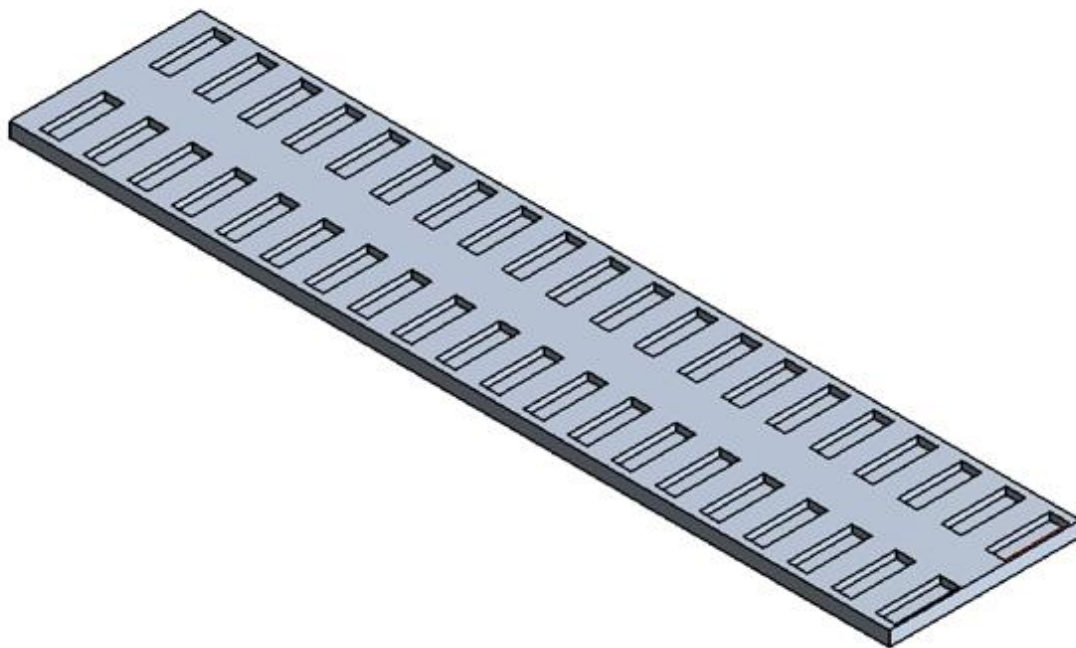
6.3 Modelowanie obciążenia nawierzchni bezpodsypankowej

Obliczone reakcje podporowe wykorzystano do przeprowadzenia analizy rozkładu naprężeń w konstrukcji nawierzchni.

Modele numeryczne konstrukcji wykonano dla czterech rodzajów podpór blokowych, różniących się dodatkiem włókien do betonu. Podpory zamodelowano jako częściowo zabetonowane w konstrukcji płyty torowej, zgodnie z rzeczywistą charakterystyką nawierzchni.

Analizę numeryczną przeprowadzono poprzez stworzenie modelu objętościowego nawierzchni. Konstrukcja objętościowa umożliwia weryfikację stanu naprężeń w dowolnie wybranym przekroju konstrukcji. Celem analizy numerycznej było określenie naprężeń zarówno w miejscu połączenia podpory blokowej z płytą torową, jak i w dolnej krawędzi płyty, tak, aby sprawdzić zmianę rozkładu naprężeń zależnie od przyjętego materiału. Konstrukcja objętościowa umożliwia połączenie dwóch rodzajów materiałów w sytuacji gdy jeden element jest częściowo lub całkowicie zatopiony w elemencie wykonanym z innego materiału. Podpora blokowa zabetonowana w płycie torowej jest właśnie takim przypadkiem.

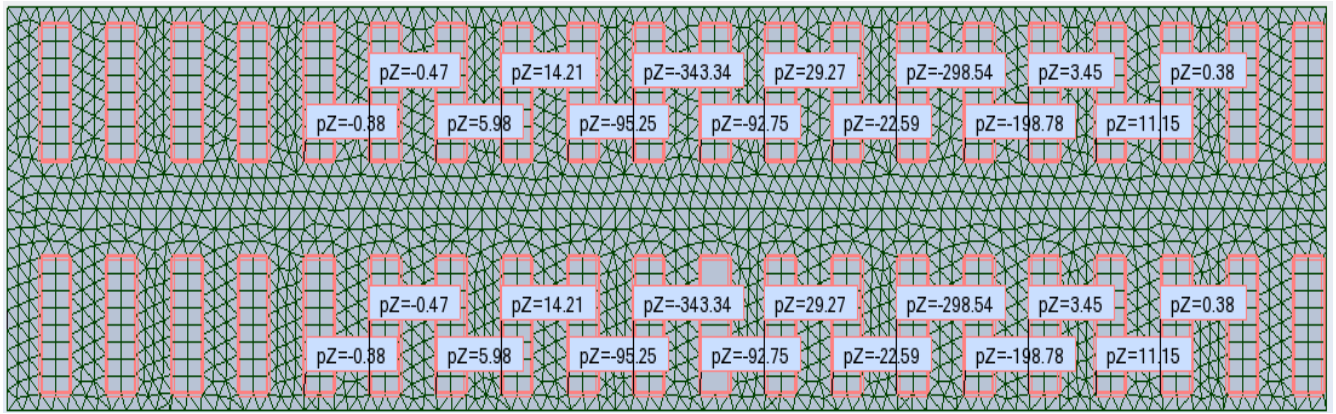
Pierwszym etapem było wykonanie modelu objętościowego płyty torowej. Wymiary płyty odpowiadają założeniom przyjętym do pracy. W płycie torowej wykonano gniazda na podpory blokowe. Rozstaw gniazd wynosi 0,6 m. Model płyty torowej przedstawiono na Rys. 6.2.



Rys. 6.2. Model płyty torowej

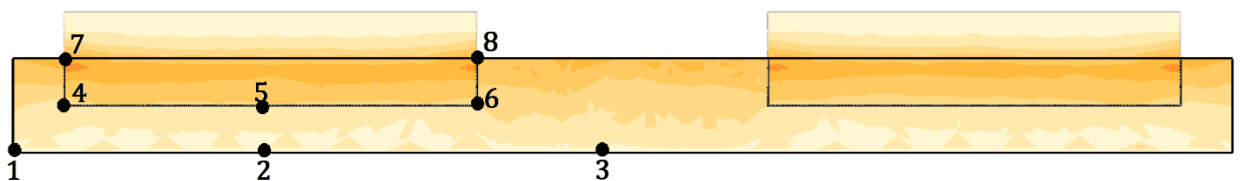
Kolejnym etapem było umieszczenie w gniazdach w płycie torowej podpór blokowych. Podpory zostały obciążone siłami równomiernie rozłożonymi na ich powierzchnię. Wartości reakcji podporowych obliczonych w poprzednim kroku podzielono przez powierzchnię podpory. Przed przystąpieniem do obliczeń przeprowadzono siatkowanie modelu. Z uwagi na możliwości obliczeniowe komputera, jak również konieczność otrzymania rezultatów w wyznaczonych punktach weryfikacji, przyjęto siatkowanie z podziałem na elementy o długości boku 5 cm. W opcjach programu umożliwiono automatyczne dogęszczenie siatki podczas obliczeń.

Model służący do obliczeń z przygotowaną siatką elementów skończonych przedstawiono na Rys. 6.3. Obciążenie rozłożonym naciskiem pochodzącym od kół lokomotywy oznaczono jako siły pZ. Wartości podano w kN. Z uwagi na układ współrzędnych w programie komputerowym wartości sił na rysunku mają znak ujemny.

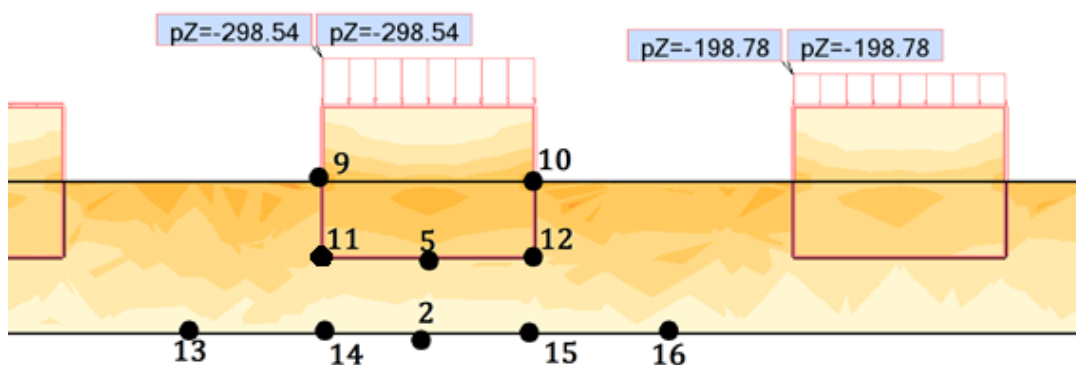


Rys. 6.3. Model konstrukcji nawierzchni do obliczeń MES

Podobnie jak w poprzednich częściach pracy modele betonu oznaczono symbolami od Z2 do Z5, ze względu na zastosowany beton. Podpory zostały obciążone siłami powierzchniowymi – wartości nacisków podzielono przez powierzchnię podpory. Rezultaty analizy numerycznej dla kolejnych betonów przedstawiono poniżej. Ponieważ po przeprowadzeniu obliczeń dla każdego wariantu podpór największe naprężenia w przekroju poprzecznym i podłużnym wystąpiły pod podporami, pomiędzy którymi znajduje się koło pojazdu, to właśnie tam zdefiniowano punkty do porównania naprężeń. Oznaczenia punktów przyjęto według poniższego rysunku. Punkty określono w miejscach charakterystycznych – w przecięciu krawędzi styku podpory i płyty torowej oraz w dolnej powierzchni płyty torowej – na krawędzi, pod podporą oraz w środku odległości między podporami. Rozmieszczenie punktów przedstawiono na Rys. 6.4. oraz Rys. 6.5.



Rys. 6.4. Rozmieszczenie punktów do porównania naprężeń – przekrój poprzeczny nawierzchni bezpodsypankowej

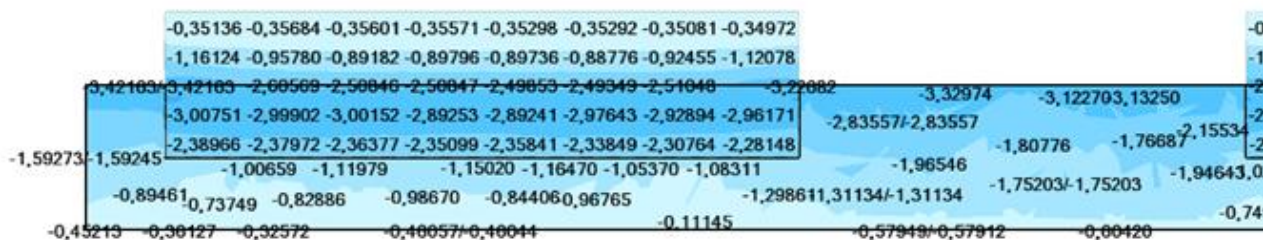


Rys. 6.5. Rozmieszczenie punktów do porównania naprężeń – przekrój podłużny nawierzchni bezpodsypkowej

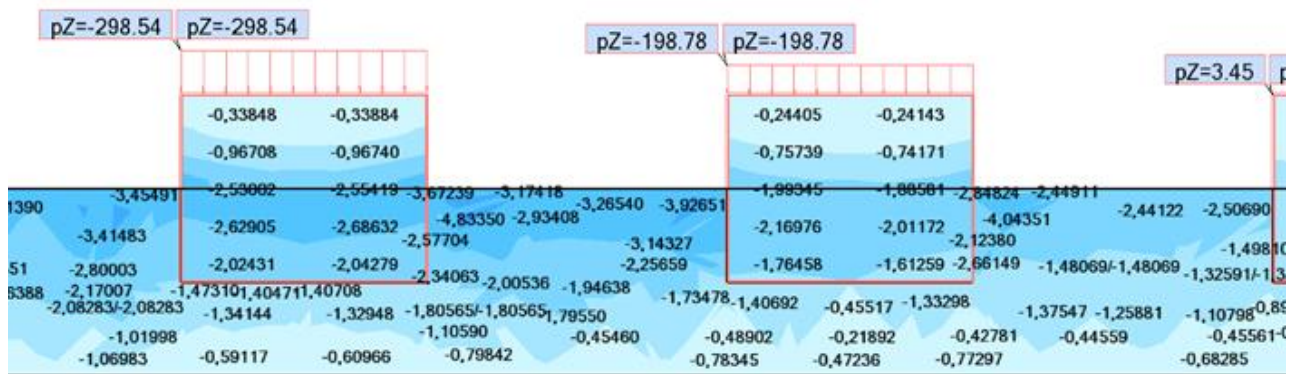
Zgodnie z konwencją znakowania w programie Autodesk Robot dodatnie znaki naprężeń oznaczają rozciąganie, przeciwne natomiast ściskanie modelu.

- Podpory blokowe wykonane z betonu Z2

Na poniższych rysunkach przedstawiono rozkład naprężeń w konstrukcji w miejscu o największym wyężeniu w przekroju poprzecznym i podłużnym.



Rys. 6.6. Naprężenia w kierunku poprzecznym (beton Z2) (por. z Rys. 6.4.)



Rys. 6.7. Naprężenia w kierunku podłużnym (beton Z2) (por. z Rys. 6.5.)

Tab. 6.3. Wartości naprężeń w punktach weryfikacji dla przekroju poprzecznego i podłużnego nawierzchni bezpodsypkowej

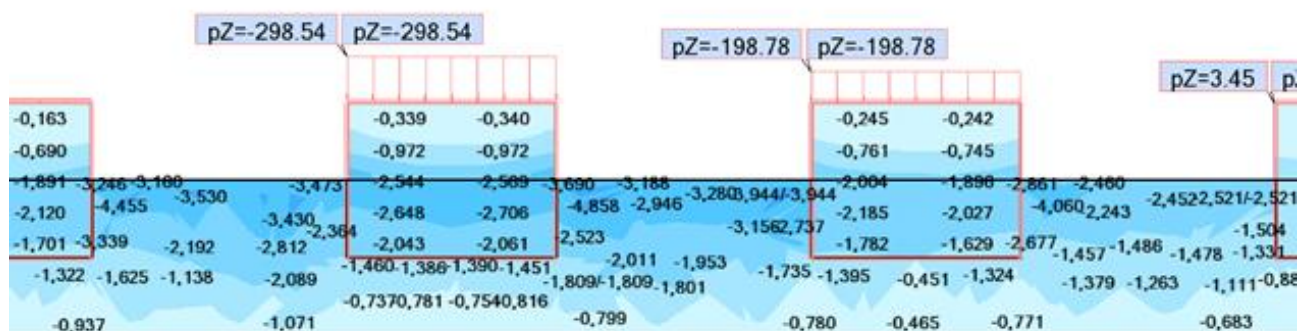
Nr punktu	Wartość naprężenia [MPa]
1	-0,442
2	-0,6
3	-0,564
4	-1,212
5	-1,251
6	-1,425
7	-3,421
8	-3,252
9	-3,462
10	-3,672
11	-1,471
12	-1,738
13	-1,069
14	-0,588
15	-0,726
16	-0,792

- Podpory blokowe wykonane z betonu Z3

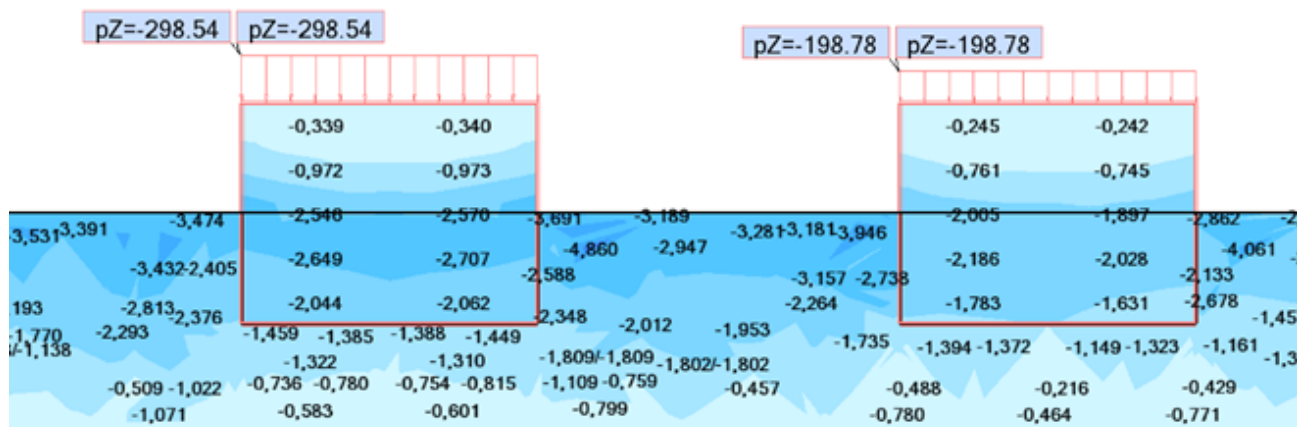
Na poniższych rysunkach przedstawiono rozkład naprężeń w konstrukcji w miejscu o największym wyężeniu w przekroju poprzecznym i podłużnym.



Rys. 6.8 Naprężenia w kierunku poprzecznym (beton Z3) (por. z Rys. 6.4.)



Rys. 6.9 Naprężenia w kierunku podłużnym (beton Z3) (por. z Rys. 6.5.)



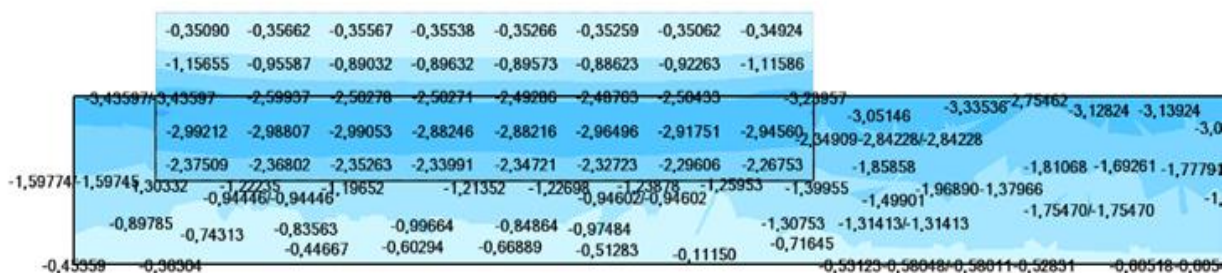
Rys. 6.11 Naprężenia w kierunku podłużnym (beton Z4) (por. z Rys. 6.5.)

Tab. 6.5. Wartości naprężeń w punktach weryfikacji dla przekroju poprzecznego i podłużnego nawierzchni bezpodsypankowej

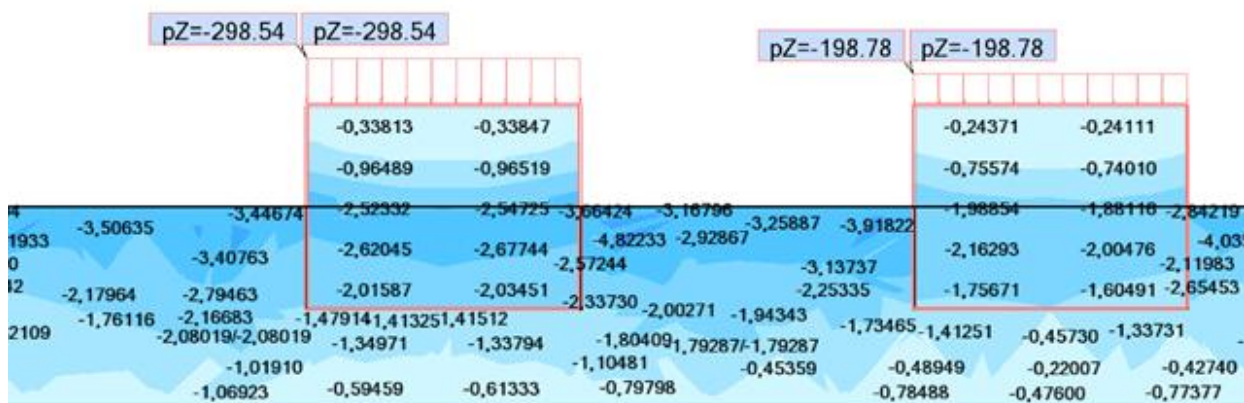
Nr punktu	Wartość naprężenia [MPa]
1	-0,449
2	-0,592
3	-0,601
4	-1,044
5	-1,189
6	-1,382
7	-3,388
8	-3,197
9	-3,474
10	-3,691
11	-1,459
12	-1,664
13	-1,071
14	-0,583
15	-0,601
16	-0,799

- Podpory blokowe wykonane z betonu Z5

Na poniższych rysunkach przedstawiono rozkład naprężeń w konstrukcji w miejscu o największym wyężeniu w przekroju poprzecznym i podłużnym.



Rys. 6.12 Naprężenia w kierunku poprzecznym (beton Z5) (por. z Rys. 6.4.)



Rys. 6.13 Naprężenia w kierunku podłużnym (beton Z5) (por. z Rys. 6.5.)

Tab. 6.6. Wartości naprężeń w punktach weryfikacji

Nr punktu	Wartość naprężenia [MPa]
1	-0,433
2	-0,603
3	-0,528
4	-1,303
5	-1,272
6	-1,459
7	-3,436
8	-3,294
9	-3,447
10	-3,664
11	-1,479
12	-1,804
13	-1,069
14	-0,595
15	-0,798
16	-0,786

6.4 Wnioski

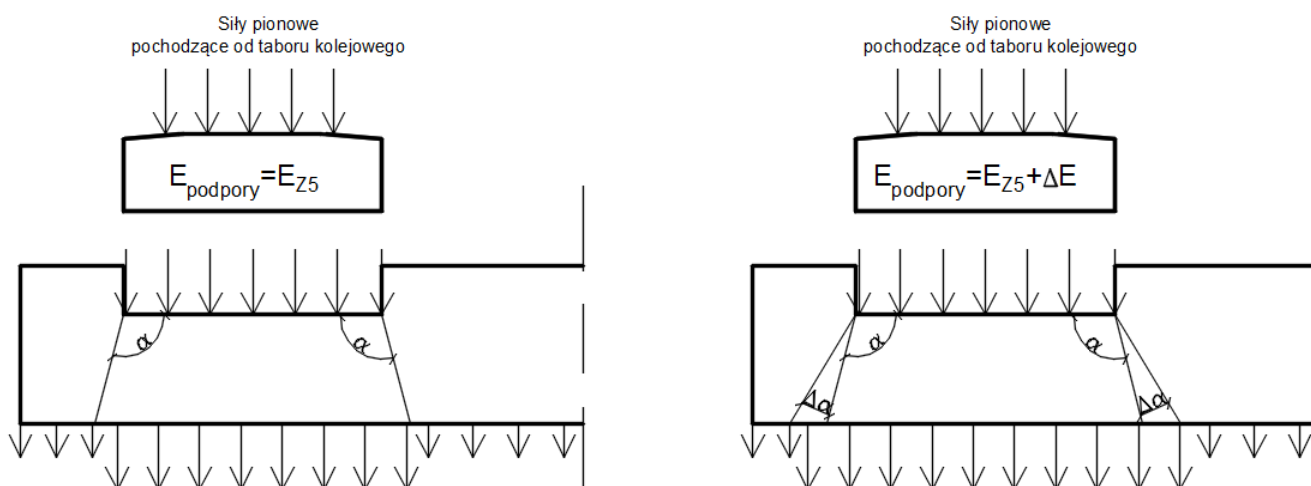
Przeprowadzona analiza numeryczna umożliwiła zweryfikowanie wyników badań laboratoryjnych wykonanych na modelach rzeczywistej konstrukcji kolejowej nawierzchni bezpodsypankowej. Stworzony w programie Autodesk Robot model konstrukcji opracowany został w czterech wariantach, zależnych od betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych. Płyta torowa pozostała elementem niezmiennym we wszystkich wariantach. W poprzednim podrozdziale przedstawiono wyniki otrzymane dla każdego rodzaju betonu. Po wygenerowaniu wyników sprawdzono, przez jakie punkty należy poprowadzić płaszczyznę przecięcia przekroju, tak aby otrzymać najwyższe wartości naprężeń w płycie. Do sformułowania wniosków wykorzystano wyniki w tych przekrojach. Wybrano jeden przekrój poprzeczny i jeden przekrój podłużny nawierzchni.

Otrzymane rezultaty ukazują zmienność rozkładu naprężeń w płycie w zależności od zastosowanego rodzaju betonu w podporach blokowych. Rezultaty dla wybranych punktów w nawierzchni przedstawiono dla każdego wariantu tabelarycznie. Zmiany naprężeń w poszczególnych punktach w odniesieniu do betonu bez dodatku włókien Z5, który jest betonem referencyjnym.

Tab. 6.7. Procentowe zmiany naprężeń w punktach pomiarowych.

Nr punktu	Zmiana naprężenia					
	Z2		Z3		Z4	
	(Z5-Z2) [MPa]	$\frac{(Z5 - Z2)}{Z5} \cdot 100\%$	(Z5-Z3) [MPa]	$\frac{(Z5 - Z3)}{Z5} \cdot 100\%$	(Z5-Z4) [MPa]	$\frac{(Z5 - Z4)}{Z5} \cdot 100\%$
1	0,009	2,08%	0,012	2,77%	0,016	3,70%
2	-0,003	-0,50%	-0,009	-1,49%	-0,011	-1,82%
3	0,036	6,82%	0,055	10,42%	0,073	13,83%
4	-0,091	-6,98%	-0,151	-11,59%	-0,259	-19,88%
5	-0,021	-1,65%	-0,074	-5,82%	-0,083	-6,53%
6	-0,034	-2,33%	-0,057	-3,91%	-0,077	-5,28%
7	-0,015	-0,44%	-0,041	-1,19%	-0,048	-1,40%
8	-0,042	-1,28%	-0,083	-2,52%	-0,097	-2,94%
9	0,015	0,44%	0,021	0,61%	0,027	0,78%
10	0,008	0,22%	0,021	0,57%	0,027	0,74%
11	-0,008	-0,54%	-0,014	-0,95%	-0,020	-1,35%
12	-0,066	-3,66%	-0,122	-6,76%	-0,140	-7,76%
13	0,000	0,00%	0,002	0,19%	0,002	0,19%
14	-0,007	-1,18%	-0,010	-1,68%	-0,012	-2,02%
15	-0,072	-9,02%	-0,174	-21,80%	-0,197	-24,69%
16	0,006	0,76%	0,008	1,02%	0,013	1,65%

Otrzymane w różnych wariantach wyniki różnią się od siebie o wartości stanowiące kilka procent wartości naprężeń. Oznacza to, że zmiana rodzaju betonu w podporze blokowej nie niesie za sobą wyraźnych zmian w wartościach naprężeń. Zmiana ta widoczna jest, gdy weryfikuje się rozkład w całym przekroju poprzecznym bądź podłużnym. Dla betonu Z5, to jest bez dodatku włókien, a co za tym idzie o najniższych parametrach wytrzymałościowych naprężenia na powierzchni styku podpory z płytą mają mniejsze wartości. Jednak w tym przypadku wzrastają naprężenia bezpośrednio pod podporą blokową na spodzie płyty, czyli w powierzchni podparcia. Wzrost parametrów wytrzymałościowych poprzez dodatek włókien ma wpływ na poprawę rozkładu naprężeń. Wysoka wytrzymałość betonu niesie za sobą podwyższenie naprężeń w płycie w miejscu zakotwienia podpory blokowej. Zauważalne jest natomiast zmniejszenie naprężeń w płycie bezpośrednio pod podporą. Rekompensatą zmniejszenia naprężeń bezpośrednio pod podporami jest wzrost naprężeń pomiędzy nimi, zarówno w przekroju poprzecznym, jak i podłużnym. Przyczyną takiego stanu jest lepsza propagacja naprężeń od obciążenia taborem dla betonów z dodatkami włókien. Obciążona podpora blokowa przenosi siły pionowe na płytę torową. Wraz ze wzrostem wytrzymałości podpory blokowej, kąt rozkładu naprężeń ulega zmianie. Co za tym idzie, do współpracy w większym stopniu włączana jest cała powierzchnia płyty torowej. Zmianę rozkładu siły pionowej w płycie przedstawiono na rysunku 6.14.



Rys. 6.14. Zmiana rozkładu naprężeń pod podporą w zależności od modułu sprężystości E

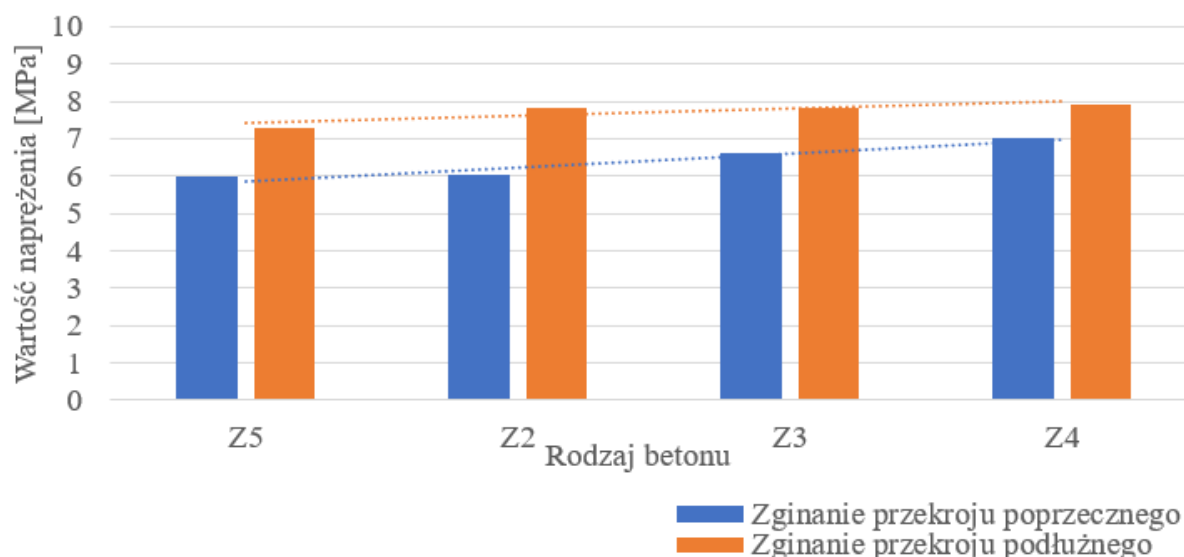
Zwiększenie powierzchni rozkładu obciążenia w płycie należy uznać za zjawisko korzystne z punktu widzenia trwałości konstrukcji. Mniejsze wyężenie płyty pod podporą niesie za sobą skutek w postaci możliwego wydłużenia okresu trwałości płyty torowej. Należy jednak zauważyć, że wartości te są stosunkowo nieduże. Wobec tego, efekty w postaci mniejszego spadku wytrzymałości konstrukcji widoczne mogą być dopiero w długim okresie eksploatacji. Niemniej analiza numeryczna potwierdza zależność pomiędzy właściwościami fizyczno-wytrzymałościowymi, a wytrzymałością płyty torowej w kolejowej nawierzchni bezpodsypkowej. Model numeryczny konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej potwierdza rezultaty otrzymane podczas badań laboratoryjnych.

6.5 Porównanie wyników badań laboratoryjnych i analizy numerycznej

Na podstawie badań laboratoryjnych sformułowano wnioski dotyczące korzystnego wpływu dodatku do betonu w postaci włókien. Przeprowadzona analiza numeryczna również wykazała wpływ wykorzystania włókien do betonu w podporach blokowych na rozkład naprężeń w płycie torowej. Badania laboratoryjne pozwoliły wyznaczyć wpływ dodatku włókien na wytrzymałość konstrukcji na rozciąganie dla skrajnej sytuacji, w której płyta podparta jest jedynie w strefie krawędziowej. Natomiast analiza numeryczna pozwoliła określić wpływ dodatku włókien do betonu na konstrukcję nawierzchni obciążoną naciskiem pochodzącym od koła lokomotywy. W tabeli 6.8. przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dla zginania przekroju poprzecznego i podłużnego nawierzchni

Tab. 6.8. Zestawienie wyników badania wytrzymałości na rozciąganie

Rodzaj betonu	Naprężenia niszczące w zginaniu przekroju poprzecznego powierzchni [MPa]	Zmian naprężeń w stosunku do betonu referencyjnego Z5 [%]	Naprężenia niszczące w zginaniu przekroju podłużnego powierzchni [MPa]	Zmian naprężeń w stosunku do betonu referencyjnego Z5 [%]
Z2	6,05	1,17	7,82	7,12
Z3	6,62	10,70	7,85	7,53
Z4	7,03	17,56	7,93	8,63
Z5	5,98	-	7,30	-



Rys. 6.15. Zestawienie maksymalnych wyników otrzymanych w badaniach laboratoryjnych

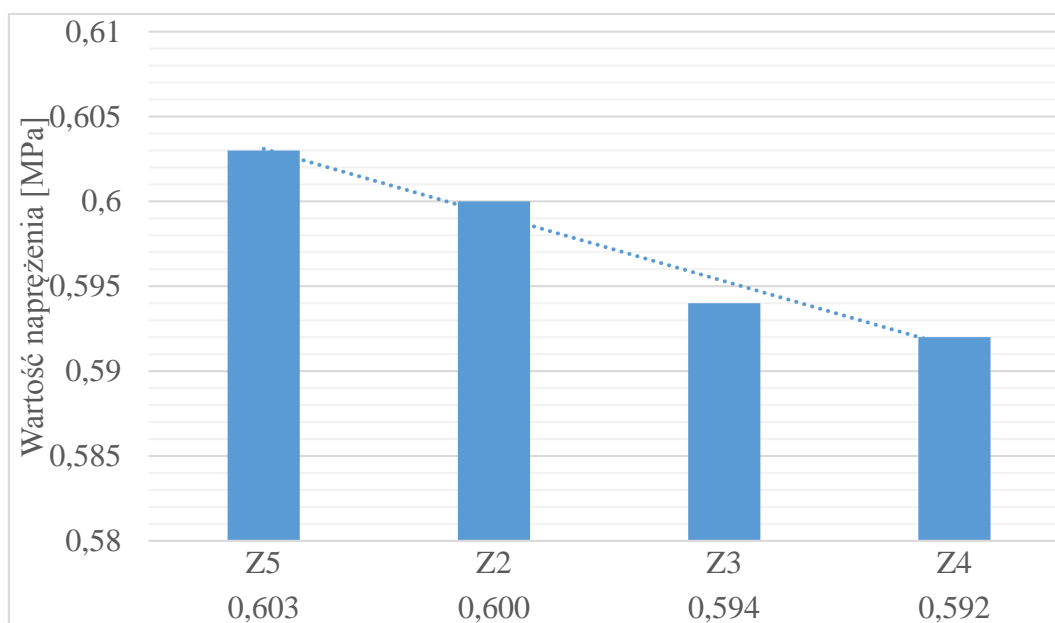
Na wykresie zamieszczono zestawienie wyników badań laboratoryjnych wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla przekroju poprzecznego i podłużnego powierzchni. Zamieszczone na wykresie linie trendu dla obu wyników wskazują na wzrost wytrzymałości przekroju na rozciąganie w betonach z dodatkiem włókien. Najniższe wartości uzyskano dla betonu bez dodatku włókien. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie dla przekroju poprzecznego wskazują na wzrost wytrzymałości w przypadku dodania włókien do betonu. W przypadku dodatku w postaci włókien stalowych wzrost wytrzymałości wynosi 1,17%, natomiast w przypadku dodatku w postaci włókien szklanych wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu wzrosła aż o 17,56%. Wzrost wytrzymałości

zauważalny jest również w przypadku rezultatów badania przekroju podłużnego. Tu również wzrost w próbkach z dodatkiem do betonu w postaci włókien szklanych jest najwyższy i wynosi 8,63%.

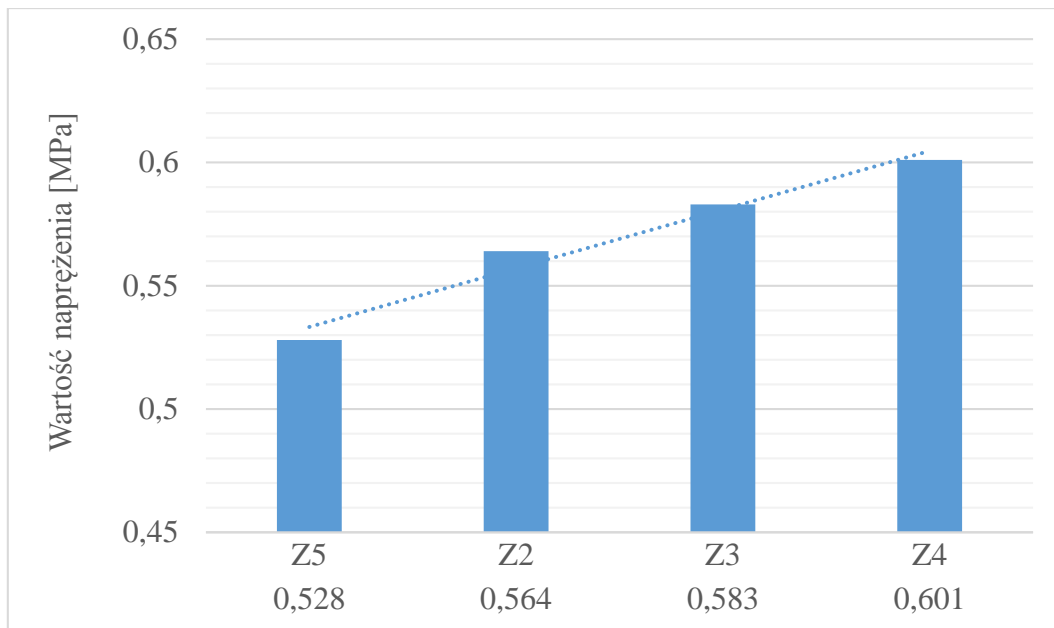
W tabeli 6.9. zamieszczono wartości naprężeń ściskających otrzymanych podczas analizy numerycznej, dla punktów weryfikacji pod podporą oraz w osi przekroju poprzecznego konstrukcji nawierzchni. Poniżej tabeli przedstawiono wykresy z zestawieniem naprężeń obliczonych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych dla punktów weryfikacji.

Tab. 6.9. Zestawienie wyników analizy numerycznej w wybranych punktach pomiarowych

Rodzaj betonu	Naprężenia w środku przekroju (punkt pomiarowy nr 3)	Zmiana w stosunku do betonu referencyjnego Z5 [%]	Naprężenia pod podporą (punkt pomiarowy nr 2)	Zmiana w stosunku do betonu referencyjnego Z5 [%]
Z2	0,564	6,82	0,600	-0,50
Z3	0,583	10,42	0,594	-1,49
Z4	0,601	13,83	0,592	-1,82
Z5	0,528	-	0,603	-



Rys. 6.16. Wartości naprężeń w punkcie weryfikacji pod podporą blokową



Rys. 6.17. Wartości naprężeń w punkcie weryfikacji w osi przekroju poprzecznego konstrukcji nawierzchni

Przedstawione w tabeli oraz na wykresach rezultaty wskazują zależność pomiędzy betonem, zastosowanym przy wykonywaniu podpór blokowych betonem, a naprężeniami w płycie torowej. W przypadku punktu weryfikacji pod podporą, dodatek włókien do betonu powoduje zmniejszenie wartości naprężeń. Natomiast w punkcie pomiarowym w osi konstrukcji nawierzchni, najniższe wartości uzyskano dla betonu bez dodatku włókien, najwyższe dla betonu z dodatkiem włókien szklanych. Na obu wykresach zamieszczono linie trendu wskazujące kierunek zmian w naprężeniach, w zależności od betonu wykorzystanego do wykonania podpór blokowych. Przeanalizowana na potrzeby pracy literatura wskazuje, że najczęściej miejscem uszkodzenia konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej jest miejsce połączenia podpory blokowej i płyty torowej. Zatem zmniejszenie naprężeń w miejscu połączenia kosztem wzrostu naprężeń w środku przekroju płyty torowej należy uznać za zjawisko pozytywnie wpływające na wytrzymałość i trwałość całej konstrukcji.

Przeprowadzona analiza wyników otrzymanych w pracy wskazuje, że najkorzystniejszy wpływ, zarówno na zmianę parametrów betonu, jak i wytrzymałość całej konstrukcji, ma dodatek do betonu w postaci włókien szklanych. Ma on najlepsze parametry wpływające na wzrost, zarówno wytrzymałości na ściskanie, jak i modułu Younga betonu. Wpływ dodatku włókien widoczny jest zarówno w badaniach próbek w laboratorium, jak i w analizie rzeczywistej konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej Metodą Elementów

Skończonych. Efektem tego jest zmiana rozkładu naprężeń w płycie w postaci zmniejszenia naprężeń na krawędziach płyty torowej oraz bezpośrednio pod podporą, co może mieć wpływ na ograniczenie uszkodzeń konstrukcji nawierzchni w tym obszarze. Wzrost naprężeń w osi przekroju poprzecznego płyty wskazuje na lepszy rozkład naprężeń na dolną powierzchnię płyty torowej, co może mieć korzystny wpływ na trwałość konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej.

7 Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przeprowadzono analizę zależności pomiędzy właściwościami betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych, a wytrzymałością konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej. Właściwości betonu uzależniono od zastosowania dodatku w postaci włókien. Wykorzystano trzy rodzaje włókien: stalowe, polimerowe i szklane. Wskazano na wpływ dodatku włókien zarówno na wytrzymałość betonu jak i na rozkład naprężeń w konstrukcji nawierzchni.

Pierwsze rozdziały pracy stanowią wprowadzenie w problematykę. Przedstawiono w nich rozbudowane opisy wybranych systemów nawierzchni wykorzystywanych zarówno w Polsce, jak i na świecie. Następnie scharakteryzowano każdy element nawierzchni, szczególną uwagę poświęcając podporom blokowym i płycie torowej. W oparciu o pozyskane specyfikacje oraz dokumenty normalizacyjne przedstawiono wymagania dla poszczególnych elementów nawierzchni. Posłużyły one do przygotowania recept dla betonu płyty torowej oraz podpór blokowych. Wymagany dla płyty torowej był beton o klasie C35/45, natomiast dla podpór blokowych C50/60.

Projekty betonów przygotowano na podstawie algorytmów wykorzystujących iteracyjne metody określania recepty mieszanki. Zarówno kruszywo, cement jak i domieszki do betonu spełniają warunki określone w literaturze. Dla kruszyw granitowych oraz piasku opracowano krzywe uziarnienia. Następnie, bazując na doświadczeniu oraz źródłach literaturowych sporządzono recepty betonu, które zamieszczono w pracy.

Główną część pracy stanowiły badania laboratoryjne mające na celu zweryfikowanie postawionej tezy. Kolejne rozdziały zawierają rezultaty badań opatrzone fotografiami prezentującymi mechanizmy zniszczenia oraz tabelarycznymi zestawieniami wyników. Pierwsza część badań, tj. przygotowanie zarobów próbnych oraz sprawdzenie konsystencji mieszanki miała na celu wstępną weryfikację opracowanych recept. Po przeprowadzeniu badań wytrzymałościowych stwierdzono zgodność z założeniami. Druga część badań miała na celu sprawdzenie parametrów dla wszystkich rodzajów betonu. Przygotowano wymaganą normami liczbę próbek sześciennych oraz walcowych. Określono takie parametry jak konsystencja, wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, mrozoodporność. Wszystkie wymagania zostały spełnione, a wyniki zamieszczono w tabelach, każdy podrozdział kończąc podsumowaniem i porównaniem poszczególnych betonów.

Trzeci etap badań stanowiło sprawdzenie współpracy betonów. Oznaczono wytrzymałość na rozłupywanie, odrywanie metodą pull-off oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu belek. Celem sprawdzenia ostatniego parametru zaproponowano autorski model próbki laboratoryjnej wiernie odwzorowujący konstrukcję nawierzchni, zarówno w przekroju poprzecznym, jak i podłużnym. Rezultaty badań wskazały, że beton z dodatkiem włókien podnosi wszystkie badane parametry. Bardzo interesujące jest to zwłaszcza dla włókien szklanych, gdzie wzrost wytrzymałości średniej belek na rozciąganie wynosił nawet 8,6% dla przekroju podłużnego i 17% dla poprzecznego. Zauważono zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie podpory blokowej a wytrzymałością na rozciąganie całej konstrukcji.

W celu zweryfikowania badań laboratoryjnych w skali całej konstrukcji nawierzchni opracowano model obliczeniowy w oparciu o Metodę Elementów Skończonych i program obliczeniowy Autodesk Robot Professional.

Rezultaty otrzymane w programie po części potwierdziły wyniki badań laboratoryjnych. Zauważono różnice w rozkładzie naprężeń w płycie w zależności od zastosowanego betonu w podporze blokowej. Im wyższy moduł sprężystości betonu w podporze blokowej, tym naprężenia w płycie rozkładają się na większej powierzchni. Należy jednak zaznaczyć, że wpływ ten w skali całej konstrukcji nie jest znaczny, a zmiany wartości naprężeń widoczne są w dziesiątej lub setnej części.

Wykonana praca badawczo-analityczna pozwala na sformułowanie szeregu wniosków dotyczących parametrów betonu oraz wytrzymałości i trwałości nawierzchni bezpodsypkowej.

1. Zastosowanie dodatku do betonu w postaci włókien ma wpływ na wytrzymałość betonu na ściskanie oraz podnosi jego mrozoodporność. Największy wpływ na zwiększenie wytrzymałości miało dodanie włókien szklanych, a najmniejszy włókien stalowych. Jednak w każdym wypadku wzrost wytrzymałości był widoczny i sięgał od 6% do nawet 17%. Są to wartości które uzasadniają zastosowanie dodatków w betonie. W pracy opisano również poprawę mrozoodporności, zarówno w oparciu o zmiany wytrzymałości jak i mniejszy spadek masy próbek z dodatkami włókien.
2. Autorskie badanie laboratoryjne mające na celu określenie wytrzymałości na rozciąganie pokazało zależność pomiędzy zastosowanym rodzajem podpory blokowej, a otrzymanymi rezultatami siły niszczącej. Wspomniane wcześniej przyrosty wytrzymałości

na rozciąganie, zarówno w przekroju poprzecznym, jak i podłużnym, uzasadniono lepszą propagacją naprężeń w belce dla podpór o wyższej wytrzymałości na ściskanie.

3. Badanie pull-off potwierdziło zespolenie się obu rodzajów betonu. Próbkę ulegały zerwaniu w warstwie betonu płyty torowej.

4. Przeprowadzona analiza numeryczna modelu obliczeniowego wykazała nieznaczne zmiany w rozkładzie naprężeń w konstrukcji. Zauważono, że im większy jest moduł sprężystości betonu podpory blokowej, tym naprężenie pod podporą jest mniejsze. Wpływa to jednak na wzrost naprężeń w oznaczonych punktach weryfikacji między innymi na krawędzi płyty czy w osi przekroju poprzecznego. Zmienia się zatem kąt rozkładu naprężeń. Zmiany te należy jednak uznać jako zjawisko zdecydowanie pozytywne. Lepszy rozkład naprężeń został w pracy zobrazowany graficznie. Różnice te sięgają niekiedy setnych części wartości naprężenia. Nie ma to zatem znaczącego wpływu podczas jednostkowego obciążenia. Potwierdza jednak tendencję sformułowaną w części badawczej. Należy w tym punkcie zwrócić uwagę na możliwą poprawę trwałości nawierzchni. Różnice w rozkładzie naprężeń podczas jednostkowego obciążenia, nawet jeśli są nieznaczne, z pewnością mają wpływ na żywotność całej konstrukcji.

Postawiona we wstępie teza pracy została potwierdzona. **Zmiana parametrów betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych poprzez zastosowanie włókien do betonu ma korzystny wpływ na konstrukcję bezpodsypankowej nawierzchni kolejowej z uwagi na poprawę wytrzymałości na naprężenia pochodzące od sił pionowych.**

Wykorzystanie dodatku w postaci włókien do betonu przy produkcji prefabrykowanych podpór blokowych, pomimo iż podnosi koszty produkcji, w perspektywie całego okresu życia inwestycji może przynieść wymierne korzyści zarówno eksploatacyjne jak i ekonomiczne. Dzięki zastosowaniu włókien zwiększono wytrzymałość na rozciąganie płyty torowej, co może być istotne przy utracie właściwości podbudowy oraz poprawiono jej zdolności do zachowania parametrów eksploatacyjnych w czasie.

W dalszych etapach badania wpływu włókien na wytrzymałość i trwałość konstrukcji można by zająć się obciążeniami poziomymi generowanymi podczas hamowania i przyspieszania pojazdu szynowego oraz przy dużym wzroście temperatury, co może powodować wyboczenie szyn. Równie interesującym zagadnieniem może być próba znalezienia zależności między modułem sprężystości w podporze, a kątem rozkładu naprężeń w płycie torowej. To zagadnienie wymaga przeprowadzenia badań i analiz

numerycznych dla znacznie większej liczby rodzajów zarówno betonu wykorzystywanego do produkcji podpór blokowych, jak i płyty torowej.

8 Literatura

- [1] Bogusz A. *Koszt cyklu życia LCC*, Katowice, 2017.
- [2] Breitsamter N. *Gleis-und baudynamische Untersuchungen der Feste Fahrbahn System ÖBBPORR bis 330 km/h*, Ing. -Büro Dr.-Ing. Müller-Boruttau, Beratende Ingenieure BYIK, Inning-Buch,, Wiedeń, 2002.
- [3] Czyczula W. and Towpik, K.. *Problemy modelowania oraz identyfikacji modeli toru bezstykowego*, *Problemy Kolejnictwa*,. Kraków, 1998.
- [4] *Decyzja Komisji dotycząca specyfikacji technicznej interoperacyjności podsystemu Infrastruktura transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości*. Bruksela, 2007.
- [5] *Decyzja Komisji dotycząca specyfikacji technicznej interoperacyjności podsystemu Infrastruktura transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnej*, Bruksela 2011.
- [6] *Deklaracja jakości cementu CEMEX nr 1487-CPR-019-02*.
- [7] *Deklaracja właściwości użytkowych Nr 1487-CPR-020-02*.
- [8] Desai A. *Defects in Cast-in-situ Ballastless track w: International Research Journal of Engineering and Technology*, Bombaj, 2016.
- [9] *Design requirements and improved guidelines for design (track loading, resilience & RAMS)*. International Union of Railways, Huddersfield, 2014.
- [10] Eisenmann J. *Ballasted tracks and the goals of slab track development w: Rail Tehcnical Reviewe*, Monachium, 2006.
- [11] Esveld C. *Developments in high-speed track design. Sympozjum naukowe ANTWERP 2003*. ETH Honggerberg, Delft, 2003.
- [12] Esveld C. *Some aspects of high-speed track design. Track for Hidh-Speed Railways.*, Porto, 2006.
- [13] Fenske J. *Konstrukce pevné jízdní dráhy systému "öbb-porr" použití v tunelech 16. konference „Železniční dopravní cesta”*, Praga, 2010.
- [14] *Feste Fahrbahn Rheda 2000 Information*, 2010.
- [15] Galilienne I. *Usage analysis and evaluation of slab track constructions w: The Baltic Journal of road and bridge engineering*. Riga Technical University, Ryga, 2019.
- [16] Giannkos K. and Tsoukantas S. *Transition zone between ballastless and ballast track: Influence of changing stiffness on acting forces*, „*Procedia – Social and Behavioral Sciences*”, Ateny, 2012.
- [17] Grulkowski S. *Drogi szynowe*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2013
- [18] *Innovative Track System. Technical Construction, Prom@in-Findings&Conclusions*. Trondheim TUV Intertraffic, Kolonia, 2001.
- [19] Janeczek J. *Techniczne problemy wykonawstwa nawierzchni szynowej z wibroizolacją w tunelu średnicowym w Warszawie w: Technika Transportu Smaochodowego*. TTS. Warszawa, 2007.
- [20] Józwiak-Niedźwiedzka D. *Metody badania mrozoodporności betonu. Materiały z II Smpozjum Naukowo-Technicznego Trwałość betonu*, Kraków, 2008.
- [21] Kalisty M., Małaszkiwicz D.. *Metody badania mrozoodporności betonów. Ocena mrozoodporności betonu z cementem hutniczym w: Civil And Environmetnal Engineering (1/2010)*. Białystok, 2010.
- [22] *Karta Techniczna Astra Polyex Duro*.
- [23] Kerr A.D. *Fundamentals of railway track engineering*, Omaha, 2003.
- [24] Kolos A.F. *Full-scale study of stress-strain state of ballastless upper structure construction of railway in terms of train dynamic load*, Sankt Petersburg, 2017.
- [25] Kopp, E. *Gutachtliche Stellungnahme zum System „Feste Fahrbahn PORR*. Universitat Innsbruck, Innsbruck, 2001.

- [26] Kraśkiewicz C. *Konstrukcja nawierzchni na kolejach dużych prędkości*, Logistyka nr 3, Warszawa, 2014.
- [27] Kubissa W., Kubissa J. *Wyznaczanie wytrzymałości betonu na rozciąganie w próbie zginania*. Warszawa, 2005.
- [28] Lichtberger B. *Track Compendium. First edition*, Londyn, 2005.
- [29] *Materiał promocyjne firmy PORR*.
- [30] *Materiały reklamowe firmy Vossloh*.
- [31] Michałek J. *Wyznaczanie modułu sprężystości betonu przy ściskaniu*, Materiały budowlane, Wrocław, 2015.
- [32] Michas G. *Slab Track Systems for High-Speed Railways. Master Degree Project, Division of Highway and Railway Engineering, Royal Institute of Technology, Sztokholm*, 2012.
- [33] *Phantom Miro High Speed Cameras Manual*, 2012.
- [34] Pichler D., Fenske J. *Balastless track systems experiences gained in Austria and Germany w: AREMA*. Indianapolis, 2013.
- [35] *PN-88/B-06250 Beton zwykły*.
- [36] *PN-EN 206:2014 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- [37] *PN-EN 206:2014-04 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- [38] *PN-EN 1542:2000 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych -- Metody badań -- Pomiar przyczepności przez odrywanie*.
- [39] *PN-EN 1991-2:2003. :Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje Część 2: Obciążenia ruchome mostów*.
- [40] *PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka*.
- [41] *PN-EN 12390-1: 2013-03, Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form*.
- [42] *PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu -- Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań*.
- [43] *PN-EN 12390-6 2011 Badania betonu -- Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*.
- [44] *PN-EN 12390-13-2014-02 Badania betonu. Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu*.
- [45] *PN-EN 12620:2008+A1:2008 Kruszywa do betonu*.
- [46] *PN-EN 13481 Kolejnictwo -- Tor -- Wymagania eksploatacyjne systemów przytwierdzeń*.
- [47] *PN-EN 13481-5:2012 Kolejnictwo - Tor - Wymagania eksploatacyjne systemów przytwierdzeń - Część 5: Systemy przytwierdzeń w torze o nawierzchni bezpodsypkowej z szyną zamocowaną na płycie lub z szyną zamocowaną w kanale szynowym*.
- [48] *PN-EN 13791 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych*.
- [49] *PN-EN 13877-1 Nawierzchnie betonowe. Część 1- Materiały*.
- [50] *PN-EN 14889 Włókna do betonu*.
- [51] *PN-EN 14889-1:2007 – Włókna do betonu – Część 1: Włókna stalowe – Definicje wymagania i zgodność*.
- [52] *PN-EN 14889-2:2007 – Włókna do betonu – Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność*.
- [53] *PN-EN-197-1 Cement -Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
- [54] *Projekt budowlany: Modernizacja 3 sztuk odgałęzień podwójnych w Sosnowcu (trójkąt Dańdówka) wraz z przejazdami*.

- [55] Rusin Z. *Technologia betonów mrozoodpornych*. Polski Cement, Kraków, 2002.
- [56] Selig E., Waters, J.M. *Track Geotechnology and Substructure Management*, Londyn, 1994.
- [57] Setiawan D. *Worldwide slab track development as consideration for Indonesian slab track design concept; Konferensi Nasional Teknik Sipil 10*, Yogyakarta, 2016.
- [58] Sidorenko A. *Problem of exploitation of the ballastless track structure RHEDA 2000 on the railway*. Sankt Petersburg, 2012.
- [59] Skaraś S., Miśkiewicz R. *Ocena wytrzymałości betonu według normy PN-EN 13791 w: Drogownictwo*, Warszawa, 2011.
- [60] *Specyfikacja techniczna t.11.10.06 Bezpodsytkowa konstrukcja torowiska tramwajowego w postaci prefabrykowanych podkładów dwublokowych połączonych konstrukcyjnie z płytą betonową.*
- [61] *Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych D-04.05.01 Podbudowa z kruszywa stabilizowanego cementem.*
- [62] *Specyfikacja techniczna wykonania i odbioru robót budowlanych T-03.00.03. Budowa nowej nawierzchni torów - nawierzchnia bezpodsytkowa*. Gorzów Wielkopolski.
- [63] *Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych związanych z przebudową drogi krajowej nr 16 na odcinku Strzelniki – Klusy D-04.06.01 Podbudowa z betonu.*
- [64] *Specyfikacje techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych rozbudowa ulicy Władysława Jagiełły i ulicy dojazdowej wraz z budową kanalizacji deszczowej i oświetlenia oraz przebudowa sieci elektroenergetycznej, teletechnicznej wraz przyłączami.*
- [65] Szuba, T. *Właściwości innowacyjnych systemów i materiałów stosowanych w konstrukcji nawierzchni dróg szynowych w: Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, Rzeszów, 2012.
- [66] *Tema Motion software manual.*
- [67] *Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Podkładów i Podrozdnic Strunobetonowych Id -101*, Warszawa 2010.
- [68] Xie Y. *Concrete Crack of Ballastless Track Structure and its Repair w: International Journal of Railway*, Pekin, 2009.
- [69] Zbiciak A., Kraskiewicz C. *Mechanical modelling and application of vibroacoustic isolators in railway tracks w: MATEC Web of Conferences*, Warszawa, 2017.
- [70] www.edilonsedra.com.
- [71] www.ndtjames.com.
- [72] www.siatpol-zbrojenia.pl.
- [73] www.wig.wat.edu.pl.
- [74] www.wloknocyronowe.pl.