



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**

im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY INŻYNIERIA LĄDOWA,
GEODEZJA I TRANSPORT**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Przemysław Stałowski

**Badanie zagęszczenia betonu wykonywanego w
technologii wałowanej. Opracowanie
metodologii zagęszczania betonu w warunkach
budowy i laboratoryjnych.**

DZIEDZINA: Nauki inżynieryjno-techniczne

DYSCYPLINA: Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

PROMOTOR PRACY

*dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz, prof. Politechniki Bydgoskiej,
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika
Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, 85-796 Bydgoszcz, Polska;
maciej.dutkiewicz@pbs.edu.pl*

OPIEKUN POMOCNICZY

dr inż. Tomasz Rudnicki,

*Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, Wojskowa Akademia Techniczna, ul.
Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska; tomasz.rudnicki@wat.edu.pl*

Bydgoszcz, 2025

Źródło finansowania

Doktorat wdrożeniowy, wg umowy nr DWD/5/0208/2021

Podziękowania

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania:

- *Panu dr hab. inż. Maciejowi Dutkiewiczowi, prof. uczelni Politechniki Bydgoskiej za cenne uwagi wniesione w toku realizacji prac badawczych, wnikliwą i krytyczną ocenę pracy oraz prawidłowe ukierunkowanie działań związanych z niniejszą pracą.*
- *Panu dr inż. Tomaszowi Rudnickiemu, który zainspirował mnie do podjęcia tematu naukowego rozprawy doktorskiej oraz wspierał mnie merytorycznie, naukowo i badawczo podczas realizacji pracy.*
- *Panu dr inż. Maciejowi Sypkowi, który wspierał mnie w karierze zawodowej oraz umożliwił podjęcie realizacji niniejszej pracy doktorskiej.*
- *Mojej żonie Katarzynie oraz dzieciom Aleksandrze i Kacprowi, którzy wykazali się niezwykłą cierpliwością, miłością i wsparciem w realizacji moich marzeń związanych z pracą naukową.*
- *Rodzicom – Marzenie i Wiesławowi za wiarę w moje możliwości i wsparcie w ścieżce naukowej w ciągu mojego życia.*

WYKAZ SKRÓTÓW, SYMBOLI I JEDNOSTEK

C – stopień Celsjusza, jednostka miary w układzie SI, określająca temperaturę ośrodka

C12/15 – klasa wytrzymałości betonu wg PN-EN 206+A2:2021-08

C30/37 – klasa wytrzymałości betonu wg PN-EN 206+A2:2021-08

C8/10 – klasa wytrzymałości betonu wg PN-EN 206+A2:2021-08

C_c – wskaźnik krzywizny uziarnienia frakcji kruszyw wg PN-88/B-04481

C_u – wskaźnik różnoziarnistości frakcji kruszyw wg PN-88/B-04481

d – średnia formy wg PN-EN 13286-2 [mm]

d₁₀ – średnica zastępcza sita przez które przechodzi 10% materiału [mm].

d₃₀ – średnica zastępcza sita przez które przechodzi 30% materiału [mm]

d₆₀ – średnica zastępcza sita przez które przechodzi 60% materiału [mm];

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²]

h – wysokość formy wg PN-EN 13286-2 [mm]

H – wysokość spadu ubijaka Proctora [m]

I – jednostkowy impuls uderzenia na jednostkę objętości [MJ/m³]

I_s – wskaźnik zagęszczenia wg PN-88/B-04481

KR1-KR7 – kategorii ruchu drogi

m – masa ubijaka Proctora [kg]

M – mol, jednostka miary w układzie SI określająca licznosc materii obiektów elementarnych

m₁ – masa formy wg PN-EN 13286-2 [g]

m₂ – masa materiału z formą po ubiciu wg PN-EN 13286-2 [g]

MJ – megadżul, jednostka energii w układzie SI

MPa – megapaskal, jednostka miary w układzie SI, służąca do określania wytrzymałości

N – ilość uderzeń ubijaka [-]

R28 – określenie wieku próbki betonowej – 28 dni

R7 – określenie wieku próbki betonowej – 7 dni

RCC – beton wałowany (Roller Compacted Concrete)

S1, S2, S3, S4, S5 – konsystencja mieszanki betonowej, badana metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2

V – objętość wg PN-EN 13286-2 [cm^3]

V0, V1, V2, V3, V4 – konsystencja mieszanki betonowej, badana wg metody Ve-Be wg PN-EN 12350-3:2019-07

Ve-Be – metoda pomiaru konsystencji betonu gęstoplastycznego zgodnie z PN-EN 12350-3:2019-07

w – zawartość wody [%].

w/c – wskaźnik wodno-cementowy wg PN-EN 206+A2:2021-08

w_{opt} – wilgotność optymalna wg PN-EN 13286-2 [%]

WWiORB – Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych

XF4 – klasa ekspozycji betonu, wskazująca na środowisko, w którym beton jest narażony na silne nasycenie wodą i działanie środków odladzających wg PN-B-06265:2022-08

XR2 – klasa ekspozycji betonu, wskazująca na środowisko o umiarkowanej agresywności wg PN-B-06265:2022-08

ρ – gęstość objętościowa [g/cm^3]

ρ – gęstość objętościowa [g/cm^3]

ρ_a – gęstość strukturalna [g/cm^3]

Spis treści

STRESZCZENIE	8
ABSTRACT	9
1. Wstęp	10
1.1 Uzasadnienie podjęcia tematu	17
2. Analiza literatury	22
2.1. Dobór składników betonu – popioły lotne.....	24
2.2 Dobór składników betonu – domieszki chemiczne	24
2.3 Dobór składników betonu – dodatki z recyklingu i włókna polimerowe	25
2.4 Dobór składników betonu – inne dodatki	27
2.5 Stosowanie betonu wałowanego w Polsce i na świecie.....	31
2.6 Metody wykonania betonu wałowanego – zagęszczanie	34
2.7 Przepisy krajowe dla stosowania betonu wałowanego	37
2.8. Ekonomia stosowania RCC	39
3. Hipoteza badawcza.....	41
3.1 Cel i zakres badań	41
4. Materiały i metody badań.....	43
4.1 Materiały użyte do badań.....	43
4.2 Metodyka badań	50
4.2.1. Etap I metodyki badań.....	50
4.2.2 Etap II metodyki badań	59
4.2.3 Badania trwałościowe betonu	64
5. Wyniki badań.....	68
5.1. Analiza sitowa	69
5.1.1 Wyniki badań analizy sitowej dla receptury podstawowej.....	70
5.1.2 Wyniki badań analizy sitowej dla receptur pobocznych C30/37. 74	
5.1.3 Wyniki badań analizy sitowej dla receptur pobocznych – Zastosowanie kruszyw z recyklingu.....	76

5.1.4 Wyniki badań analizy sitowej dla receptur pobocznych – betony niskich klas C8/10 i C12/15	77
5.2 Wyniki badań wilgotności optymalnej	80
5.2.1 Wyniki badań wilgotności optymalnej dla receptury C30/37 L	80
5.2.2 Wyniki badań wilgotności optymalnej dla receptury C30/37 R	82
5.2.3 Wyniki badań wilgotności optymalnej dla receptur pomocniczych C8/10 oraz C12/15	83
5.3. Wyniki badań obserwacji mikroskopowych	85
5.4. Wyniki badań wytrzymałości w odniesieniu do metody zagęszczenia	89
6. Dyskusja wyników	97
6.1 Omówienie wyników analizy sitowej mieszanki betonowej i wilgotności optymalnej mieszanki	97
6.2 Omówienie wyników uzyskanych obserwacji mikroskopowych	99
6.3 Omówienie wyników wytrzymałości	114
6.4 Omówienie wyników wytrzymałości z realizacji betonu na budowie	122
7. Wnioski	126
8. Literatura	129
9. Spis załączników	138

STRESZCZENIE

Badanie zagęszczenia betonu wykonywanego w technologii wałowanej. Opracowanie metodologii zagęszczania betonu w warunkach budowy i laboratoryjnych.

mgr inż. Przemysław Stałowski

Słowa kluczowe: beton wałowany, zagęszczenie betonu, wilgotność optymalna mieszanki betonowej, RCC

Celem w pracy doktorskiej jest innowacyjne podejście do metody projektowania i zagęszczania betonu wykonywanego w technologii wałowania. Na podstawie doświadczeń i przeprowadzonych badań w laboratorium oraz w warunkach budowy przeanalizowano dobór składników mieszanki betonowej oraz zagęszczanie trzema metodami, w tym nową, oryginalną metodą autorską. Uwzględniono wpływ stosu okruszowego na wygląd makrotekstury betonu po jego stwardnieniu i opracowano zasady doboru składu kruszywowego dla uzyskania gładkości nawierzchni oraz jej trwałości. Na podstawie procesu badawczego przeanalizowano różnice w wyglądzie mikro i makrotekstury betonu dla różnych metod zagęszczania analizowanych w pracy doktorskiej. Wskazano parametry potrzebne do uzyskania powtarzalnych wyników w autorskiej metodzie zagęszczania dla mieszanki betonowej w wilgotności optymalnej zgodnie z energią zagęszczania wynoszącą od 0,5869 do 0,5994 MJ/m³. Oryginalność wdrożeniowa pracy polegała na skonstruowaniu specjalnego statywu, dzięki któremu można zagęszczać próbki w sposób powtarzalny młotem wibracyjnym. Wskazano ponadto optymalne ustawienia autorskiego stanowiska badawczego, które można wykorzystywać dla różnych receptur mieszanek betonowych wykonywanych w technologii wałowania. Posłużono się doświadczeniami z budów w celu określenia właściwych zasad projektowania i weryfikacji jakości mieszanki betonowej.

Efektem niniejszej pracy jest oryginalne, niekonwencjonalne określenie warunków projektowania, czyli doboru składników dla mieszanki betonu wałowanego. Zapewnia to jednolitą strukturę makroskopową wbudowanego betonu, co przekłada się na jego aspekty wizualne oraz długoletnią trwałość. Sprawdzenie prawidłowości zaprojektowanych receptur zweryfikowano poprzez opracowanie autorskiej metody zagęszczania w laboratorium i porównano z doświadczeniami z budowy.

ABSTRACT

Testing the compaction of concrete made using rolled technology.

Development of a methodology for thickening concrete in construction and laboratory conditions professional title, first and last name of the author of the doctoral thesis
mgr inż. Przemysław Stałowski

Key words: rolled concrete, concrete compaction, optimal humidity of the concrete mix, RCC

The aim of the doctoral thesis is an innovative approach to the method of designing and compacting concrete made using rolling technology. Based on experience and research carried out in the laboratory and in construction conditions, the selection of concrete mix ingredients and compaction using three methods, including a new, original method, were analyzed. The impact of the crumb pile on the appearance of the macrotexture of concrete after hardening was taken into account, and rules for selecting the aggregate composition to achieve smoothness of the surface and its durability were developed. Based on the research process, differences in the appearance of the micro and macro texture of concrete were analyzed for various compaction methods analyzed in the doctoral thesis. The parameters needed to obtain repeatable results in the original compaction method for the concrete mix at optimal humidity in accordance with the compaction energy ranging from 0.5869 to 0.5994 MJ/m³ were indicated. The original implementation of the work consisted in the construction of a special stand, thanks to which it is possible to compact samples in a repeatable manner using a vibrating hammer. Moreover, the optimal settings of the author's test stand were indicated, which can be used for various recipes of concrete mixtures made using rolling technology. Experience from construction sites was used to determine appropriate design principles and verify the quality of the concrete mix.

The result of this work is an original, unconventional definition of the design conditions, i.e. the selection of ingredients for the rolled concrete mixture. This ensures a uniform macroscopic structure of the built-in concrete, which translates into its visual aspects and long-term durability. The correctness of the designed recipes was verified by developing an original thickening method in the laboratory and compared with construction experience.

1. Wstęp

Dane historyczne podają różne źródła pochodzenia betonu wykonywanego w technologii wałowania. Metoda mechaniczna wbudowania betonu stała się popularna przede wszystkim przy budowie konstrukcji drogowych w podbudowach i nawierzchni oraz zapór wodnych i parkingów [1]. Beton wałowany to mieszanina kruszywa, cementu, wody i dodatków chemicznych. Zgodnie z przyjętą definicją jest to beton, który podlega pod powszechne normy i wytyczne. Stosuje się nazewnictwo jako beton wałowany, czy też z języka angielskiego Roller Compacted Concrete, w skrócie RCC. To szczególny rodzaj betonu, który przy odpowiednio dobranych składnikach jest możliwy do wbudowania poprzez zagęszczenie mechaniczne walcami lub zagęszczarkami płytowymi. Oprócz prostych konstrukcji, takich jak podbudowy drogowe, beton wałowany stosuje się w nawierzchniach dróg, placów parkingów oraz zapór wodnych [1]. W Japonii i Stanach Zjednoczonych jest już ponad 750 zapór wodnych wykonanych w technologii betonu wałowanego [1] oraz niezliczone ilości dróg i parkingów wytworzonych metodą wałowania betonu [2]. Jeśli chodzi o najbliższe otoczenie stosowania, to obecnie zaporą wodną, powstającą z betonu zagęszczanego mechanicznie powstaje w Czechach.

Uważa się, że prekursorem tego rodzaju konstrukcji są Stany Zjednoczone. Zgodnie z danymi źródłowymi [2] pierwszy beton wykonany metodą wałowania został wbudowany nie w Stanach Zjednoczonych, ale w Szwecji. Rozwój tej technologii odbył się jednak głównie w Stanach Zjednoczonych, które uważa się za kolebkę pochodzenia dróg betonowych. Na przestrzeni lat wypracowano różne technologie i metody budowy dróg betonowych, nie tylko w formie betonu wałowanego. Prawie każda technologia wykonania nawierzchni betonowej ma wiele wspólnych, pozytywnych zalet w stosunku do tradycyjnych nawierzchni bitumicznych. Przede wszystkim cechuje je [3-10]:

1. Jasność powierzchni, czyli lepsza widoczność, ale również aspekt ekonomiczny, ponieważ można stawiać lampy np. na drogach osiedlowych w dalszych odległościach od siebie.
2. Wysoka przyczepność – odpowiednia tekstura wynikająca z przygotowania, jak i z samego doboru składników mieszanki betonowej zapewnia krótszą drogę hamowania w stosunku do nawierzchni bitumicznych.
3. Niższe zużycie paliwa. Z wielu przeprowadzonych badań uzyskano dane, które wskazują, że w przypadku jazdy po nawierzchni

- betonowej, zmniejsza się zużycie paliwa o 2-3% niż na nawierzchni bitumicznej. Jest to spowodowane niższym oporem toczenia.
4. Brak kolein – z racji tego, że nawierzchnie betonowe są sztywne, nie ulegają koleinowaniu. W Niemczech powstaje coraz więcej skrzyżowań typu rondo wykonanych w betonie. Stowarzyszenie Producentów Cementu opracowuje wraz z Wykonawcami i doświadczonymi producentami betonów instrukcję budowy i wytycznych dla skrzyżowań typu rondo. Można się spodziewać w niedalekiej przyszłości polepszenia jakości tego typu skrzyżowań.
 5. Wysokie albedo (0,2-0,4 – nawierzchnie bitumiczne – 0,05-0,15) i odporność na wysoką temperaturę. Nawierzchnie betonowe z racji swojego jaśniejszego koloru mają dodatkową pozytywną cechę, czyli łatwiej odbijają promienie słoneczne. Zapobiega to tworzeniom się tzw. wysp ciepła, co bezpośrednio przyczynia się do spowolnienia efektu cieplarnianego.
 6. Zwiększony czas użytkowania – długoletnia żywotność betonu sprawia, że drogi betonowe mogą służyć przez kilkadziesiąt lat. Obiekty inżynierskie z betonu, np. ustroje nośne projektuje się w taki sposób, aby przetrwały 60 lat. Drogi betonowe są użytkowane bez większych nakładów prac remontowych nawet 30-40 lat. Jest to istotny aspekt ekonomiczny, przemawiający na korzyść betonu cementowego w nawierzchni. Doświadczenia w utrzymaniu dróg betonowych wskazują, że w cyklu życia drogi, znacznie zmniejszają się koszty ich utrzymania w porównaniu z nawierzchnią bitumiczną. Naprawy wymagają jedynie ewentualnych miejscowych wymian płyt. Zastosowanie do takich napraw betonów szybkosprawnych, które w kilka godzin od wbudowania (ok 8h) zapewniają wysokie przyrosty wytrzymałości na ściskanie. Skraca to czas napraw i można dopuścić taką nawierzchnię już w ten sam dzień do ruchu.
 7. Wygłuszenie nawierzchni. Nawierzchnie betonowe są ciche, co wpływa pozytywnie na komfort jazdy. Przez różne metody teksturowania nawierzchni można obniżyć ich hałaśliwość nawet o kilka decybeli.
 8. Możliwość recyklingu. Beton jest materiałem, który w 100% nadaje się do ponownego wbudowania. Recykling materiałów betonowych ma szerokie zastosowanie, ponieważ można go wykorzystać ponownie, po odpowiednim przetworzeniu w mieszankach związanych, betonie lub jako mieszanki niezwiązane. W dokumentach wzorcowych wydawanych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad WWiORB na wykonanie podbudów dopuszcza się kruszywo pochodzące z recyklingu i odpowiednie je parametryzuje.

Zastosowanie konstrukcji z wykorzystaniem betonowych materiałów przetworzonych stanowi pełnowartościowe warstwy podbudów drogowych. Ponadto wieloletnie doświadczenia stosowania kruszyw z recyklingu betonowego w mieszankach betonowych, produkowanych na węzłach betoniarskich firmy Holcim, która jest partnerem wdrożeniowym niniejszej pracy, są bardzo pozytywne. Największą zaletą stosowania recyklingu betonowego jest obniżenie śladu węglowego w konstrukcjach i produktach z zawartością przetworzonego wtórnie materiału. Odpowiedni dobór składu i klas ekspozycji, pozwala na wykorzystanie kruszyw z recyklingu w większości rodzajów konstrukcji stosowanych w budownictwie drogowym.

Od wielu lat wykonuje się konstrukcje dróg betonowych, stosując różne rodzaje sprzętu oraz technologii. Od najprostszych rozwiązań, poprzez bardzo skomplikowane metody. Sposób wbudowania mieszanki betonowej warunkuje się w zależności od rodzaju konstrukcji drogowej oraz jej przeznaczenia [11]:

1. Wykonanie ręczne, to najbardziej powszechna i najprostsza metoda wbudowywania betonu na niewielkich powierzchniach. Technologia polega na dobraniu odpowiedniej konsystencji dla mieszanki betonowej i jej ręcznym układaniu w deskowaniu stałym. Zagęszczenie mieszanki odbywa się za pomocą łat vibracyjnych, bądź wibratorów wgłębnych. W ten sposób można wykonywać drogi o niskim natężeniu ruchu, bądź place parkingowe, zachowując jednocześnie reżim technologiczny [Rys. 1]. Zgodnie ze sztuką budowlaną należy wykonać dylatacje stwardniałego betonu i odpowiednio wypełnić szczeliny, zwykle kordem i zalewając je masą bitumiczną. Mimo, że jest to prosty sposób wykonania, zapewnia długoletnią trwałość i oddaje wszystkie aspekty nawierzchni betonowej.



Rys. 1. Metoda układania betonu w deskowaniu stałym [3].

2. Beton wałowany – technologia, w której do wykonywania warstwy betonu wykorzystuje się rozścielacz, taki który stosuje się do nawierzchni bitumicznych. Dla odpowiedniego i profesjonalnego ułożenia mieszanki betonowej wykonanej w technologii wałowania ważne jest wstępne wysokie zagęszczenie świeżej mieszanki. Dlatego też zaleca się wykorzystanie rozścielacza wyposażonego w ciężki stół, wyposażony w podwójne tampery, aby zapewnić wysoki wskaźnik zagęszczenia I_s przed docelowym zagęszczaniem walcami. Po wbudowaniu rozścielaczem, mieszanka betonowa musi być poddana zagęszczeniu poprzez walce stalowe i ogumione o odpowiednio dobranym ciężarze do grubości układanej warstwy [Rys. 2]. Tak jak w przypadku metody ręcznej, beton musi zostać zdylatowany zachowując reżim technologiczny.



Rys. 2. Układanie betonu wałowanego. Zdjęcie autora.

3. Beton rozścielany – technologia podobna do wykonywania betonu wałowanego, jednak bez konieczności użycia walców na etapie zagęszczania. Odpowiednio dobrany skład mieszanki betonowej, z wykorzystaniem domieszki uplastyczniającej, umożliwia jej ułożenie i zagęszczenie przez sam stół rozścielacza i system tamperów do wskaźnika zagęszczenia na poziomie $I_s=0,99-1,00$. [Rys. 3]. Nie ma potrzeby wykańczać wierzchniej warstwy w żaden sposób, chyba że istnieje potrzeba jej uszorstnienia przez szczotkowanie. Tak jak w poprzednich metodach, należy wykonać dylatacje zgodnie z technologią.



Rys. 3. Beton wykonywany w technologii bez wałowania. Tak ułożona mieszanka stanowi już warstwę finalną. Zdjęcie autora.

4. Beton wykonywany w technologii ślizgowej. Najbardziej zaawansowana metoda układania nawierzchni betonowej, w której wykorzystuje się zestaw rozścielaczy. Tym systemem buduje drogi kategorii A oraz S, czyli autostrady i drogi ekspresowe. Metoda polega na układaniu nawierzchni w całej szerokości pasa drogowego, nawet do 11 metrów. Pierwszy zestaw rozścielaczy układa dolną warstwę betonu, jednocześnie ją dyblując poprzez wzbrowywanie. Kolejny zestaw rozścielacza odpowiada za ułożenie i zagęszczenie górnej warstwy betonu. Ostatni element służy do nadania wstępnej tekstury i wyrównaniu warstwy poprzez zatarcie. Podczas ostatniego etapu odbywa się również spryskiwanie powierzchni preparatem, który opóźnia hydratację cementu, aby było możliwe wyszczotkowanie powierzchni. Szczotkuje się specjalnymi maszynami, aby nadać odpowiednią teksturę betonu, jest to tzw. nawierzchnia z odkrytym kruszywem. Zapewnia dobrą przyczepność, czyli bezpieczeństwo w ruchu przy niskim hałasie podczas eksploatacji. Nawierzchnia betonowa musi również zostać zdylatowana w ciągu kilku godzin od wbudowania po to, aby nie nastąpił wczesny skurcz, który może osłabić konstrukcję [11]. Rys. 4.



Rys. 4. Zestaw rozścielaczy do układania nawierzchni autostrad i dróg ekspresowych [11].

W praktyce inżynierskiej istnieje bardzo ważna różnica między betonem wykonywanym w technologii wałowania, a betonem wykonywanym w pozostałych technologiach. Wynika ona z potrzeby odpowiedniego zaprojektowania mieszanki betonowej pod kątem konsystencji. Technologie wbudowania betonu, poza metodą wałowania opierają się na konsystencji mieszanki betonowej badanej metodą opadu stożka od S1 jako ślízg do S3 w metodzie ręcznej wg normy PN-EN 12350-2 [12]. Beton taki poddawany jest wibracji wgłębnej po to, aby uległ równomiernemu rozłożeniu i zagęszczeniu w szalunku. Niniejsze opracowanie wprowadza innowacyjne podejście do projektowania mieszanki betonu wałowanego nie tylko na etapie doboru jego składu, ale również podejścia do weryfikacji prawidłowości receptury dla określonej

klasy betonu. Zagęszczenie, czyli podstawowy proces determinujący parametry trwałościowe betonu jest zależne od odpowiedniej zawartości wody w mieszance betonowej. Zawartość wody musi wystarczyć do tego, aby proces hydratacji cementu w składzie przeszedł prawidłowo, ale również do łatwego zagęszczenia wbudowywanej warstwy. Parametr, na którym należy się skupić, to wilgotność optymalna przy której materiał osiąga maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego podczas przyłożenia odpowiedniej energii zagęszczania [13]. Optymalna zawartość wody zależy od uziarnienia stosu okruszowego i jednocześnie służy do określenia innego parametru – wskaźnika zagęszczenia I_s , który charakteryzuje wartość zagęszczenia wbudowanej mieszanki, która przekłada się bezpośrednio na wytrzymałość betonu. Wyznaczenie i dobór wilgotności optymalnej oraz metody zagęszczenia mieszanki betonowej w warunkach laboratoryjnych i polowych bezpośrednio przekłada się na weryfikację klasy betonu. W niniejszej rozprawie doktorskiej skupiono się na powyższych aspektach w podejściu bazującym na doświadczeniu wykonawczym, projektowym i laboratoryjnym, aby w jak najlepszy sposób określić metodę zagęszczania w celu wdrożenia rozwiązania służącego dobrej i sprawdzalnej praktyce wykonywania betonu w technologii wałowania.

1.1 Uzasadnienie podjęcia tematu

Praktyczne podejście do projektowania, poprzez kontrolę jakości i wykonanie betonu w technologii wałowania nie jest usystematyzowane. W polskich przepisach nie ma oficjalnych norm, wytycznych lub instrukcji dotyczących powyższych, jak i metod sporządzenia próbek i ich weryfikacji. Dla betonu na nawierzchnie dróg ekspresowych czy autostrad są wytyczne Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych WWiORB [14] wydane przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostad, które nie przekładają się i nie powinny być stosowane w przypadku betonu wałowanego. Sama technologia wykonania tego typu konstrukcji, to nie tylko nawierzchnie betonowe, ale również podbudowy, czy inne warstwy wchodzące w skład konstrukcji drogowej. Parametry odbiorowe definiują jedynie Szczegółowe Specyfikacje Techniczne lub inne instrukcje Wzorcowych Warunków Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych dla konkretnych inwestycji, czy budow. Często zdarza się, że takie instrukcje są sporządzane przez firmy wykonawcze i jest to ich wiedza oparta na doświadczeniu. Niestety te wytyczne nie są zwykle kompletne, czy wystarczające do tego, aby jednoznacznie określić sposób

przygotowania receptury, jej weryfikacji i badań odbiorowych na budowie. Doświadczenie autora wskazuje, że na wielu realizowanych inwestycjach, w których element konstrukcji drogowej stanowił beton wałowany, napotkano liczne problemy związane z:

1. Rozbieżnością wyników wytrzymałości na ściskanie próbek pobieranych podczas budowy, która była realizowana z tych samych materiałów i w krótkim odstępie czasu [Rys. 5]

Laboratorium Gdańsk									
Miejsce przechowywania próbek									
Lp.	Data pobrania	Wiek próbek [dni]	Wymiary			Masa [kg]	Gęstość objętościowa [kg/dm ³]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzym. na ściskanie [MPa]
			długość [mm]	szerokość [mm]	wysokość [mm]				
1	19.09.2019	28	150	150	150	8,235	2,440	1452	64,5
2	19.09.2019	28	150	150	150	8,242	2,442	1452	64,5
3	19.09.2019	28	150	150	150	8,205	2,431	1431	63,6
4	23.09.2019	28	150	150	150	8,277	2,452	1651	73,4
5	23.09.2019	28	150	150	150	8,159	2,417	1347	59,9
6	23.09.2019	28	150	150	150	8,196	2,428	1507	67,0
7	24.09.2019	28	150	150	150	8,060	2,388	1216	54,0
8	24.09.2019	28	150	150	150	8,093	2,398	1223	54,4
9	24.09.2019	28	150	150	150	8,100	2,400	1281	56,9
10	1.10.2019	28	150	150	150	8,153	2,416	1148	51,0
11	1.10.2019	28	150	150	150	8,103	2,401	910	40,4
12	1.10.2019	28	150	150	150	8,114	2,404	957	42,5
13	2.10.2019	28	150	150	150	8,102	2,401	1194	53,1
14	2.10.2019	28	150	150	150	8,128	2,408	1241	55,2
15	2.10.2019	28	150	150	150	8,094	2,398	1280	56,9
16									
17									
18									
19									
20									
liczba wyników n:					15	wartość średnia:			
						57,2			

Rys. 5. Rozbieżność wyników wytrzymałości na ściskanie dla receptury betonu wałowanego klasy C30/37. Minimalny wynik to 40,4 MPa, a maksymalny 73,4 MPa, uzyskane po 28 dniach dojrzewania próbek. Badania własne.

2. Makrostrukturą powierzchni betonu, która w przypadku nieprawidłowo dobranego stosu okruszowego wpływa na jej trwałość i jakość [Rys. 6]. Zbyt duża ilość frakcji drobnej (poniżej #2,0 mm) znacznie obniży wytrzymałość betonu, natomiast zbyt duża ilość frakcji powyżej #8,0 mm wpływa na utworzenie się tzw. „gniazd” odsłoniętego kruszywa. Projektowanie polega na prawidłowym zbalansowaniu frakcji kruszywowej w celu osiągnięcia prawidłowej i trwałej makrotekstury.



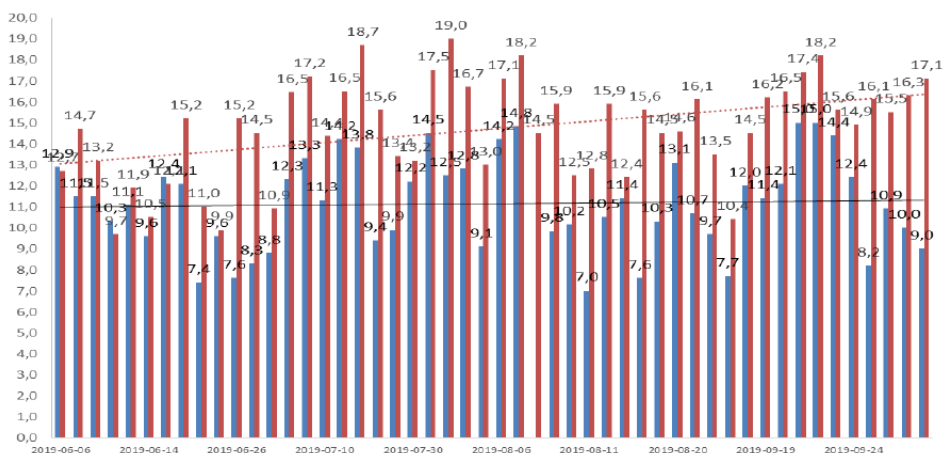
Rys. 6. Nieprawidłowo dobrany stos okrucowy i widoczne liczne gniazda oraz nierównomierne przesychanie warstwy, co wpływa na późniejsze wykruszanie ziaren i trwałość warstwy. Zdjęcie autora.

3. Problemem z uzyskaniem jednorodnych i powtarzalnych wyników wytrzymałości w przypadku przygotowywania próbek przez różne osoby mimo zastosowania tego samego składu [Tab. 1].

Tab. 1. Wyniki wytrzymałości betonu wałowanego przygotowywanego z jednej receptury przez cztery różne osoby. Rozbieżność wyników na poziomie ok 22 MPa po 28 dniach dojrzewania próbek. Badania własne, wykonane w trakcie realizacji badań nad pracą doktorską.

Osoba	Gęstość R7 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R7 [MPa]	Gęstość R28 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R28 [MPa]
1	2,399	48,1	2,399	54,6
2	2,362	38,8	2,359	46,6
3	2,281	30,1	2,347	42,4
4	2,291	30,5	2,320	36,9

4. Zależnością wilgotności optymalnej dla mieszanki betonowej, a jej wpływem na zagęszczenie oraz wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu [Rys. 7]. Podczas wykonywania mieszanki związanej w klasie C8/10 w technologii wałowania i w wilgotności optymalnej, zaobserwowano dużą rozbieżność wyników wytrzymałości na ściskanie, na którą wpływ miała wartość wilgotności, w której przygotowywano próbki. Mimo, że próbki zostały wykonywane zgodnie z metodologią określoną zgodnie z wytycznymi specyfikacji, to różnice w wilgotności sprawiły rozbieżność w wynikach. Podczas budowy i analizy wyników sprawdzono dokładnie naważenia poszczególnych składników mieszanki związanej, stwierdzono ich prawidłowość. Realne problemy w różnicach wartości wytrzymałości wynikały z różnej ilości wody w mieszance związanej hydraulicznie. Wynikało to przede wszystkim z różnic wilgotności kruszyw w ciągu dnia produkcji. Skoro przy określonej metodologii zagęszczania zaobserwowano tak duży wpływ innych czynników, jak zawartość wody w mieszance, zajęto się problemem pod kątem sprawdzenia tych zależności. Zawartość wody jednym z bardzo ważnych powodów skutecznej metody zagęszczania. W niniejszej rozprawie doktorskiej postanowiono przebadąć ten aspekt, celem wyznaczenia wpływu zawartości wody w metodzie zagęszczania.



Rys. 7. Rozbieżność wyników wytrzymałości na ściskanie [MPa] dla mieszanki związanej C8/10 – podbudowy pod nawierzchnię betonową na odcinku autostrady A2. Rozbieżność na poziomie ok. 80-110% zmian w wartościach. Badania własne.

Powyższe zależności postanowiono dokładnie przeanalizować i wykonano dla nich program badawczy w sposób praktyczny podczas realizacji pracy doktorskiej. Prace rozpoczęto od analizy literatury i dostępnej wiedzy, aby jak najrzetelniej przedstawić temat i powód podjęcia się badań w pracy doktorskiej. Założono hipotezy badawcze w pracy doktorskiej i poddano je weryfikacji. W toku badań wyciągnięto wnioski na ich podstawie. Wykorzystano do tego doświadczenia z budów i wiedzę, która posłużyła do zweryfikowania projektowania mieszanki betonu wałowanego i zagęszczenia próbek do badań wytrzymałości na ściskanie. Ostatecznym uzasadnieniem podjęcia tematu jest przede wszystkim potrzeba usystematyzowania zależności wynikających z wpływu stosu okruszowego w mieszance, energii i wilgotności zagęszczania próbek.

2. Analiza literatury

Beton wałowany to mieszanina kruszywa, cementu, wody i dodatków chemicznych. Wykorzystywane surowce, właściwości i klasy wytrzymałości podlegają pod wytyczne normy PN-EN 206+A2:2021-08 [16]. Jest to specyficzny rodzaj betonu wałowanego zaprojektowany w wilgotności optymalnej i wskaźniku wodno-cementowym w/c wynoszącym ok 0,28-0,35 w zależności od projektowanej klasy wytrzymałości [15]. Niski wskaźnik wodno-cementowy jest związany z konsystencją betonu, która jest gęsto-plastyczna [Rys. 8].



Rys. 8. Konsystencja mieszanki betonowej w wilgotności optymalnej. Zgodnie z badaniem Ve-Be [17] określono wartość V0. Zdjęcie autora

Zgodnie z normą PN-EN 12350-3:2019-07 [17] oznacza się konsystencję jako V0-V1 [Tab. 2] dla mieszanki betonu wałowanego. Oznaczenie jest zależne od składu, jednak w praktyce zależy od jakości używanego sprzętu oraz osoby wykonującej badanie [Rys. 9].

Tab. 2. Klasy konsystencji mieszanki betonowej wg metody Ve-Be [17]

Klasa	Czas Ve-Be [s]
V0	>31
V1	30-21
V2	20-11
V3	10-6
V4	5-3



Rys 9. Przygotowany stożek do badania konsystencji metodą Ve-Be. Zdjęcie autora.

Świeża mieszanka w tej konsystencji jest łatwo urabialna mechanicznie i zachowuje nadaną jej formę. Powyższe informacje są niezbędne po to, aby zrozumieć istotę postępowania z betonem wałowanym oraz przeanalizować dostępne informacje literaturowe dla konkretnego rodzaju betonu rozważanego w niniejszej pracy. Dobór odpowiednich surowców i ich ilości determinuje właściwości końcowe betonu. Przed przystąpieniem do przedmiotowych badań, przeanalizowano źródła literaturowe w celu zweryfikowania badanego zagadnienia oraz właściwego ukierunkowania badań.

2.1. Dobór składników betonu – popioły lotne

Podstawą w betonie wałowanym jest dopasowanie stosu okruszowego, który zapewni ciągłość uziarnienia. Przyjęte zasady projektowania bazują głównie na odpowiednim dobraniu składników do mieszanki betonowej i sprawdzeniu ich wpływu na beton pod kątem badań trwałościowych. Badacze [18] podają różne warianty doboru frakcji kruszywowych, między innymi zastąpienie frakcji pylastych, frakcją piaskową, co bezpośrednia przekłada się na wyższą wytrzymałość [18]. Ważną rolę odgrywają inne składniki poza cementem i kruszywem. Bardzo powszechnie stosowane są popioły lotne, które wpływają na regularne przyrosty wytrzymałości w długim czasie. Jest to praktyka stosowana w projektowaniu betonu nie tylko wałowanego. Dodatek popiołów lotnych typu V kategorii „A” stosuje się w wielu rodzajach i klasach betonów w zależności od wymaganych klas ekspozycji [16, 19, 20]. Dodatek tego składnika w odpowiednich ilościach wpływa nie tylko na wytrzymałość, ale również obniża koszty wytworzenia mieszanki betonowej.

2.2 Dobór składników betonu – domieszki chemiczne

W przypadku stosowania tak powszechnych domieszek do betonu, łatwo zauważyć, że dla betonu wałowanego o tzw. suchej konsystencji ilość zaczynu jest znacznie niższa niż tradycyjnego betonu. Sam zaczyn również różni się jakością i przede wszystkim ilością. Na jego właściwości, a tym samym na właściwości całej mieszanki betonowej wpływa nie tylko zawartość wody, ale również stosowanie różnych domieszek chemicznych. Dodatek domieszki napowietrzającej powoduje wzrost odporności na mróz w przypadku betonu tradycyjnego, jak i betonu wałowanego [21].

Domieszki uplastyczniające stosuje się do znacznej redukcji wody w mieszance betonowej, co korzystnie wpływa na poprawę wytrzymałości. Zgodnie z literaturą [21], plastyfikatory to domieszki, które znacznie obniżają napięcie powierzchniowe wody zarobowej. Przyczynia się to do znacznego zredukowania jej ilości przy zachowaniu tej samej konsystencji [21]. W przypadku betonu wałowanego, ilość wody w mieszance jest niska, bo na poziomie 4,5-6,5% w stosunku do masy suchego materiału, to daje zakres w przedziale, najczęściej od 90 do 130 kg/m³, w zależności od stosu okruszowego. W literaturze [22-25] zwraca się szczególną uwagę na kompatybilność dodatków chemicznych, takich jak plastyfikatory i superplastyfikatory z zastosowanym cementem. Z praktycznego podejścia do projektowania, wiadomym jest że nie wszystkie domieszki są uplastyczniające mieszankę betonową są uniwersalne [25], a rodzaj

zastosowanego cementu niejednokrotnie determinuje ich działanie. W przypadku betonu wałowanego, gdzie ilość wody zarobowej jest niska, stosowanie domieszek uplastyczniających, które jeszcze redukują wodę może mieć negatywny wpływ na mieszankę betonową, jej urabialność i sam proces hydratacji [15].

2.3 Dobór składników betonu – dodatki z recyklingu i włókna polimerowe

Odejściem od standardowego projektowania mieszanek betonowych w odniesieniu do kruszyw jest stosowanie materiałów recyklingowych w składzie. Kruszywem recyklingowym nazywany jest materiał, który został już wcześniej wbudowany, a następnie po zakończeniu swojego cyklu życia przetworzony i wbudowany ponownie w inny materiał, np. beton [26]. W budownictwie drogowym materiał recyklingowy głównie pochodzi z przekruszenia betonu i jest dopuszczony do stosowania w wielu warstwach konstrukcji drogowej. Przede wszystkim w podbudowach zasadniczych, pomocniczych i w ulepszonych podłożach jako mieszanki związane i niezwiązane. Ponadto takie kruszywo można stosować jako umocnienie skarp, nabrzeży, czy też w warstwach nasypów [27]. Bardzo powszechnym zastosowaniem kruszyw z recyklingu jest ich odpowiednie przetworzenie, tj. zmielenie, wysuszenie i wykorzystanie w samej produkcji cementu. Tak powszechne zastosowanie materiałów recyklingowych znajduje również swoje miejsce w betonie. Odpowiednie dobranie materiału do przetworzenia i pozyskania kruszywa jako składnik betonu wpływa korzystnie na trwałość betonu [28]. Na podstawie tych samych badań udowodniono, że zastosowanie cementów o niskiej alkaliczności obniża negatywne skutki reakcji alkalia-krzemionka i nie pogarsza się przy tym odporność na karbonatyzację betonu [28]. Wykorzystanie kruszyw z recyklingu w betonie wałowanym opisuje się również jako zrównoważone budownictwo i świadome zarządzanie zmniejszeniem emisji gazów cieplarnianych. Zastąpienie kruszyw naturalnych 15% dodatkiem kruszyw recyklingowych redukuje ilość emitowanego CO₂ do atmosfery o ok 8-10% [29]. Nie tylko kruszywa grube, czyli frakcji powyżej 2 mm, pozyskane z recyklingu są wykorzystywane w betonie wałowanym. Zbadano dodatek piasku ceglanego [30], zastępującego kruszywo drobne o frakcji 0/2 mm. Według autorów [30] optymalne jest zastosowanie 25% piasku ceglanego. Sprzyja to wzrostowi wytrzymałości aż do 47% względem składu receptury bez dodatków recyklingowych. Wzmocnienie przypisuje się reakcji

pucolanowej i lepszemu uszczelnieniu mieszanki stosu okruszowego betonu wałowanego.

Poza materiałami mineralnymi wykorzystywanymi wtórnie, autorzy wskazują na możliwość stosowania materiałów z odpadów tworzyw sztucznych i produktów spalania odpadów, tzw. biomasy [31-32]. Na podstawie przeprowadzonych badań udowodniono, że stosowanie odpadów z tworzyw sztucznych może zmniejszyć ich ilość na składowiskach. Wpływa to korzystnie na środowisko oraz pozwala redukować koszty pozyskania surowca do wytwarzania dodatku do betonu. Zgodnie z uzyskanymi wynikami [32] dodatek przetworzonych tworzyw sztucznych poprawił wytrzymałość na ściskanie, zginanie i rozciąganie betonu. Nie podano natomiast ilości dodatku tworzyw sztucznych w zastąpieniu kruszywa. Kierunek badań wpływających na środowisko jest bardzo słuszny, jednak należałoby pogłębić badania. Stosowanie tworzyw sztucznych w betonie gęsto-plastycznym zapewnia równomierne ich rozmieszczenie bez zbrylania jak zauważa się w przypadku dodatku polimerów w postaci włókien. Ważne jest miejsce dozowania podczas wykonywania betonu w technologii wałowania, gdzie włókno powinno być bezpośrednio dozowane do podajnika w maszynie rozściełającej. W literaturze [33] badano wpływ dodatków włókien polipropylenowych na mechaniczne właściwości betonu. Potwierdzono problem aglomeracji włókien, które sprawiają efekt porowatości betonu, co z kolei niekorzystnie wpływa na trwałość betonu. Udowodniono, że warunki środowiskowe wysoce narażone na agresywność chemiczną, a dokładnie badano wpływ kwasu siarkowego na trwałość betonu, nie jest korzystne dla stosowania domieszek w postaci włókien polipropylenowych. W wyniku reakcji chemicznej pojawia się wtórny ettringit, który potwierdza spadek wytrzymałości na ściskanie betonu [33].

Jako materiały recyklingowe stosuje się nie tylko plastik oraz kruszywa, ale inne dodatki, takie jak np. zużyte opony. Zgodnie z literaturą [34], stosowanie granulatu gumowego poprawia efekt odporności na ścieranie betonu nawierzchniowego. Taki granulatu musi być przygotowany w odpowiedni sposób. Autorzy [34] wskazują na przeprocesowanie w sposób taki, aby granulatu gumowy przypominał włókna polimerowe [Rys. 10].



Rys 10. Włókna gumowe, przed przetworzeniem (a), po przetworzeniu (b) [34].

W opracowaniu [34] wskazano szczególną uwagę na konieczność dokładnego wymieszania w mieszalniku laboratoryjnym i stopniowym dodawaniu włókien gumowych. Procedura jest niezbędna w celu zapobieżeniu wytworzenia się po to aby nie wytworzyły się zbitych aglomeratów, powodujących niekorzystny wpływ na wytrzymałość i strukturę betonu. Zjawisko zauważalne jest również dla włókien polimerowych [34].

2.4 Dobór składników betonu – inne dodatki

Dodatki mineralne inne niż popioły lotne wpływają korzystnie na wytrzymałość betonu. Między innymi dodatek pyłu bazaltowego, tzw. mączki bazaltowej w ilości 10% zastępując kruszywo drobne powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie o ok 25% [35]. W praktycznym stosowaniu, pozyskanie pyłu bazaltowego może być kosztowne, ponieważ w procesie produkcji powstaje on jako pulpa bazaltowa wysiana z kruszywa. Taką pulpę należy wysuszyć i przesiać przez drobne sito 0,125 mm, tak by odpowiadało frakcji cementu. Drugim sposobem pozyskania takiego materiału są pyły z otaczarni bitumicznej. Jednak jak powszechnie wiadomo, pyły są zmienne, a ich dostępność nie jest stabilna, zależna od produkcji i wykonawstwa w danym regionie. Autorzy [35-36] wskazują również bardzo dobre zastosowanie metakaolinitu, który jest materiałem o właściwościach pucolanowych. Mineral ten powstaje w procesie odwodnienia naturalnego kaolinitu w temperaturze ok 7000-8000°C. Dodatek metakaolinitu w ilości ok 30% wpływa korzystnie na

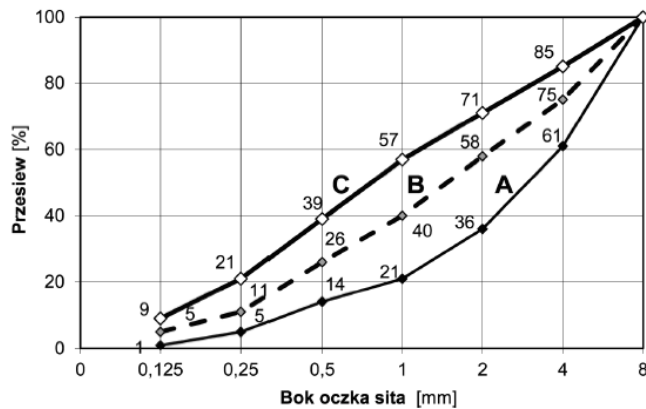
wytrzymałość na ściskanie. Autorzy [35-36] natomiast nie podają wpływu na trwałość betonu taką jak mrozoodporność i możliwości ekonomicznego stosowania takich materiałów w betonie. W badaniach do rozprawy doktorskiej badano wpływ nano-włókien węglowych na poprawę właściwości zaprawy. Udowodniono, zgodnie z autorami [35], poprawę wytrzymałości na ściskanie betonu. W przypadku stosowania mączki wapiennej wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu wałowanego wynika głównie z uszczelnienia szkieletu kruszywowo-spoiwowego [37]. Z punktu widzenia ekonomicznego nie przekłada się to na praktyczne stosowanie ze względu na wysokie koszty przygotowania dodatków.

Używanie materiałów recyklingowych, mineralnych, czy też domieszek do betonu jest powszechnie znane i stosowane. Wskazano inne dodatki w projektowaniu betonu, tj. łuski ryżowe w postaci pyłu [38-39]. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że zastąpienie ok 15% cementu pyłem z łusek ryżowych poprawia o ponad 20% wytrzymałość betonu na ściskanie już w 7, jak i 28 dniu dojrzewania [38]. Zastosowanie pyłu z łusek ryżowych poprawia reologię, co również udowodniono na podstawie dodatku do betonu samozagęszczalnego [39]. Innym materiałem, który nie jest standardowym dodatkiem do beton wałowanego jest aplikacja pumeksu. Literatura [40-42] wskazuje na to, że dodatek pumeksu nie tylko redukuje wagę betonu. Można osiągnąć poziom już 1800 kg/m^3 , ale również obniża emisyjność takiego produktu, ponieważ pumeks wymaga mniejszych nakładów energetycznych w produkcji względem tradycyjnych kruszyw. Zgodnie z [40] wykazano, że im wyższy dodatek pumeksu tym bardziej spada wytrzymałość betonu na ściskanie. Kompromis można znaleźć w przypadku wymogu stosowania betonów lekkich dla specjalnego rodzaju konstrukcji.

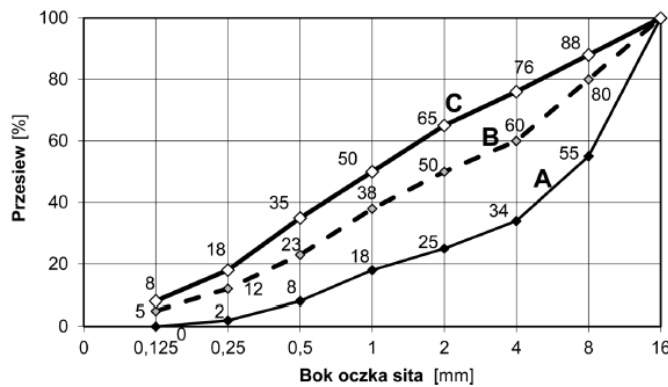
W przypadku dodatków do RCC, autorzy [43] wskazują również zagadnienie dozowania tych zastępujących cement w odpowiednich proporcjach. Ilości dodatków nie powinny zaburzać hydratacji cementu, ani wpływać na teksturę i konsystencję mieszanki betonowej. Np. źle zdyspergowane włókna w mieszance tworzą tzw. aglomeraty, wpływające negatywnie na trwałość i parametry betonu. Dodatek odpowiednio przygotowanych odpadów, np. sztucznych po butelkach PET, do betonu sprawia, że pojawiają się alternatywne możliwości utylizacji odpadów [45]. Wskazano na wiele korzystnych efektów wykorzystania odpadów w betonie i cemencie, takich jak obniżenie śladu węglowego włącznie z emisją CO_2 i pozostałych gazów cieplarnianych. Odbywa się to przez

dodatek składników poprawiających właściwości pucolanowe cementu, jednocześnie obniżając ilość klinkieru [46-47].

Przedstawia się wiele pozytywnych doświadczeń stosowania dodatków do betonu wałowanego, które używa się również do tradycyjnego betonu. Przez wiele lat udoskonalano beton wałowany w zależności od dostępności materiałów alternatywnych, czy też uwarunkowań środowiskowych. Nie wszystkie dodatki są dostępne lokalnie, takie jak metakaolinit [35-36], czy mączka wapienna w połączeniu z popiołami lotnymi, gdzie autorzy [47] wskazali na korzystne właściwości przy zastąpieniu nawet do 50% zawartości cementu. Dodatki mineralne w postaci pyłów i popiołów poprawiają właściwości betonu pod kątem mikrotekstury, wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu. Mimo dodatków, zwrócono uwagę, że najważniejszym w etapie projektowania RCC jest dobranie składników do odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej. Można posłużyć się dobraniem stosu okruchowego wg krzywych granicznych [Rys. 11]. Zazwyczaj stosuje się jednak zależność między frakcją drobną i grubą w celu poprawy zagęszczenia i makrotekstury betonu [48-49].



(a)



(b)

Rys. 11. Krzywe graniczne dobrego uziarnienia zgodne z PN-B-06265, załącznik P. Graniczne krzywe uziarnienia kruszywa do betonu [48].

Ulepszanie betonu wykonywanego w technologii wałowania polega na odpowiednim dobraniu dodatków do już zaprojektowanego stosu okruszowego wraz z odpowiednią ilością wody. Dodatki mają na celu przede wszystkim poprawę jakości, parametrów trwałościowych betonu. Coraz częściej zauważa się potrzebę obniżenia śladu węglowego dla produktów betonowych, a stosowanie betonu wałowanego daje bardzo duże możliwości optymalizacji w tym obszarze [50]. Przede wszystkim dodatek materiałów z recyklingu w celu poprawy jakości i parametrów, zastępowanie cementu innymi materiałami o niższej emisyjności od klinkieru bezpośrednio przekłada się na obniżenie śladu węglowego w

betonie. Dodatek popiołów lotnych, żużli wielkopieczowych, a nawet pyłu z łupin ryżu i kokosów w celu zastąpienia określonych ilości cementu bez pogarszania właściwości fizycznych betonu, może znacząco obniżyć ślad węglowy betonu [38-39; 51-52]. Autorzy [53] wskazują na potrzebę ograniczania CO₂ w związku z przyjętym Europejskim Zielonym Ładem. Zakłada się, że do roku 2050 konieczne będzie ograniczenie emisji CO₂ w cemencie o 55% względem roku 1990. Stosowanie dodatków nie tylko w betonie, ale również jako zamienniki klinkieru w cemencie jest niezbędne do osiągnięcia ww. wymagań.

W ogólnodostępnej literaturze, nie znaleziono informacji odnoszących się do uwzględnienia punktu piaskowego w projektowaniu stosu okruszowego w betonie wałowanym. W niniejszej rozprawie doktorskiej, skupiono się m. in. na innowacyjnym podejściu do projektowania składu betonu wałowanego. Poszerzono dostępną wiedzę o opracowanie doboru odpowiednich proporcji frakcji kruszyw ze szczególnym uwzględnieniem wartości punktu piaskowego.

2.5 Stosowanie betonu wałowanego w Polsce i na świecie

Beton wałowany jest szeroko stosowany jako podbudowy jak i nawierzchnie drogowe. Technologia zyskała bardzo dużą popularność w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie, a także w krajach Europy Zachodniej [54]. Krajowe możliwości rozbudowy dróg lokalnych w konstrukcji z betonu wałowanego są ogromne, ponieważ drogi te stanowią ok. 88% wszystkich szlaków w Polsce. Autorzy [54-55] wskazują, że technologia wykonania betonu wałowanego jest szansą na trwałe drogi i poprawę komfortu jazdy w ekonomiczny sposób. Kolejnym aspektem przemawiającym za technologią betonu wałowanego jest szybkość wykonania prac. Przeciętna wydajność budowy wynosi ok 60-120 m/h drogi o szerokości do 5,5 m. Istotnym jest fakt, że ruch lekki, tj. pojazdy osobowe, może być udostępniony już po 48h od wykonania [54]. Wskazania do stosowania to nie tylko drogi lokalne, ale również drogi na terenach rolniczych, czy leśnych [Rys. 12].



Rys. 12. Droga z betonu wałowanego na terenach leśnych. Zdjęcie autora.

Autorzy [15, 55] wskazują na zastosowanie betonu wałowanego na placu kontenerowym, gdzie występowały trudne warunki gruntowe. Wzmocniono teren geokrąta wypełnioną kruszywem oraz zastosowano podbudowę zasadniczą jako beton wałowany klasy C30/37 i klasie ekspozycji XC1 o grubości 20 cm. Konstrukcja ta pozwoliła na zachowanie wysokiej kategorii ruchu KR4-6, ale również dzięki uniwersalności betonu i stosowania geokrąty zapewniono równomierne osiadanie konstrukcji drogowej [14]. W Polsce buduje się drogi z betonu wałowanego już od kilkunastu lat [56]. Są to przede wszystkim drogi lokalne, na których dopuszczalne prędkości wynoszą 50-70 km/h. Wskazuje się, że technologia z betonu wałowanego jest odpowiednia dla dróg kategorii KR1-KR2. Praktyka [15, 55] wskazuje, że nawet place kategorii KR4 mogą być wykonywane w technologii betonu wałowanego.

Doświadczenia światowe wskazują na bardzo dużo zalet betonu wałowanego. Między innymi jest to eliminacja kolein w przypadku dużych odkształceń, na które są narażone drogi np. na terenach wiejskich. Wynika to z dużej sztywności nawierzchni betonowej. W Indiach buduje się drogi betonowe wszędzie tam gdzie pozwalają na to warunki, czyli zależność podłoża drogowego i warunki deszczowe. W przypadku podmycia dróg

przez intensywne odpady, nawierzchnia betonowa jest w stanie przetrwać bez większego uszczerbku [57-59]. Istotne jest, że drogi z betonu wałowanego są łatwe w naprawie, ponieważ wymienia się tylko uszkodzone płyty, a nie stosuje się napraw liniowych tak jak w przypadku nawierzchni bitumicznych. Literatura [7] wskazuje na możliwość szybkiej naprawy dróg betonowych tzw. betonem szybkosprawnym, który osiąga już ponad 30 MPa w ciągu pierwszych 8h od wbudowania. Umożliwia to naprawę drogi i udostępnienie do ruchu podczas jednej zmiany roboczej.

Stosowanie betonu wałowanego w nawierzchni sprzyja szybkiej aplikacji, ekonomicznemu rozwiązaniu i długowieczności konstrukcji. Zaleca się stosowanie betonu klasy C30/37 o uziarnieniu 0/16 mm, klas ekspozycji XR2, XF4 oraz grubości warstwy min. 16 cm. Autorzy z Węgrzech [61] wskazują, że od 2016 roku, technologia betonu wałowanego się prężnie rozwija, a stosuje się grubości warstwy już od 10 cm. Konstrukcja nawierzchni na podbudowie w postaci stabilizacji spoiwami hydraulicznymi pozwala na spełnienie stopnia przemarzania, co przekłada się na długowieczność całej drogi. Autorzy [61-65] opisują możliwości stosowania RCC jako ekonomicznego rozwiązania dla szybkiego układania dróg w lasach, czy na terenach rolniczych, a nawet dla wielopowierzchniowych parkingów i terminali kontenerowych. Wszędzie tam, gdzie wymusza się niskie prędkości RCC sprawdza się bardzo dobrze jako nawierzchnia, nawet jako cienka nakładka już o grubości ok 10 cm [61]. W przypadku dróg szybkiego ruchu na Węgrzech zastosowano RCC jako podbudowę pod cienką warstwę masy bitumicznej, czyli warstwy ścieralnej. W przypadku dróg lokalnych uwzględniono kolejny raz, że budowa nawierzchni z RCC powinna być dla prędkości dopuszczalnej 50 km/h. Ponadto stosowano również rozwiązania z poszerzeniem dróg, ponieważ beton w postaci wałowanej zapewnia stabilny fundament, na którym układa się warstwy nawierzchni, czy to bitumicznej, czy też betonowej. Nie wskazano natomiast rozwiązań spękań odbitych w przypadku połączeń rozwiązań sztywnych i podatnych [61]. Kolejnym z przykładów jest budowanie terminali kontenerowych, gdzie panują bardzo duże obciążenia punktowe statyczne od składowania kontenerów oraz dynamiczne od ruchu wózków widłowych [64].

Podsumowując, beton wykonywany w technologii wałowania jest wszechstronnie stosowany nie tylko jako nawierzchnia dróg i placów, ale również jako podbudowa. Oprócz tak oczywistych zastosowań, są znane jeszcze przypadki budowy zapór wodnych z betonu wałowanego [65-68]. W Malezji, czy w Birmie zaczęto stosować takie rozwiązania

konstrukcyjne ze względów nie tylko ekonomicznych, ale z możliwości szybkiej budowy – układano 400 m^3 betonu na godzinę [65] i niezawodności technologii. W przypadku budowy tamy, dobrano beton niższej klasy niż w konstrukcjach drogowych – zastosowano 65 kg/m^3 cementu oraz 105 kg/m^3 popiołu lotnego [65]. Wyznaczono odpowiednią ilość przejazdów walcem i wykonywano warstwy po 30 cm, sprawdzając zagęszczenie metodą nuklearną [65, 69] [Rys. 13].



Rys. 13. Tama Yeywa na rzece Mytinge w Birmie wykonana w technologii betonu wałowanego wypełniona wodą po sezonie deszczowym [66].

2.6 Metody wykonania betonu wałowanego – zagęszczanie

Poprawne zagęszczenie mieszanki betonowej gwarantuje trwałość i zgodność stwardniałego betonu z recepturą. W literaturze [69] podaje się różne metody zagęszczania betonu w konsystencji gęstoplastycznej. Badacze [70] określili metodologię badań zagęszczenia mieszanki betonowej:

1. Ubijakiem o wadze 2,5 kg zagęszczano materiał w trzech warstwach po 56 uderzeń każda;
2. Ubijakiem o wadze 4,5 kg zagęszczano materiał w trzech i pięciu warstwach po 56 uderzeń każda. Tzw. zmodyfikowana metoda Proctora;
3. Metodą na prasie żyratorowej, w sposób jaki przygotowuje się również próbki z masy bitumicznej.

Na podstawie przeprowadzonych testów [70] stwierdzono, że różne metody zagęszczania powodowały różnice w gęstościach betonu oraz zbliżone wytrzymałości. W przytoczonym badaniu nie ujęto metody przygotowania próbek młotem wibracyjnym, co jest bardzo powszechne w praktyce budowy. Powyższe wnioski są przewidywalne, a autorzy [70]

wskazują na poszerzenie badań w dalszym zakresie pod kątem mrozoodporności i wpływu zagęszczenia na beton napowietrzony. Przewiduje się również wpływ metod zagęszczania na strukturę wewnętrzną betonu. Pierwszorzędną sprawą jest natomiast określenie prawidłowej metody przygotowania próbek, tej na podstawie której będzie możliwe zweryfikowanie poprawności receptury betonowej.

Autor [71] zwraca uwagę na powszechny problem, również poruszany w tej rozprawie doktorskiej, że beton wałowany ma bardzo dobre właściwości trwałościowe i zmęczeniowe, lepsze niż w przypadku mas bitumicznych. Trudność w powszechnym stosowaniu polega na weryfikacji metod badawczych betonu w laboratorium i na budowie. Problem tkwi w przygotowaniu próbek. W artykule [71] poruszono różne metody przygotowania próbek, takie jak poprzez metodę Proctora, młotem wibracyjnym [72], stołem wibracyjnym i prasą żyratorową [73]. Jednym z bardzo ważnych wniosków dla przeprowadzonych badań jest stwierdzenie, że przygotowanie próbek zgodnie z energią zagęszczania wg metody Proctora odzwierciedla uzyskanie tożsamyh próbek podczas prac na budowie. Zagęszczenie młotem wibracyjnym często wykazywało wyższe wyniki niż powinny być, a prasą żyratorową niższe. Metody zagęszczenia wpływały również na nasiąkliwość i porowatość betonu.

Do podobnych wniosków doszli autorzy [74-75]. Wyniki uzyskane na próbkach przygotowanych w prasie żyratorowej odbiegały od wyników uzyskanych na odwiertach w terenie. Wg autorów [74] wyniki z próbek przygotowanych wg metody młota wibracyjnego i metody Proctora odbiegały znacznie od siebie. Według tych źródeł [74-75] sprawdzono również wyniki betonu badanego w laboratorium z odwiertami betonu wbudowanego na placu budowy. Autorzy wskazali, że trudno jednoznacznie stwierdzić, który wynik należałoby uznać za poprawny. Ponadto stwierdzono [74], że zagęszczanie młotem wibracyjnym może być przeszacowane pod kątem wyników wytrzymałości w odniesieniu do próbek przygotowywanych metodą Proctora. Można stwierdzić, że przygotowanie próbek zależy od czynnika ludzkiego, tj. użytej siły, nacisku, czasu zagęszczania, czy też kąta nachylenia młota, w przypadku zagęszczania młotem wibracyjnym. Natomiast przygotowywanie próbek metodą Proctora jest długotrwałe i niejednokrotnie możliwe tylko w laboratorium. W warunkach budowy ucie 6 próbek zajmuje od 40 do 60 minut, co bezpośrednio ma wpływ na jakość i parametry samej mieszanki betonowej. Jak wcześniej poruszono [13] – wpływ wilgotności optymalnej

ma bardzo duże znaczenie na zagęszczenia i prawidłowy proces hydratacji cementu w mieszance.

W każdym przypadku przygotowania próbek [70-71, 74-75] zwrócono uwagę, że minimalny wskaźnik zagęszczenia powinien wynosić $I_s \geq 0,98$. Tak samo objęto na ten element uwaga w literaturze [76], że różnice we wskaźniku zagęszczenia próbek mogą wynosić od $I_s = 0,98 \div 1,01$. Wynika to z samej metody przygotowania próbek. Autorzy [76] w publikacji również wskazali możliwość zastępowania pewnej ilości cementu wapieniem, co przekładało się na obniżenie wyników wytrzymałości w przypadku próbek przygotowywanych młotem wibracyjnym, czy tożsamo metodą Proctora. Zwrócono uwagę na fakt istnienia zależności otrzymanych wyników wytrzymałości od metody przygotowania próbek, co następcza badaczom dużo niewiadomych ze względu na brak przewidywalności wyników. Jednocześnie zachowując chęć szybkiego przygotowania próbek, np. metodą młota wibracyjnego, zamiast długotrwałej metody Proctora.

Różnice w uzyskanych wynikach w odniesieniu do różnych metod przygotowania próbek podniesiono również przez autorów [77-78]. W przypadku [77] odniesiono się m.in. do różnego, ale stałego czasu zagęszczania metodą młota wibracyjnego. Określono, że im dłuższy czas zagęszczania, tym bardziej zmniejsza się udział pustych przestrzeni, co bezpośrednio przekłada się na wyższy wskaźnik zagęszczenia i wytrzymałość. Badania przeprowadzono w czasie 5, 10, 15 i 20 sekund. Uwzględniono również czas ściskania próbek i wykazano, że powyżej 15 sekund, wytrzymałość na ściskanie zaczynała spadać. Wskazano, że najwyższe wyniki uzyskano przy czasie zagęszczania 15 sekund, zgodnie ze schematem [77] w 5 warstwach, w czasie badania wytrzymałości również 15 sekund. Metoda ta obrazuje jaki wpływ ma zagęszczanie młotem wibracyjnym w różnym czasie, a co ważne – zależna jest też ilość warstw. Autor [77] wskazuje również na problem, że inna konsystencja mieszanki betonowej może nie przekładać się na uzyskanie wyników zgodnych z eksperymentem.

Problem przygotowywania próbek betonu wałowanego jest istotny ze względu na możliwość sprawdzenia betonu na budowie i pewność osiągnięcia jego prawidłowych parametrów. W literaturze [79-81] podniesiono również problem układania się szkieletu kruszywowego podczas zagęszczania mieszanki betonowej. Udowodniono, że metoda Proctora, czyli niszczenia większych ziaren podczas uderzeń, wpływa na zmiany morfologiczne, np. chropowatość kruszyw. Nie wykazano takich

zjawisko podczas zagęszczania młotem wibracyjnym. Wynikało to na pewno ze względu niskiej amplitudy drgania tego typu młotów wibracyjnych. Wskazano jednak problem rozważanych technik zagęszczania na brak korelacji z wynikami wytrzymałości w warunkach wbudowania RCC.

Problem zagęszczania i przygotowania mieszanek betonowych dla betonu RCC jest powszechny i wymaga zgłębienia. W literaturze [69-81] wskazano, że nie ma uniwersalnej metody zagęszczania próbek, tak aby odzwierciedlały materiał wbudowany w warunkach budowy. Najbardziej zbliżoną jest metodą Proctora [71], która charakteryzuje się jednak długim czasem wykonania i dużym nakładem energii. Metoda młota wibracyjnego jest dobra, ale istnieje ryzyko przegęszczenia lub niedogęszczenia próbek, co stanowi pewną losowość wyniku. W takich przypadkach nie jest możliwym określenie zgodności z recepturą, czy też optymalizację kosztowe.

2.7 Przepisy krajowe dla stosowania betonu wałowanego

W literaturze [15, 55, 57, 60, 82] wskazują na stosowanie rozwiązań opartych na doświadczeniu. Przede wszystkim dobieranie konstrukcji drogowej i miąższości samej warstwy betonu wałowanego na podstawie praktyki zgodnej ze sztuką budowlaną oraz projektem. Dobrym przykładem uniwersalnego doboru warstw drogowych dla konstrukcji sztywnych jest Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych [83]. Dokument ten wprowadza różne opcje grubości nawierzchni betonowej w zależności od kategorii ruchu i warstw podłoża. Jest to doskonały przepis na dobranie rodzaju warstw konstrukcyjnych i ich grubości.

Poza KTKNS [83], który nie jest dokumentem przeznaczonym dla betonu wałowanego, nie ma w dokumentach krajowych przepisów dotyczących warunków wykonania i odbioru betonu w technologii wałowania. Są to przepisy tworzone na konkretne realizacje, czyli Szczegółowe Specyfikacje Techniczne, często oparte na wiedzy i doświadczeniu wykonawcy i przez nich pisane, czy tworzone. Dokumentem, który regulował wytyczne co do wymagań dla betonu wałowanego był dokument wydany przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad: Ogólne Specyfikacje Techniczne, rozdział III: PRACE KONSTRUKCYJNE, dział 06: Nawierzchnie betonowe, 06.02: Nawierzchnia z betonu wałowanego, Warszawa 21.07.2014 [84]. Jest to

dokument wycofany i archiwalny, którego się już nie spotyka w praktyce w Szczegółowych Specyfikacjach Technicznych. W roku 2025 trwają prace w ramach Stowarzyszenia Producentów Cementu mające na celu publikację dokumentu stanowiącego Warunki Wbudowania i Odbioru Robót Budowlanych dla betonu wykonywanego w technologii wałowania. Takie działanie na pewno rozpowszechni tę technologię.

W praktyce przydatne przepisy do wykonania betonu wałowanego to przede wszystkim normy [16, 48, 85-96]:

1. PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku [85]
2. PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu [86]
3. PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu [87]
4. PN-EN 206+A2:2021-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność [16]
5. PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu. Część 3 --Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań [88]
6. PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 Badania betonu -- Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających – Złuszczenie [89]
7. PN-EN 13877-1:2007 Nawierzchnie drogowe. Część 1: Materiały [90]
8. PN-EN 13877-2:2007 Nawierzchnie drogowe Część 2: wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowej [91]
9. PN-EN 14188-1:2010 Wypełniacze szczelin i zalewy drogowe -- Część 1: Wymagania wobec zalew drogowych na gorąco [92]
10. PN-EN 934-2+A1:2012 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 2: Domieszki do betonu. Definicje, wymagania, zgodność, znakowanie i etykietowanie [93]
11. PN-B-06265:2022-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność -- Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08 [48]
12. PN-EN 14227-1:2013-10 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym -- Specyfikacje -- Część 1: Mieszanki związane cementem [94]
13. PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie -- Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody -- Zagęszczanie metodą Proktora [95]

14. PN-S-96014:1997 Drogi samochodowe i lotniskowe -- Podbudowa z betonu cementowego pod nawierzchnię ulepszoną -- Wymagania i badania [96]

Żadna z powyższych norm nie odnosi się bezpośrednio do projektowania, czy też do wykonania i kontroli RCC. Postępowanie podczas projektowania wg wytycznych norm pozwoli uniknąć, np. błędów w doborze materiałów. Korzystanie z norm dla materiałów takich jak cementy zgodne z PN-EN 197-1:2012 [85], kruszywa PN-EN 12620+A1:2010 [85] i inne surowce są niezbędne dla betonu wałowanego, ponieważ zgodnie z ustawą o wyrobach budowlanych [96] beton jest wyrobem budowlanym. Wprowadzenie do obrotu takiego materiału wymaga uzyskania Krajowego Certyfikatu Zgodności Zakładowej Kontroli Produkcji, a uzyskuje się to poprzez certyfikację w Akredytowanych Certyfikujących Jednostkach zewnętrznych. Dlatego korzystanie z aktualnych norm w przypadku doboru materiałów do produkcji betonu jest niezbędne, a pozostałe normy mogą wskazać kierunek badań pod kątem jakości już wbudowanego betonu. W niniejszej pracy doktorskiej korzystano z norm i przepisów, które uwzględniają sposoby i wymagania odnośnie zagęszczania betonu [94-96].

2.8. Ekonomia stosowania RCC

W przypadku konkurencji RCC z konstrukcjami z mas bitumicznych, wydaje się że rozwiązania przedstawiające grubość minimum 22 cm wg KTKNS [83] dla podbudowy zasadniczej z mieszanek niezwiązanych [98], czy też 19 cm dla podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego nie jest uzasadnione ekonomicznie. Autorzy [99] podają, że koszt odcinka drogi o kategorii ruchu KR 2 i długości 1 km w konstrukcji standardowej nawierzchni bitumicznej wyniósł ponad 600 tys. zł., a w konstrukcji betonu wałowanego, przy zachowaniu 19 cm grubości 535 tys. zł. [Rys. 14].

asortyment robót	jednostka	cena jednostkowa	ilość	wartość
oczyszczenie i skropienie podbudowy mineralnej	m2	2,3	5000	11 500 zł
układanie warstwy wiążącej AC16W gr. 8 cm	m2	65,5	5000	327 500 zł
oczyszczenie i skropienie warstwy wiążącej	m2	2,1	5000	10 500 zł
układanie warstwy ścieralnej AC11 S gr. 4 cm	m2	50,3	5000	251 350 zł
			razem	600 850 zł

asortyment robót	jednostka	cena jednostkowa	ilość	wartość
wykonanie nawierzchni z betonu wałowanego C25/30 gr. 19 cm	m2	82,7	5000	413 500 zł
wykonanie i wypełnienie szczelin dylatacyjnych	m2	24,3	5000	121 500 zł
			razem	535 000 zł

Rys. 14. Porównanie kosztów wykonania warstwy nawierzchni z masy bitumicznej i betonu wałowanego [99].

Podane wartości kosztorysowe [99] są rzeczywistymi wartościami obowiązującymi na rynku, co w efekcie wskazuje, że możliwość korzystania z Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztucznych [83] dla nawierzchni z betonu wałowanego jest zasadne ekonomicznie. Natomiast wiele przytoczonych przykładów z dobrych praktyk [15, 55, 57, 60, 82] wskazuje, że grubości betonu wałowanego są mniejsze przy zachowaniu odpowiedniej kategorii ruchu i trwałości takiej nawierzchni. Spotyka się już konstrukcje z betonu wałowanego klasy C30/37 i grubości 12 cm [100], gdzie znaczna przewaga ekonomiczna w porównaniu do trwałości może być bardziej znacząca względem tradycyjnych rozwiązań nawierzchni z masy bitumicznej.

3. Hipoteza badawcza

Na podstawie analizy literatury wykazano, że doświadczenia w projektowaniu, badaniu czy wykonawstwie RCC są bardzo duże. Brak jest jednak pewnych założeń badawczych, które mogłyby być uniwersalną metodą projektowania pod kątem prawidłowego i łatwego zagęszczania się mieszanki betonowej oraz wyglądu samego betonu pod kątem makrotekstury. Udowodniono również podczas badań [73-75], że metoda przygotowania próbek wg Proctora odzwierciedla najpewniej to co się dzieje z betonem na budowie. Ponadto, oparto się na uzyskanych wynikach z budów i laboratorium, gdzie napotkano na problem wysokiej rozbieżności wyników wytrzymałości betonu w praktyce przy zachowaniu tych samych składników i receptur. Próbkę mieszanki betonowej zagęszcza się młotem wibracyjnym w sposób ręczny bezpośrednio na budowie lub laboratorium, co powoduje niepewność w wynikach wytrzymałości na ściskanie, czyli parametrach odbiorowych betonu. Na tej podstawie postawiono hipotezy badawcze:

1. Projektowanie składu kruszywowego dla betonu wałowanego wpływa na jego makroteksturę podczas wbudowywania bezpośrednio w warstwie konstrukcji drogowej. Makrotekstura ma bezpośrednie przełożenie na trwałość betonu w czasie.
2. Weryfikacja receptur betonu wałowanego pod kątem wyników wytrzymałości na ściskanie jest zależna od energii zagęszczania i wilgotności materiału podczas formowania próbek, a dokładność uzyskanych wyników jest związana z zastosowaną metodą zagęszczania.
3. Możliwość rzetelnego odwzorowania receptury i sprawdzenia mieszanki betonowej w trakcie wbudowania jest niezbędna w procesie budowy. Rozbieżności w wartościach wyników generuje dodatkowe koszty związane z powtórą weryfikacją betonu, np. wykonanie odwiertów.

3.1 Cel i zakres badań

Cele badań zmierzają do potwierdzenia hipotez badawczych. Na podstawie powyższych założeń zdefiniowano cele niniejszej pracy:

1. Opracowanie uniwersalnej metody projektowania pod kątem doboru uziarnienia mieszanki betonowej. Miernikiem jest ocena wizualna

warstwy stwardniałej mieszanki oraz laboratoryjne parametry wartości punktu piaskowego dla stosu okrucowego.

2. Określenie wpływu wilgotności optymalnej na proces zagęszczania próbek gęstości i wytrzymałość betonu.
3. Przedstawienie doświadczeń z budowy, jako przykład prawidłowego wykonania betonu wałowanego.
4. Opracowanie powtarzalnej i weryfikowalnej w łatwy sposób metody zagęszczania betonu. Jednoczesne wykluczenie czynnika ludzkiego w fazie przygotowania próbek, tj. nacisk, kąt i czas zagęszczania.
5. Opracowanie stanowiska badawczego do przygotowania próbek, które umożliwia formowanie w stałym powtarzalnym schemacie i czasie krótszym niż dla metody Proctora.
6. Dobranie odpowiednich parametrów stanowiska badawczego, tj. ciężaru zestawu, amplitudy drgań młota vibracyjnego, czasu zagęszczania i ilości warstw. Porównanie energii zagęszczania z metodą Proctora celem wyznaczenia prawidłowych ustawień.

Zakres badań, obejmujący zrealizowanie celów badań przedstawia się następująco:

1. Badanie uziarnienia kruszyw wg PN-EN 933-1:2012 [101]
2. Badanie reaktywności alkalicznej kruszyw wg PB/1/18 [102]
3. Badanie wilgotności optymalnej i maksymalnej objętości szkieletu gruntowego wg PN-EN 13286-2:2010 [95]
4. Przygotowanie próbek zgodnie z metodyką zagęszczania próbek wg PN-EN 13286-2:2010 [95] oraz metodą autorską (stanowisko badawcze) i metodą powszechną (młot vibracyjny ręczny)
5. Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu wg PN-EN 12390-3:2019-07 [88]
6. Badania mikroskopowe próbek betonu pod kątem sprawdzenia różnic w strukturze betonu przy różnych metodach zagęszczania.

4. Materiały i metody badań

4.1 Materiały użyte do badań

Podstawowe materiały wykorzystywane do badań laboratoryjnych, to kruszywa naturalne pochodzące z Kopalń i Żwirowni firmy HOLCIM POLSKA S.A., oraz cement z Cementowni Kujawy HOLCIM POLSKA S.A.. Do zaprojektowania i badań laboratoryjnych użyto:

1. Piasek średni o frakcji 0/2 mm [Rys. 15, Załącznik 1]. Piasek pomaga zapewnić odpowiednią konsystencję i ilość zaczynu. Prawidłowy dobór ilości piasku jest niezbędny do uzyskania odpowiedniego punktu piaskowego, który zapewnia prawidłową makroteksturę betonu.



Rys. 15. Kruszywo drobne frakcji 0/2 mm - Żwirownia Sępólno Wielkie. Zdjęcie autora.

2. Kruszywo żwirowe, grube o frakcji 2/8 mm [Rys. 16, Załącznik 2]. Kruszywo grube o frakcji 2/8 mm wpływa przede wszystkim na prawidłowy szkielet kruszywowy i zapewnia stabilną strukturę w betonie. Odpowiednie dobranie ilości każdej frakcji zapewnia ciągłość uziarnienia.



Rys. 16. Kruszywo grube frakcji 2/8 mm - Żwirownia Sępólno Wielkie. Zdjęcie autora.

3. Kruszywo żwirowe, grube frakcji 8/16 mm [Rys. 17, Załącznik 3]. Kruszywo grube 8/16 mm jest używane zwykle w większej ilości niż kruszywo 2/8 mm. Jest to związane z uzyskiwaniem wyższych wytrzymałości dla tej samej ilości dodatku cementu. Wynika to z mniejszej objętości obtoczenia ziaren kruszywa cementem. W przypadku betonu wałowanego odpowiedni udział frakcji 8/16 mm jest niezbędny do prawidłowego wbudowania i uzyskania odpowiedniej makrotekstury betonu



Rys. 17. Kruszywo grube frakcji 8/16 mm - Żwirownia Sępólno Wielkie. Zdjęcie autora

4. Kruszywo z recyklingu betonowego frakcji 2/8 mm. Kruszywo takie obniża ślad węglowy betonu oraz koszty. Korzystanie z kruszyw wtórnego pochodzenia przyczynia się do zmniejszenia zużycia

zasobów naturalnych. Wykorzystanie produktów recyklingowych w odpowiednich proporcjach w stosunku co stosu okruszowego może przyczynić się do poprawy właściwości betonu [Rys. 18].



Rys. 18. Kruszywo grube frakcji 2/8 mm – recykling betonowy.
Zdjęcie autora

5. Kruszywo z recyklingu betonowego frakcji 8/16 mm. Stanowi odpowiednik kruszywa żwirowego lub innego o odpowiedniej frakcji, czyli sprzyja uzyskaniu wyższych wytrzymałości betonu, przy czym zapewnia inne pozytywne wartości, czyli obniżenie śladu węglowego oraz kosztów dla mieszanki betonowej [Rys. 19].



Rys. 19. Kruszywo grube frakcji 8/16 mm – recykling betonowy.
Zdjęcie autora

6. Kruszywo łamane frakcji 2/8 mm. Kruszywo takie różni się od kruszyw żwirowych tym, że lepiej się klinuje i zagęszcza w mieszance betonowej. Zwykle uzyskuje się wyższe wyniki wytrzymałości betonu z użyciem kruszywa łamanego niż z wykorzystaniem kruszyw nieprzekruszonych [Rys. 20].



Rys. 20. Kruszywo łamane frakcji 2/8 mm - Kopalnia bazaltu Lubień.
Zdjęcie autora

7. Kruszywo łamane frakcji 8/16 mm. Kruszywo łamane frakcji 8/16 mm również służy do podwyższenia wytrzymałości betonu. Zastosowanie odpowiedniego rodzaju przekruszonej skały determinuje nie tylko wytrzymałość, ale również wygląd betonu, czyli jego makroteksturę [Rys. 21]



Rys. 21. Kruszywo łamane frakcji 8/16 mm - Kopalnia bazaltu Lubień.
Zdjęcie autora

8. Cement, który został wykorzystany do betonu wałowanego na potrzeby badawcze w laboratorium to CEM I 42,5R oraz CEM II A-V 42,5R. Cement [Załącznik 4, Załącznik 5]. Cement jest zgodny z normą PN-EN 197-1 [85]. Zastosowanie cementu wieloskładnikowego CEM II A-V 42,5R było konieczne potrzebą zmiany ze względu na brak dostępności CEM I 42,5R W 2024 zaprzestano produkcji cementu czystego przez firmę HOLCIM POLSKA S.A.. Krok ten był konsekwencją strategii, którą podjęła firma w celu redukcji emisji CO₂ przez produkty HOLCIM. Postępowanie to było również następstwem przyjęcia „Zielonego Ładu”, którego dwoma głównymi założeniami jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do roku 2050 oraz zmniejszenie emisji

CO₂ w produktach o 55% względem roku 1990 do roku 2030. Cement CEM II A-V 42,5R charakteryzuje się przede wszystkim zmniejszoną zawartością klinkieru w składzie oraz obecnością popiołów lotnych krzemionkowych V oraz innych dodatków [Rys. 22].

Substancja		Średnie stężenie wagowe w cemencie [%]	Numer rejestracyjny	EINECS WE Lista ⁽¹⁾	CAS
Klinkier cementu portlandzkiego*		80 – 90	Nie ma zastosowania	266-043-4*	65997-15-1
Kamień wapienny LL		0 – 5	Nie ma zastosowania	215-279-6	1317-65-3
Popiół lotny krzemionkowy V		13 – 16	01-2119491179-27-xxxx	931-322-8	-
Żużel wielkopiecowy S		13 – 16	01-2119487456-25-xxxx	266-002-0	65996-69-2
Siarczan (VI) wapnia	Gips	4 – 6	Nie ma zastosowania	231-900-3	7778-18-9
	REA-gips, gips z odsiarczania gazów	4 – 6	01-2119444918-26-xxxx	302-652-4	94114-19-9
Pyły z produkcji cementu portlandzkiego		0 – 1	01-2119486767-17-0008	270-659-9	68475-76-3
Reduktor chromu (VI)		0 - 1	01-2119513203-57-xxxx	231-753-5	7720-78-7

Rys. 22. Skład cementu CEM II A-V 42,5R według karty charakterystyki [103] wraz z wykazem substancji podlegających rejestracji zgodnych z REACH.

Wyniki wytrzymałości cementu wpływają na wytrzymałość końcową betonu. Porównując obydwie cementy należy stwierdzić, że jeśli chodzi o wytrzymałość wartości są zbliżone [Tab. 3], co determinuje właściwości betonu.

Tab. 3. Wartości wytrzymałości dla CEM I 42,5R oraz CEM II A-V 42,5R na podstawie danych z Działu Kontroli Jakości firmy HOLCIM POLSKA S.A.. Wyniki średnie z okresu 6 miesięcy.

Lp	CEM I 42,5R	CEM II A-V 42,5R
Wytrzymałość wczesna po 2 dniach [MPa]	27,5	27,1
Wytrzymałość normowa po 28 dniach [MPa]	60,2	61,8

9. Woda zarobowa – używano wodę zarobową [104] wodociągową, zdemineralizowaną. W przypadku produkcji ciągłej na węźle betoniarskim używa się wody wodociągowej, mieszanej z wodą

recyklingową wg normy PN-EN 1008:2004 [104]. W ten sposób ogranicza się zużycie wody i stosuje gospodarkę obiegu zamkniętego.

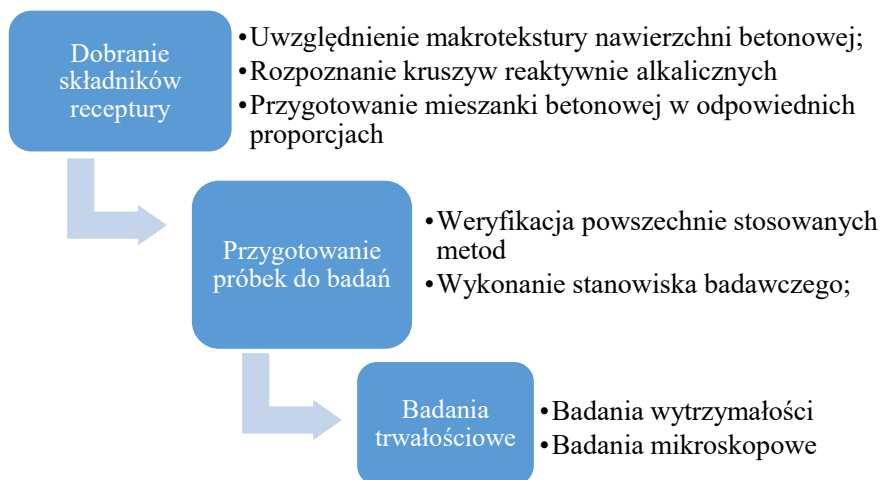
10. Domieszka napowietrzająca firmy SIKA LPSA-94. Domieszka, oprócz właściwości napowietrzających, które wpływały na zwiększoną wytrzymałość na mróz betonu, poprawiała urabialność mieszanki. Zgodnie z kartą charakterystyki producenta [Załącznik 6], domieszka ta jest przeznaczona do betonów o niskich klasach konsystencji i niskich wskaźnikach w/c. W przypadku betonów gęstoplastycznych, jakim jest RCC sprawdzenie wartości napowietrzenia metodą normową [105] jest niemożliwe ze względu na konsystencję mieszanki. Dodatek domieszki napowietrzającej dobrano na podstawie wieloletnich doświadczeń.
11. Kruszywo z recyklingu o frakcji 2/16 mm [Rys. 23, Załącznik 7], które wykorzystywano do badań pochodziło z przekruszenia gruzu betonowego. Nie wykonano oznaczeń wstępnych przed przekruszeniem. Natomiast właściwości kruszywa są zgodne z wymaganiami jak dla kruszyw wykorzystywanych do betonu [86]. Zastosowano dodatek frakcji łączonych, tj. 2/16 mm ze względu na możliwość optymalizacji miejsca na potencjalnym węźle betoniarskim – redukcja ilość zasieków i zagospodarowania zsyphu.



Rys. 23. Kruszywo recyklingowe o frakcji 2/16 mm. Zdjęcie autora.

4.2 Metodyka badań

Plan badań przeprowadzonych w pracy doktorskiej zakładał sprawdzenie hipotezy badawczej. Na podstawie przeprowadzenia normowych badań opracowano uniwersalną metodę projektowania składu mieszanki betonowej oraz wypracowano i sprawdzono metodę zagęszczania próbek mieszanki betonu wałowanego. Całość pracy badawczej podzielono na trzy etapy zgodnie z [Rys. 24]:



Rys. 24. Poszczególne etapy badawcze.

4.2.1. Etap I metodyki badań

1. Analiza sitowa kruszyw zgodnie z PN-EN 933-1 [101] i określenie punktu piaskowego całej mieszanki stosu okrucowego. Analiza sitowa kruszyw została przeprowadzona zestawem sit o wymiarach #0,00 mm; #0,063 mm; #0,125 mm; #0,250 mm; #0,5 mm; #1,0 mm; #2,0 mm; #4,0 mm; #5,6 mm; #8,0 mm; #11,2 mm; #16,0 mm; #22,4 mm [Rys. 25]



Rys. 25. Zestaw sit, drgania: pionowo – skrętne; amplituda: regulowana 0 - 2,5 mm; częstotliwość drgań: stała 50 Hz; czas przesiewania: regulowany 0 - 99 min (10 min+dosiewanie). Zdjęcie autora.

Stosowano materiały zgodne z normą PN-EN 12620+A1:2010 [86], dlatego skupiono się na badaniach, które miały bezpośredni wpływ na opracowanie uniwersalnej metody projektowania stosu okruszowego mieszanki betonowej. Na podstawie analizy sitowej można wyznaczyć parametry, które wpływają na możliwość i łatwość

zagęszczania. Wskaźnik różnoziarnistości C_U wyznaczono zgodnie ze wzorem [13]:

$$C_U = d_{60}/d_{10} \text{ [106];}$$

gdzie:

- a. d_{60} – średnica zastępcza sita przez które przechodzi 60% materiału [mm];
- b. d_{10} – średnica zastępcza sita przez które przechodzi 10% materiału [mm].

Według literatury [106] materiał określa się jako:

- a. $C_U > 15$ – materiał bardzo różnoziarnisty, bardzo dobrze zagęszczalny,
- b. $5 > C_U > 15$ – materiał różnoziarnisty, dobrze zagęszczalny,
- c. $C_U < 5$ – materiał równoziarnisty, słabo zagęszczalny.

W praktyce gruntowej przyjmuje się, że materiał jest dopuszczony do wbudowania w warstwy podbudowy, czy nasypu jeśli wskaźnik różnoziarnistości $C_U > 3$ pod warunkiem, że zostaną osiągnięte parametry zagęszczenia oraz nośności warstwy zgodnie z PN-S 02205:1998 [107]. W przypadku mieszanki betonowej wskaźnik różnoziarnistości jest zdecydowanie na poziomie $C_U > 15$. Dlatego kolejnym parametrem potrzebnym do zinterpretowania właściwego doboru poszczególnych frakcji jest wskaźnik krzywizny uziarnienia C [13]:

$$C = d_{30}^2 / (d_{10} * d_{60});$$

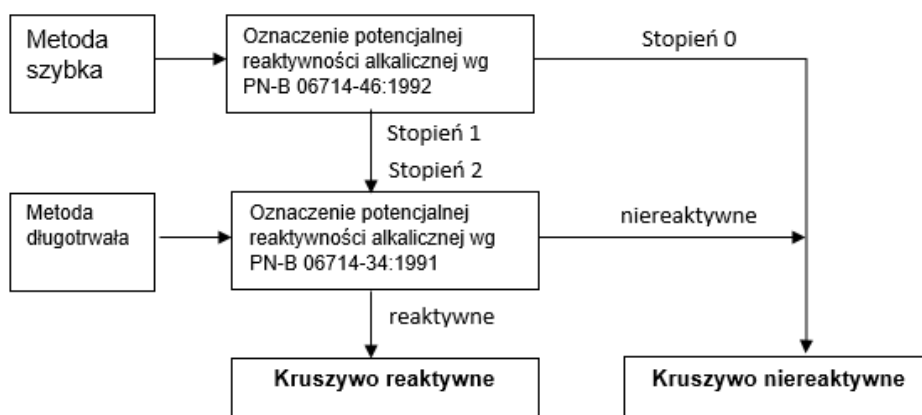
gdzie:

- a. d_{30} – średnica zastępcza sita przez które przechodzi 30% materiału [mm];
- b. d_{60} – średnica zastępcza sita przez które przechodzi 60% materiału [mm];
- c. d_{10} – średnica zastępcza sita przez które przechodzi 10% materiału [mm].

Przyjęto, że materiał nadaje się do wbudowania, jeśli $C_C = 1-3$. Wartość parametru krzywizny uziarnienia wskazuje na to, czy materiał charakteryzuje się różnorodnością uziarnienia. Innymi słowy – krzywa uziarnienia jest ciągła i wskazuje na prawidłowy rozkład uziarnienia na poszczególnych frakcjach w stosie okruszowym.

Badania analizy sitowej wybranych kruszyw służyły do wyznaczenia prawidłowego doboru udziału poszczególnych frakcji kruszyw, tj. połączenia frakcji piaskowej 0/2 mm oraz frakcji kruszywa żwirowego 2/8 mm i 8/16 mm. Dobór kruszyw wyznaczono za pomocą punktu piaskowego, czyli ilości kruszywa na sicie o wymiarze #2,0 mm.

2. Reaktywności alkalicznej kruszyw zgodnie z metodą przyspieszoną PB/1 [102]. W roku 2022 wszedł w życie oraz praktykę budowlaną dokument PB/1 [102], w którym określa się metodologię badania oraz wymagania dotyczące wartości potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszyw stosowanych w betonach. Uznano, że jest to ważny parametr, ponieważ w przypadku wdrażania projektu pracy doktorskiej była potrzeba zapewnienia jak największej jakości i pewności stosowania instrukcji wdrożenia. Procedura PB/1/18 wymaga wykonania form z cementem referencyjnym w ilości alkaliów $0,9\% \pm 0,1\%$. Następnie przechowywanie próbek odbywa się w 1M roztworze NaOH oraz w temperaturze $80,0 \pm 20\text{C}$ w łaźni wodnej. Pomiary zmian liniowych i masy próbek wykonuje się minimum 2 razy w ciągu 14 dni. Okres 14 dni uznaje się za zakończone badanie. Jednak jeśli są kontynuowane w celu poznania ewentualnych zmian liniowych, pomiar odbywa się częściej – minimum dwa razy w tygodniu. Stopień reaktywności alkalicznej można określić zgodnie z [Rys. 26] wg zastąpionych metod badań stosowanych przez lata [108]:



Rys. 26. Schemat postępowania podczas badania reaktywności alkalicznej kruszyw [109].

3. Przygotowanie mieszanki betonowej polegało na połączeniu wszystkich składników w odpowiednich proporcjach. Mieszanke betonową wykonywano w mieszalniku laboratoryjnym Pemat ZK 50 HE [Rys. 27].



Rys. 27. Mieszalnik Pemat ZK 50 HE, moc 2,37 kW, 50Hz, maksymalny załadunek 80 kg. Zdjęcie własne.

Mieszalnik zapewnia jednorodność wymieszania, a każdy zarób był zgodny z recepturą opracowaną na podstawie analizy sitowej materiałów i dobrania odpowiedniego udziału ilości kruszyw, cementu i wody [Tab. 4].

Tab. 4. Przykładowy skład receptury mieszanki betonowej przeznaczony do badań jakościowych.

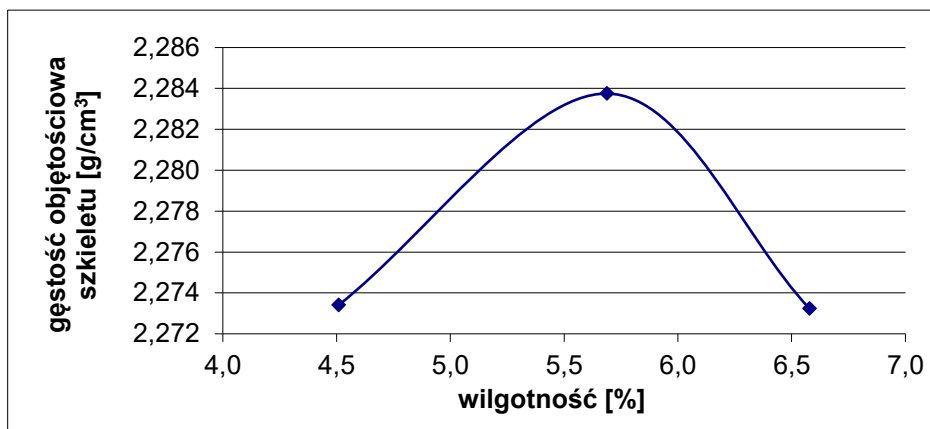
Ilość składników na 1 m ³ mieszanki betonowej			Udział objętościowy %
Producent	Składniki	Ilość [kg/m ³]	
HOLCIM	CEM II A-V 42,5R	320	
Sępólno Wlk.	0-2 mm	813	
Sępólno Wlk.	2-8 mm	610	
Sępólno Wlk.	8-16 mm	610	30
WODA	Woda wodociągowa	112	1,00%
SIKA	Napowietrzacz LPS A94	3,20	
Ciężar objętościowy mieszanki betonowej		2467,9	

Badanie konsystencji mieszanki betonowej badano za pomocą określenia wilgotności optymalnej, tj. badania Proctora zgodnie z PN-EN 13286-2:2010 [95]. Nie przeprowadzono badań konsystencji mieszanki wg metody Ve-Be [17] ze względu na małą dokładność metody i subiektywną ocenę momentu zakończenia badania. W przypadku metody Ve-Be za koniec badania uznaje się chwilę, w której pod pokrywą aparatu zostanie osiągnięty całkowity rozplływ mieszanki. [Rys. 28]. Przedział czasu dla którego określa się konsystencję metodą Ve-Be wyznacza się zgodnie z [Tab. 2].



Rys. 28. Rozpływ materiału metodą Ve-Be po zakończeniu badania. Zdjęcie autora.

Określenie ilości wody w mieszance betonowej jest potrzebne przede wszystkim do tego, aby materiał łatwo się zagęszczał. Woda wpływa na zmniejszenie tarcia między cząsteczkami kruszywa w mieszance i ułatwia zagęszczanie. Zawartość wody wiąże się bezpośrednio z gęstością całej mieszanki ze względu na to, że dopiero przy odpowiedniej ilości wody, możliwe jest osiągnięcie maksymalnej gęstości szkieletu kruszywowo-cementowego w 1m^3 [13], [Rys. 29].



Rys. 29. Wykres Proctora dla mieszanki kruszywowo-cementowej zgodnie z metodyką badań w przypadku określania ilości wody w mieszance

Na podstawie Rys. 29 można zaobserwować wyraźną maksymalną gęstość strukturalną przy określonej ilości wody. Wilgotność optymalna ma bezpośredni wpływ na możliwość zagęszczania szkieletu kruszywowo-spoiwowego mieszanki betonowej przy odpowiedniej energii zagęszczania zgodnej z normą PN-EN 13286-2:2010 [95]. Ocena makroskopowa mieszanki sprawia wrażenie, że jest mokra, ale w rzeczywistości daje się formować i jednocześnie nie ulega uplastycznieniu [Rys. 30].



Rys. 30. Wygląd świeżej mieszanki betonowej. Zdjęcie autora.

Procedura przeprowadzenia badania Proctora zgodnie z PN-EN 13286-2 [95] dla wyznaczania wartości wilgotności optymalnej oraz maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu kruszywowo-cementowego:

5. Zważyć z dokładnością do 5 g pustą formę o wymiarach 120x150 mm (hxd) (forma B) [Rys. 31] i zapisać masę jako m_1 . Założyć nasadkę do formy.
6. Wilgotną próbkę materiału umieścić w formie B w ilości takiej, aby zajmowała ona około 1/3 wysokości formy.
7. Przyłożyć 56 uderzeń ubijakiem Proctora o wadze 2,5 kg i wysokości spadu 305 mm (ubijak A) kontrolowanego przez prowadnicę. Jednocześnie rozmieszczając uderzenia jednolicie po powierzchni, a kończące uderzenie powinno być w centralnym punkcie formy.
8. Powtórzyć procedurę z punktu 2 i 3 dwukrotnie, tak aby zawartość ubitego materiału wystawała około 10 mm poza rant formy.

9. Usunąć wszystkie grube ziarna i wyrównać powierzchnię poprzez wciśnięcie drobnego materiału równo z rantem formy. Zważyć formę z materiałem z dokładnością do 5 g i zapisać masę jako m_2 .
10. Wykonać kroki 1-5 na kolejnej próbce materiału ze zwiększoną ilością wody o około 2% względem poprzednich, uzyskując minimum 3 oznaczenia.
11. Badanie uznaje się za zakończone, gdy masa m_2 jest niższa niż z poprzedniego oznaczenia lub woda wypłynie ze spodu formy B.
12. Obliczyć gęstość objętościową dla każdego z oznaczeń wg wzoru [95]:
 $\rho = (m_2 - m_1) / V$; gdzie:
 ρ – gęstość objętościowa [g/cm^3]
 m_2 – masa materiału z formą po ubiciu [g]
 m_1 – masa formy [g]
 V – objętość formy B [cm^3]
9. Obliczyć gęstość strukturalną dla każdego z oznaczeń wg wzoru [95]:
 $\rho_d = (100 \times \rho) / (100 + w)$; gdzie:
 ρ_d – gęstość strukturalna [g/cm^3]
 ρ – gęstość objętościowa [g/cm^3]
 w – zawartość wody [%].
10. Wynikiem jest najwyższa wartość gęstości strukturalnej przy określonej ilości wody oznaczonej jako w_{opt} .

Tablica A.3 – Przykłady wariantów dla badania Proctora – forma B

Forma		Ubijak			Procedura		Energia zagęszczania MJ/m ³
Średnica mm	Wysokość mm	Masa kg	Średnica mm	Wysokość mm	Masa kg	Średnica mm	
152	127	4,54	51	457	5	13	0,574 1
152,4	116,4	2,5	50	300	3	56	0,582 1
152	117	2,5	50	300	3	56	0,582 2
152,4	116,8	2,48	50,8	304,8	3	56	0,584 7
150	125	4,5	75	450	3	22	0,593 5
152	114	2,49	50	305	3	55	0,594 3
152,4 ± 0,2	116,4 ± 0,2	2,495 ± 0,005	51,0 ± 0,5	305	3	56	od 0,586 9 do 0,594 4
152,0 ± 0,5	116,0 ± 0,6	2,490 0 ± 0,002 5	51 ± 1	305 ± 2	3	56	od 0,583 3 do 0,606 2
152,4 ± 0,5	116,4 ± 0,5	2,50 ± 0,01	50,8 ± 0,1	305 ± 5	3	56	od 0,573 6 do 0,610 6
152,0 ± 0,5	116,0 ± 0,5	2,500 ± 0,025	50,0 ± 0,5	300 ± 3	3	57	od 0,579 5 do 0,616 4

Rys. 31. Przykładowe warianty dla badania Proctora w formie B wg PN-EN 13286-2 Tablica A.3 [95]. W rozprawie doktorskiej przeprowadzano badania zgodnie z zaznaczeniem.

Powyższa procedura jest używana dla sporządzania próbek z mieszanki betonowej metodą Proctora. Wilgotność optymalna jest

uprzednio wyznaczona. Procedura wykonania serii próbek (6 sztuk dla oznaczenia wytrzymałości po 7 i 28 dniach) jest czasochłonna oraz energochłonna, stąd potrzeba optymalizacji procesu.

4.2.2 Etap II metodyki badań

W II etapie badań przygotowana serie próbek wykonanych różnymi metodami zagęszczania:

1. Zagęszczanie próbek wg metody Proctora zgodnie z PN-EN 132862:2010 [95]. Wykonano próbki w formach walcowych o wymiarach 120x150 mm (hxd) z energią zagęszczania wynoszącą 0,5821 MJ/m³. Zgodnie z literaturą [70] oraz własnym doświadczeniem udowodniono, że nie ma różnic między próbkami zagęszczanymi w formach walcowych w zastosowanym wymiarze a tradycyjnymi formami do betonu, czyli formami sześciennymi 150x150 mm. Zagęszczano materiał w 3 warstwach po 56 uderzeń, młotem 2,5 kg z wysokością spadu 305 mm [Rys. 32]



Rys. 32. Automatyczny aparat Proctora wraz z cylindryczną formą stalową 120x150 mm – forma B wg [95]. Zdjęcie autora.

2. Zagęszczanie młotem wibracyjnym. Powszechnie przyjęta praktyka przygotowywania próbek w Polsce dla betonu wałowanego. Nie wiąże się z powołaniem na żadne przepisy normowe. Zgodnie z przeglądem

literatury [70, 72] wskazuje się, że metody wg ASTM C1435 [72] są stosowane dla próbek cylindrycznych. Wiele laboratoriów przygotowuje próbki w formach sześciennych. Przyjęto te wymiary próbek nie tylko na węzłach betoniarskich firmy HOLCIM POLSKA S.A., ale również jest to powszechna praktyka stosowana np. w Laboratoriach Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Zagęszczano próbki ręcznie młotem wibracyjnym w dwóch warstwach. Jedyną stałą była procedura odmierzania ilości świeżej mieszanki betonowej, aby w każdej próbce znajdowała się tożsama ilość materiału, tzw. zagęszczanie do stałej masy. Wykorzystano młot wibracyjny o wadze 6,3 kg i przystawce do próbek o wymiarach 150x150 mm o wadze 1,5 kg oraz amplitudzie drgań 2870 uderów/minutę. Formowano próbki sześciennie 150x150x150 mm używając siły nacisku ręcznego. Probki były przygotowywane przez różne osoby, co miało wpływ na energię zagęszczania [Rys. 33]



Rys. 33. Młot wibracyjny wraz ze stopą do zagęszczania ręcznego (zdjęcie do podmiany) i forma do przygotowania próbki sześcienniej 150x150x150 mm. Zdjęcie autora.

Przygotowanie próbki sześcienniej o wymiarach 150x150 mm przy pomocy ręcznego ubijaka typu A [95] wymaga posłużenia się odpowiednim wzorem [13], który umożliwi wyznaczenie odpowiedniej liczby uderzeń dla znanej energii zagęszczenia:

$$I = mg \sqrt{\frac{2H}{g}} \cdot \frac{N}{V}$$

gdzie:

I – jednostkowy impuls uderzenia na jednostkę objętości [MJ/m^3]

m – masa ubijaka [kg]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]

H – wysokość spadu ubijaka [m]

N – ilość uderzeń ubijaka [-]

V – objętość próbki [m^3]

Na podstawie powyższego wzoru można wyznaczyć ilość uderzeń na próbkę sześcienną o wymiarach 150x150 mm w ilości 308 uderzeń dla ubijaka typu A [Rys. 34].



Rys. 34. Ubijak Proctora typu A o wadze 2,5 kg, wysokości spadu 300 mm i szklance o wymiarach 50,8 mm [95]. Zdjęcie autora.

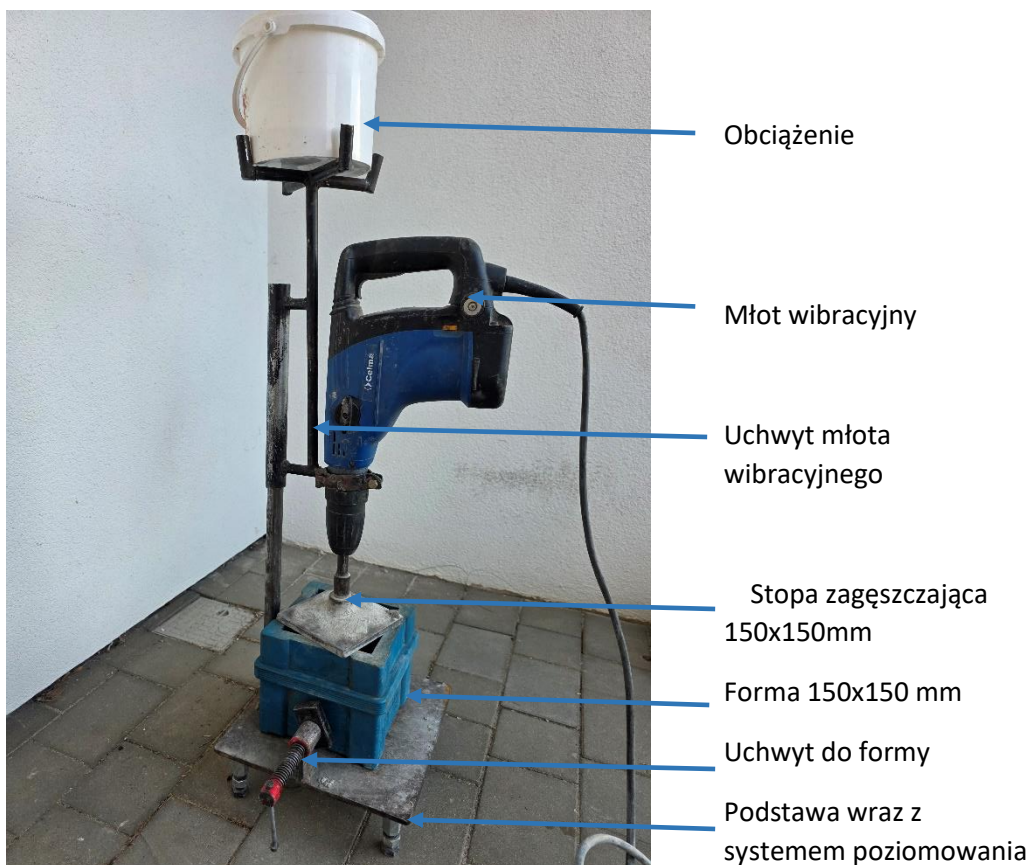
Dla próbki cylindrycznej 120x150 mm objętość wynosi 16,96 cm^3 , natomiast dla próbki sześcienniej 150x150 objętość wynosi niemal dwa razy więcej 33,75 cm^3 . Ilość uderzeń ubijaka typu w celu dostarczenia odpowiedniej energii zagęszczania dla próbki cylindrycznej wynosi

168 rozłożone na 3 warstwy. Odpowiednio próbka sześcienna powinna przyjąć 103 uderzenia na każdą z 3 warstw. Wartość ta przekłada się bezpośrednio nie tylko na przyłożoną pracę, ale również na czas przygotowania próbek.

3. Zagęszczanie próbek za pomocą młota wibracyjnego na statywie. Autorska metoda na podstawie której jest możliwe wyeliminowanie czynnika ludzkiego podczas zagęszczania próbek, a oznaczenie odpowiedniego czasu, liczby warstw i masy zestawu zapewnia powtarzalne zagęszczanie z każdą próbką. Procedura przygotowywania próbek polegała na zmiennych:
 - a. Ilość warstw
 - b. Czas zagęszczania
 - c. Masa zestawu zagęszczającego
 - d. Amplituda drgań

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń określono prawidłową procedurę przygotowania próbek i wyłoniono metodę jak najbardziej zbliżoną do metody normowej wg Proctora [95]. Metodyka badań została opracowana na podstawie potwierdzeń badań zgodnych z Proctorem ze względu na to, że jest to metoda określona w normach i powtarzalna. Brak korzyści z przygotowania próbek wg Proctora polega na długim czasie zagęszczania - 6 próbek przygotowuje się około 60 minut, co wpływa na właściwości mieszanki betonowej (wysychanie pobranego materiału) oraz metoda ta wymaga dużych nakładów energii ze strony osób przeprowadzających badanie, tj. sam przebieg procedury. Opracowano metodę powtarzalną jako alternatywę dla ręcznego wykonania próbek, co sprawiało brak możliwości sprawdzenia receptury.

Młot wibracyjny zamocowano na uprzednio wykonanym statywie, który umożliwia z łatwością obsługę przez jedną osobę a czas przygotowania 6 próbek mieści się w około 20 minutach, co bezpośrednio przekłada się na uproszczenie procedury Proctora i zapewnienie tożsamej jakości wykonania próbek. Na statywie jest możliwość umieszczenia ciężaru oraz przymocowania formy za pomocą zacisków, aby zapewnić jak najdokładniejsze przyłożenie energii zagęszczania dla próbki [Rys. 35].



Rys. 35. Statyw wraz z młotem wibracyjnym i elementem obciążającym. Zdjęcie autora.

Każda z metod zagęszczenia wymaga osobnego stanowiska badawczego, przez co przygotowanie próbek odbywało się w każdym etapie badań zgodnie z określoną technologią. Poniżej przedstawiono stanowiska badawcze [Rys. 36].



Rys. 36. Narzędzia do metodyki zagęszczania – od lewej – metoda ręczna za pomocą młota wibracyjnego, w środku metoda Proctora automatyczna, z prawej metoda autorska wraz ze statywem.

Tylko metoda zagęszczania wg Proctora jest określona normowo [94]. Oryginalność metody autorskiej polega na zdefiniowaniu parametrów dla zestawu zagęszczającego, począwszy od ustawień młota wibracyjnego, obciążenia dla statywu oraz ilości warstw w próbce. Powstaje praktyczne stanowisko badawcze, przyspieszające przygotowanie próbek, zapewniając ich prawidłowe zagęszczenie.

4.2.3 Badania trwałościowe betonu

Przygotowane próbki zgodnie z trzema metodami zostały poddane badaniom trwałościowym w taki sposób, aby zapewnić możliwość weryfikacji tych badań zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021-08 [16], co stanowi wymóg dopuszczenia wyrobu budowlanego, jakim jest beton, do obrotu. Weryfikacja podstawowych badań trwałościowych jest niezmiernie ważna i wymaga zachowania odpowiednich czynności:

1. Po rozformowaniu próbek należy je umieścić w środowisku, które zapewnia odpowiednią wilgotność. Próbki były przechowywane w komorze wilgotnościowej, która zapewnia 99% wilgotności powietrza [Rys. 37]. Następnie po 7 dniach były przechowywane w wannie z temperaturą $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ zgodnie z warunkami laboratoryjnymi.



Rys. 37. Komora wilgotnościowa (lewe zdjęcie) do przechowywania próbek bezpośrednio po rozformowaniu oraz wanna (prawe zdjęcie) do przechowywania między 7 a 28 dniem dojrzewania. Zdjęcie autora.

2. Badania wytrzymałościowe są podstawową weryfikacją dla betonu. Na podstawie wytrzymałości jest określana klasa betonu, jak również zgodność z recepturą i prawidłowość produkcji na węźle betoniarskim. Badanie wytrzymałości polegało na ściskaniu betonu w prasie hydraulicznej [Rys. 38] firmy Controls do 3000 kN. Badania przeprowadzane w uniwersalnej, wzorcowanej i legalizowanej prasie zapewniały porównanie próbek zarówno cylindrycznych o wymiarach 120x150 mm (hxd), jak i sześciennych (150x150 mm).



Rys. 38. Prasa hydrauliczna Controls do 3000 kN. Zdjęcie autora

3. Badania mikroskopowe struktury. Obserwacje stwardniałych próbek w różnych metodach zagęszczania polegały na oględzinach powierzchni i struktury po ich zniszczeniu. Wykorzystano w tym celu mikroskop Tescan – Vega 3. Zbadano w ten sposób topografię próbki na podstawie detekcji elektronów wtórnych. Mikroskop służy również do analizy pierwiastkowej. W wypadku badania tego samego składu, nie skupiono się na tym aspekcie.

Oprócz topografii powierzchni wykonano badania mikroskopem do badań petrografii firmy KEYENCE model VHX-X1F [Rys. 39]. Mikroskop pozwala na obserwację struktury próbki od $2000\mu\text{m}$ do $200\mu\text{m}$, przy czym obserwowana struktura nie musi być płaska, ani szlifowana. W przypadku przygotowania próbek za pomocą szlifu

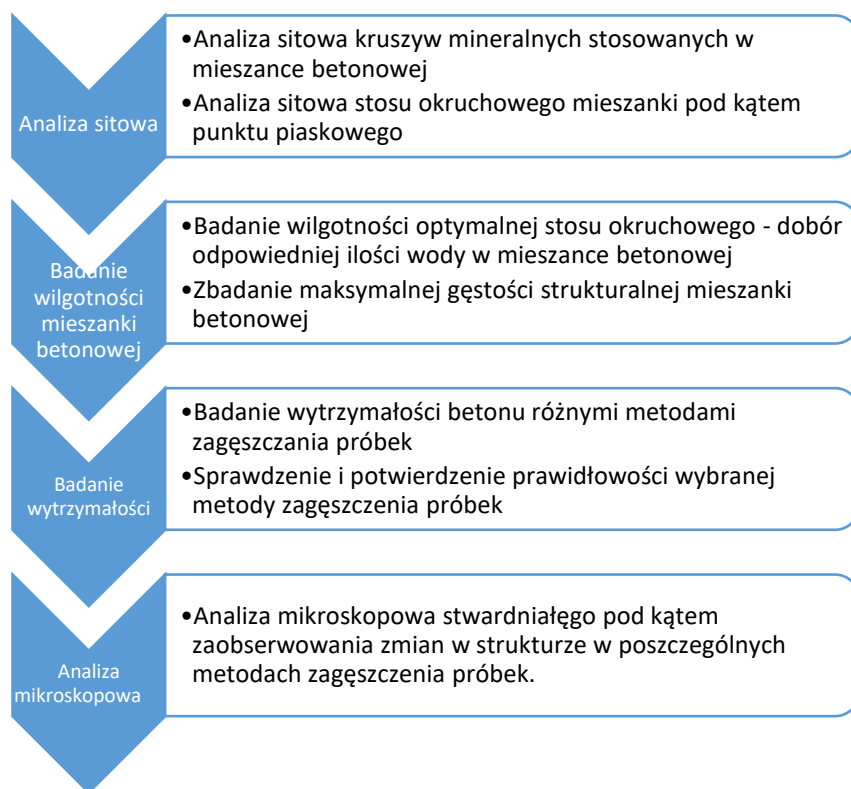
zaburzano by strukturę obserwowanej powierzchni. Próbki do obserwacji zostały odłupane od właściwych próbek przygotowywanych różną metodą zagęszczania. Na podstawie obserwacji struktury przełomu próbki szukano różnic w strukturze dla metody zagęszczania próbek młotem wibracyjnym oraz metodą Proctora.



Rys. 39. Stanowisko badawcze mikroskop KEYENCE model VHX-X1F.
Zdjęcie autora.

5. Wyniki badań

Badania przeprowadzone w niniejszej rozprawie doktorskiej odbywały się w kilku etapach, które były od siebie mocno zależne. Każdy kontynuowany etap badań był ściśle uzależniony od otrzymanych wyników poprzedzających i w ten sposób prowadzono dalsze doświadczenia. Dlatego też wyniki zostały przedstawione i omówione od początkowego etapu mającego wpływ na dalszy przebieg i dobór materiałów w kolejnych etapach badań. Wyjaśniono również proces i moment przejścia do kolejnego kroku po osiągnięciu odpowiednich parametrów. Wyłoniono je na podstawie wyników liczbowych, jak również doświadczenia i praktyki zawodowej. W celu zobrazowania etapów wykonywania badań przedstawiono schemat realizowania działań [Rys. 40].



Rys. 40. Schemat etapów badań w rozprawie doktorskiej.

5.1. Analiza sitowa

Podstawowym badaniem, które jest niezbędne do wyznaczenia prawidłowego stosu okruszowego w recepcie mieszanki betonowej jest badanie przesiewu zgodnie z PN-EN 933-1:2012 [101]. Na tej podstawie można przede wszystkim wyznaczyć odpowiednią wartość wskaźnika różnoziarnistości oraz krzywizny uziarnienia [107]. Parametry te świadczą o tym, że mieszanka jest łatwa w zagęszczeniu. W przypadku doboru stosu okruszowego mieszanki betonowej, należało zbadać w pierwszym etapie wszystkie składowe kruszyw. Do podstawowych konfiguracji kruszyw w mieszance betonowej w badaniach laboratoryjnych oraz polowych wykorzystywano materiały zgodnie z ich uziarnieniem i uwzględnieniem tolerancji:

4. Piasek 0/2 mm z Kopalni Sępólno Wielkie [Załącznik 8]
5. Piasek 0/2 mm ze Żwirowni Łojewo [Załącznik 9]
6. Żwir 2/8 mm z Kopalni Sępólno Wielkie [Załącznik 10]
7. Żwir 2/8 mm z Kopalni Łojewo [Załącznik 11]
8. Żwir 8/16 mm z Kopalni Sępólno Wielkie [Załącznik 12]
9. Żwir 8/16 mm z Kopalni Łojewo [Załącznik 13]
10. Kruszywo recyklingowe Aggneo 2/16 mm [Załącznik 14]
11. Kruszywo recyklingowe Aggneo 4/16 mm [Załącznik 15]

Mieszanke betonową projektowano pod kątem uwzględnienia punktu piaskowego. Wytypowano następujące materiały do analizy stosu okruszowego w odpowiednich recepturach betonowych [Rys. 41]:

C8/10P, C12/15P, C30/37L	C30/37Ł	C30/37R	C30/37Z
a. Piasek 0/2 mm z Kopalni Sępólno Wielkie b. Żwir 2/8 mm z Kopalni Sępólno Wielkie c. Żwir 8/16 mm z Kopalni Sępólno Wielkie	a. Piasek 0/2 mm ze Żwirowni Łojewo b. Żwir 2/8 mm z Kopalni Łojewo c. Żwir 8/16 mm z Kopalni Łojewo	a. Piasek 0/2 mm z Kopalni Sępólno Wielkie b. Żwir 2/8 mm z Kopalni Sępólno Wielkie c. Żwir 8/16 mm z Kopalni Sępólno Wielkie Kruszywo recyklingowe Aggneo 2/16 mm	a. Piasek 0/2 mm ze Żwirowni Gorzupie • Bazalt 2/8 mm z Kopalni Lubień • Bazalt 8/16 mm z Kopalni Lubień

Rys. 41. Pochodzenie i rodzaj kruszyw użytych w recepturach betonowych do badań laboratoryjnych oraz badań przeprowadzonych na budowach.

Rys. 41 podzielono na receptury podstawowe (C30/37L-załącznik 15), w których badano nie tylko odpowiedni dobór stosu okruszowego, czyli przede wszystkim sprawdzano wygląd makrotekstury betonu, ale również metodologię zagęszczenia. Receptury pomocnicze (C8/10P-, C12/15P), służyły do weryfikacji metod zagęszczania, a także wpływu kruszyw recyklingowych (C30/37R) na właściwości trwałościowe betonu. Poza recepturą podstawową wytypowano receptury sprawdzające i wykonawcze (C30/37B, C30/37Z), które w trakcie realizowania badań w pracy doktorskiej były weryfikowane na budowie w warunkach polowych.

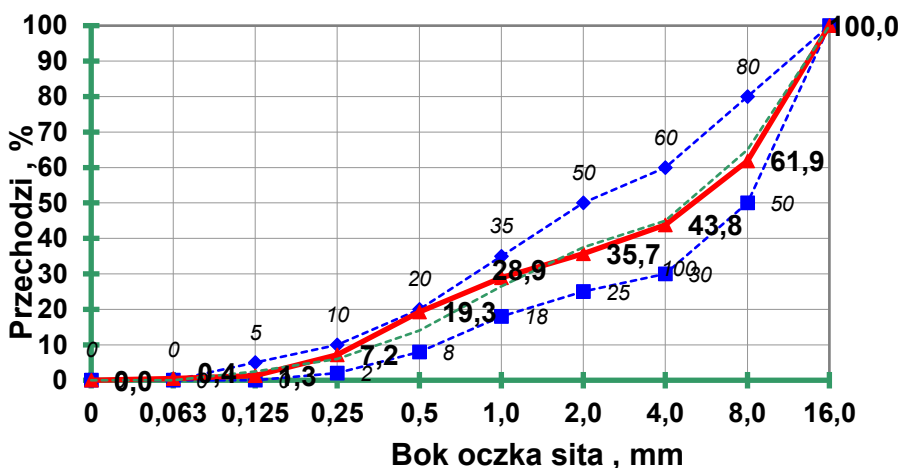
5.1.1 Wyniki badań analizy sitowej dla receptury podstawowej

Receptura podstawowa pod kątem doboru stosu okruszowego została wytypowana na kruszywach, które były łatwo dostępne, powtarzalne oraz przede wszystkim stosowane powszechnie do projektowania betonu wałowanego. Na podstawie doświadczeń ustalono odpowiedni stos okruszowy, który zapewnia przede wszystkim:

- Łatwe zagęszczenie
- Utrzymanie wilgotności mieszanki
- Wysoki punkt piaskowy, który nie wpływa na wytrzymałość betonu

- d. Odpowiednie „zamknięcie” warstwy nawierzchni – wygląd makroskopowy betonu

Badania rozpoczęto od weryfikacji stanu już wykonanych nawierzchni z betonu wałowanego. Wzięto pod uwagę przede wszystkim wygląd nawierzchni i przeanalizowano odpowiedni udział doboru składu kruszywowego. Brak zamkniętej struktury betonu wałowanego jest nie tylko nieestetyczny, ale również sprzyja jego degradacji z czasem. Przed wprowadzeniem zmian związanych z optymalizacją stosu okruszowego, stosowano poniższy układ kruszywowy [Rys. 42]:



Sępólno Wielkie			
0/2 mm	2/8 mm	8/16	SUMA
%	%	%	
37	23	40	100

Rys. 42. Wykres uziarnienia mieszanki kruszywa z Sępólno Wielkiego. Skład kruszywa to 37% frakcji 0/2 mm, 23% frakcji 2/8 mm oraz 40% frakcji 8/16 mm.

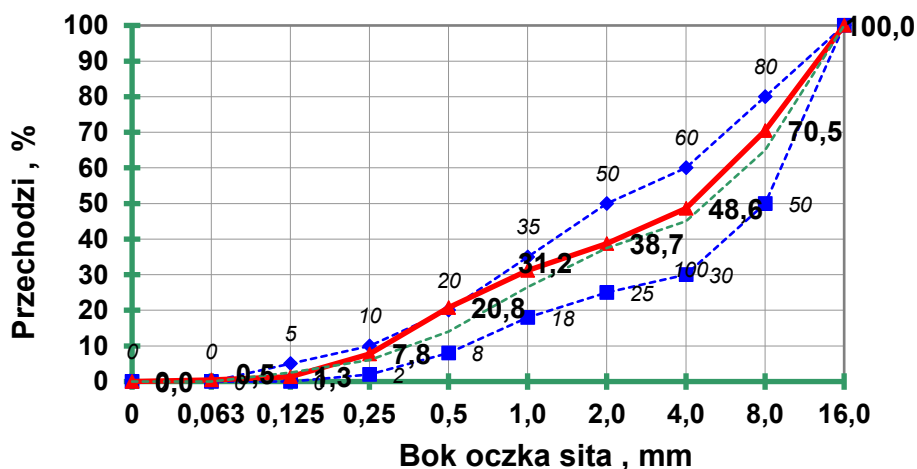
Krzywa projektowanego betonu mieści się w tolerancjach wzorcowych, a zawartość kruszyw zaprojektowano, aby uzyskać jak najwyższe wytrzymałości przy minimalnej zawartości cementu. Jak już poruszano w niniejszej pracy, stos kruszywowy musi zostać dobrany w taki sposób, aby zapewnić odpowiedni punkt piaskowy, od którego uzależniony jest również wygląd makroskopowy nawierzchni. Powyższy skład frakcyjny w warunkach budowy wygląda następująco [Rys. 39]:



Rys. 43. Wygląd drogi betonowej po roku użytkowania z nieprawidłowo dobranym stosem okruszowym. Zdjęcie autora.

Na podstawie doświadczeń z budów

oraz analizy kruszyw wykorzystywanych w betonie wałowanym, wyznaczono odpowiedni punkt piaskowy na poziomie ok 39% i zaprojektowano stos okruszowy [Rys. 44]:



Sępólno Wielkie			
0/2 mm	2/8 mm	8/16	SUMA
%	%	%	
40	30	30	100

Rys. 44. Wykres uziarnienia mieszanki kruszywa z Sępólna Wielkiego. Skład kruszywa to 40% frakcji 0/2 mm, 30% frakcji 2/8 mm oraz 30% frakcji 8/16 mm.

Na podstawie uzyskanych danych i wyciągniętych wniosków, sporządzono nową recepturę pod kątem prawidłowego doboru ilości składników. Celem tego jest możliwość łatwego układania i zagęszczania a dzięki odpowiedniej zawartości frakcji piaskowej mieszanka utrzymywała odpowiednią wilgotność do czasu zakończenia prac na budowie. Taki dobór kruszyw ma bezpośredni wpływ na wygląd zarówno mieszanki betonowej jak i stwardniałego betonu [Rys. 45, Rys. 46].



Rys. 45. Wygląd mieszanki betonowej podczas wbudowywania. Brak zjawiska „gniazd” kruszywa grubego oraz jednorodna struktura jeszcze przed wałowaniem mieszanki. Budowa na terenie Cementowni Kujawy firmy HOLCIM. Zdjęcie autora.



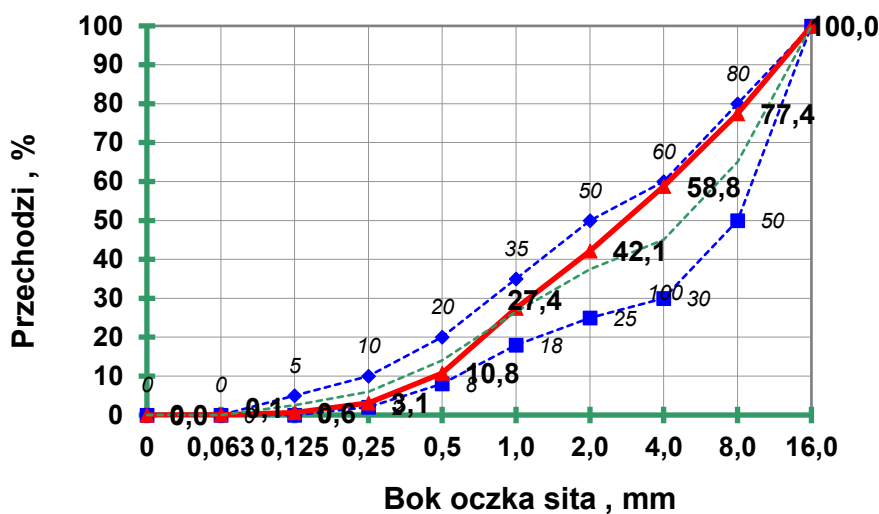
Rys. 46. Beton po stwardnieniu. Odpowiednia struktura, bez zjawiska „gniazd” kruszywa grubego oraz odpowiednio jednorodna, co widać na zdjęciu – m. in. Równomierny wygląd betonu bez zjawiska wyspowego przesychania. Budowa na terenie Cementowni Kujawy firmy HOLCIM. Zdjęcie autora.

Na podstawie weryfikacji wyglądu makroskopowego betonu wałowanego na budowie wytypowano recepturę, którą poddano dalszej analizie pod kątem odpowiedniego doboru wody w mieszance betonowej i sprawdzenia hipotezy badawczej niniejszej pracy, czyli wyznaczenia uniwersalnej metody zagęszczenia.

5.1.2 Wyniki badań analizy sitowej dla receptur pobocznych C30/37

W trakcie badań nad niniejszą pracą wprowadzano wiele projektów na budowach w firmie HOLCIM, gdzie sprawdzano nie tylko receptury pod kątem stosu okruszowego, ale również wpływ zagęszczenia na budowie. Między innymi stosowano receptury z uwzględnieniem innego kruszywa, niż wytypowane jako receptura podstawowa. Zastosowano

mieszanke kruszyw z Kopalni Łojewo dla betonu C30/37Ł o stosie okruchowym [Rys. 47]:



Kopalnia Łojewo			
0/2 mm	2/8 mm	8/16	SUMA
%	%	%	
32	38	30	100

Rys. 47. Wykres uziarnienia mieszanki kruszywa z Kopalni Łojewo. Skład kruszywa to 32% frakcji 0/2 mm, 38% frakcji 2/8 mm oraz 30% frakcji 8/16 mm.

Różnica względem receptury podstawowej jest zauważalna przede wszystkim na sicie #0,5 mm. Wygląd makrotekstury przedstawiał się zgodnie z [Rys. 48].



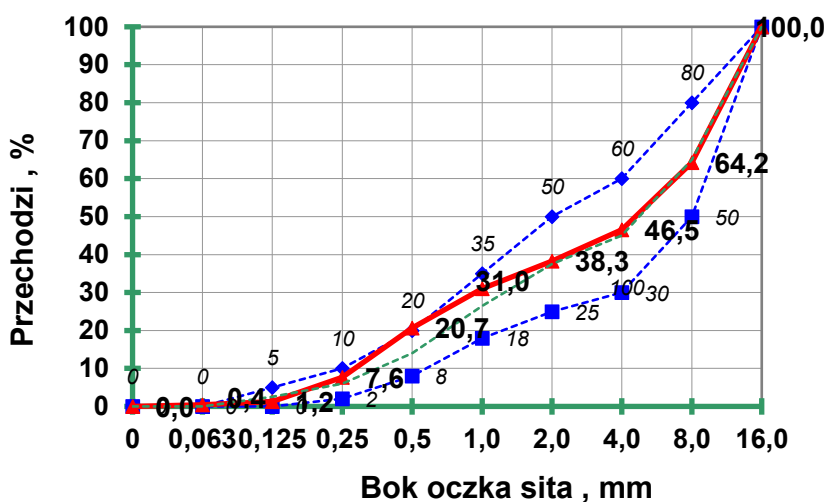
Rys. 48. Beton wałowany klasy C30/37Ł (załącznik 27) na kruszywie z Kopalni Łojewo. Dobór stosu okruschowego na podstawie punktu piaskowego. Budowa na terenie Kopalni Wapienno firmy HOLCIM. Zdjęcie autora.

W przypadku analizowanego [Rys. 48] doboru stosu okruschowego, trudność polegała na utrzymaniu właściwej wilgotności. Ze względu na małą zawartość frakcji do sita #0,5 mm wilgotność optymalna dla dobranego stosu okruschowego była niska, co przy warunkach atmosferycznych, sprzyjających szybkiemu przesychaniu nawierzchni może powodować błędy wykonawcze, a także trudności związane z pielęgnacją świeżej mieszanki betonowej. Utrzymanie odpowiedniej wilgotności świeżej mieszanki betonowej jest zdecydowanie trudniejsze mimo wysokiego punktu piaskowego. Co może sprawić negatywne skutki dla nawierzchni betonowej w przyszłości.

5.1.3 Wyniki badań analizy sitowej dla receptur pobocznych – Zastosowanie kruszyw z recyklingu

W związku z galopującym trendem obniżania śladu węglowego, a co za tym idzie, zastosowaniem kruszyw z recyklingu w betonach, sporządzono i sprawdzono receptury z wykorzystaniem kruszywa Aggneo (załącznik 28), czyli frakcji 2/16 pochodzącej z kruszyw recyklingowych.

Recepturę tożsamą z recepturą podstawową sporządzono tak, aby zapewnić podobny poziom punktu piaskowego, który stanowi o prawidłowej makroteksturze [Rys. 48] docelowej warstwy betonowej. Przede wszystkim należało poznać wpływ kruszyw z recyklingu na właściwości trwałościowe betonu, dlatego receptury te sprawdzono pod kątem wytrzymałości we właściwym zagęszczaniu mieszanki betonowej zgodnie z metodą Proctora [95] oraz autorską metodą opracowywaną w niniejszej pracy. Wykres uziarnienia przedstawia się następująco [Rys. 49]:



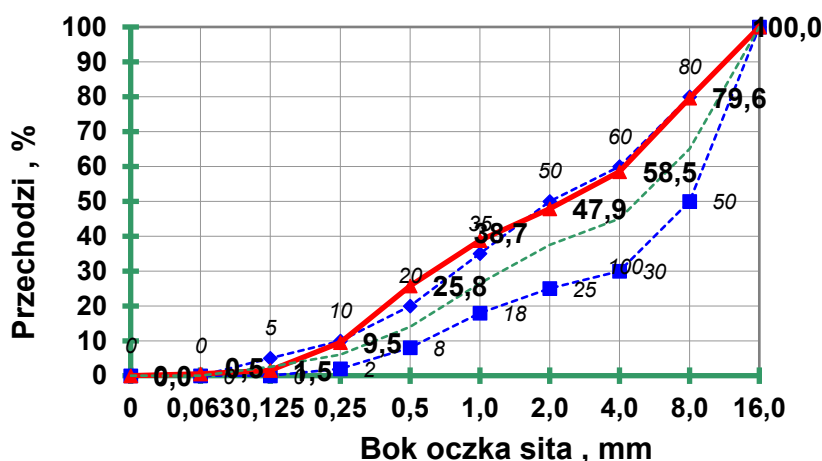
Sępolno Wielkie			Aggneo	SUMA
0/2 mm	2/8 mm	8/16	2/16 mm	
%	%	%	[g]	
40	20	20	20	100

Rys 49. Wykorzystanie kruszyw z recyklingu w mieszance betonowej z jednoczesnym uwzględnieniem punktu piaskowego odnośnie receptury bazowej – 38,7% vs 38,3%.

5.1.4 Wyniki badań analizy sitowej dla receptur pobocznych – betony niskich klas C8/10 i C12/15

Weryfikacja metody zagęszczenia polegała również na sprawdzeniu receptur betonów niższych klas w celu potwierdzenia jej uniwersalności. Betony klasy C8/10 (załącznik nr 29), czy C12/15 (załącznik nr 30) mogą zawierać większą ilość piasku, czyli frakcji 0/2 mm, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie wartości punktu piaskowego. Weryfikacja miała na celu sprawdzenie metody zagęszczania.

Najważniejszym w doborze stosu okruszowego jest zapewnienie ciągłości uziarnienia. Dla krzywej 0/16 mm wiadomym jest, że wskaźnik różnoziarnistości oraz krzywizny uziarnienia będą na odpowiednim poziomie. Betony niskich klas w konsystencji V0 są zagęszczane w warunkach budowy metodą wałowania, dlatego też podlegają również pod możliwość zastosowania uniwersalnej metody zagęszczania opracowanej w niniejszej pracy doktorskiej. Wykres uziarnienia wraz z proporcją doboru ilości kruszyw przedstawia się następująco [Rys. 50]:

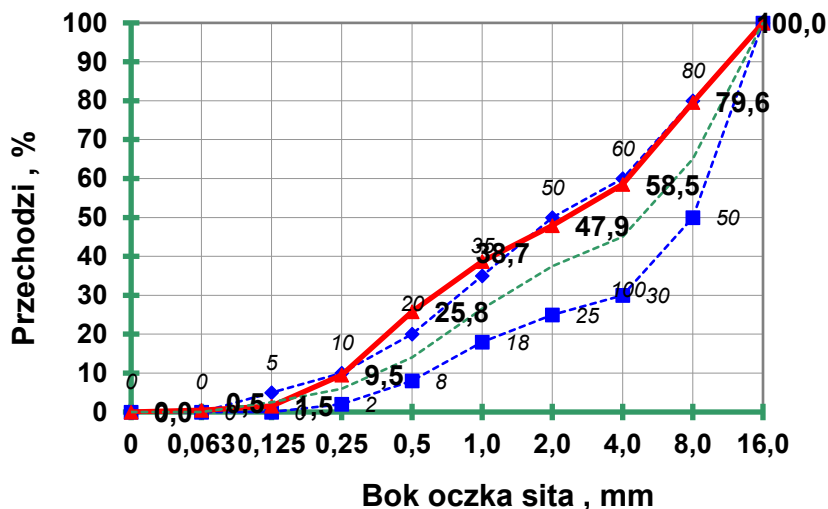


Sępolno Wielkie			
0/2 mm	2/8 mm	8/16	SUMA
%	%	%	
50	30	20	100

Rys. 50. Wysoki punkt piaskowy na poziomie 47,9 % pozwala na uzyskanie prawidłowej makrotekstury. Krzywa wzorcowa zapewniająca ciągłość uziarnienia stanowi o łatwym wbudowaniu i zagęszczeniu materiału.

W przypadku receptury dla betonu C12/15 dobór stosu okruszowego był taki sam jak dla C8/10, natomiast sama receptura różniła się ilością cementu, co miało na celu osiągnięcie wyższych wyników wytrzymałości. Weryfikacja miała na celu sprawdzenie wpływu różnego dodatku cementu na uniwersalność metody zagęszczania. Minimalna wartość wskaźnika różnoziarnistości została wyznaczona dla uzyskania

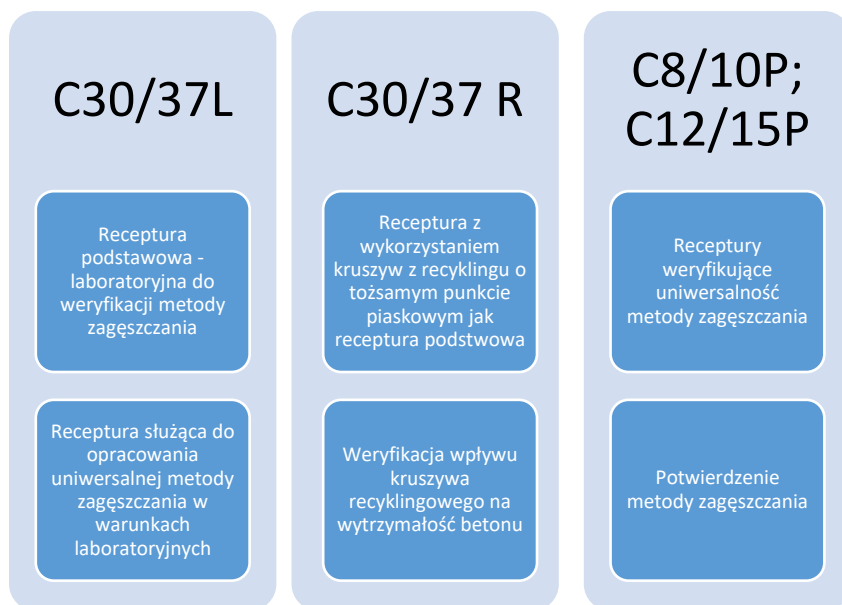
najbardziej optymalnej wizualnej struktury makroskopowej nawierzchni z betonu wałowanego. Im wyższy wskaźnik zagęszczenia, tym struktura betonu staje się bardziej „zamknięta” pod kątem doboru stosu okruskowego. Natomiast czynnikiem determinującym wartość wskaźnika piaskowego jest wytrzymałość samego betonu. Dla betonu klasy C12/15 wykres uziarnienia wraz z doбором stosu okruskowego przedstawiał się następująco [Rys. 51]:



Sępolno Wielkie			
0/2 mm	2/8 mm	8/16	SUMA
%	%	%	
50	30	20	100

Rys. 51. Wykres uziarnienia dla betonu C12/15. Tożsamy również jak dla betonu C8/10 zgodnie z Rys. 46. Wysoki wskaźnik piaskowy na poziomie 47,9% pozwala na osiągnięcie prawidłowej makrotekstury podczas wbudowywania betonu przy zachowaniu jego właściwości trwałościowych.

W celu dalszej analizy odpowiedniego składu kruszywowego danych mieszanek betonowych należy posłużyć się systematyką doboru odpowiednich nazw receptur wykorzystywanych do badań wilgotności optymalnej mieszanki betonowej oraz przedstawienia wyników wytrzymałości. W tym celu ustalono nazwy receptur do dalszego przedstawienia wyników zgodnie z [Rys. 52]:



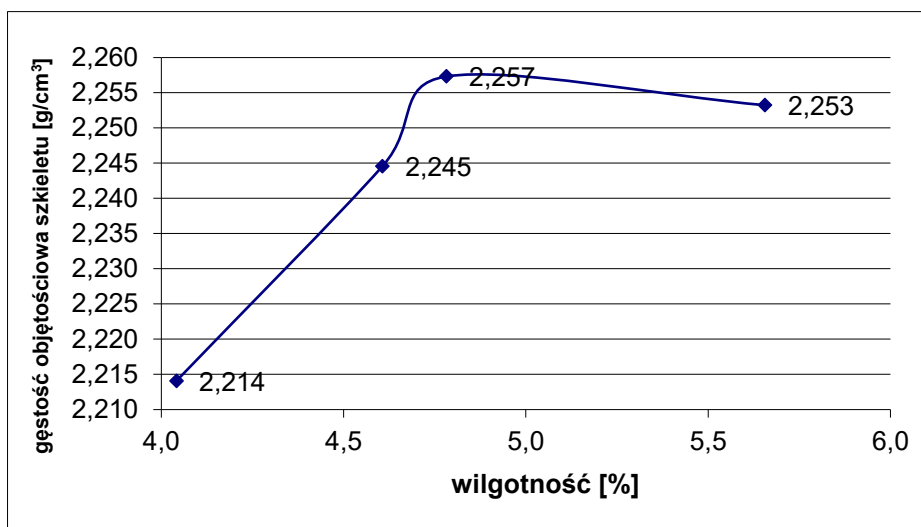
Rys. 52. Zestawienie nazw receptur i postępowania w dalszych badaniach laboratoryjnych.

5.2 Wyniki badań wilgotności optymalnej

Badanie wilgotności optymalnej mieszanki betonowej służy do określenia ilości wody w mieszance betonowej, czyli wyznaczenia wilgotności optymalnej wg PN-EN 13286-2 [94]. Bez odpowiedniej ilości wody w mieszance nie ma możliwości zagęszczenia danego materiału do wartości 100% dostarczając prawidłową ilość energii zgodnie ze wzorem [13] oraz procedurą z punktu 4.2.1.

5.2.1 Wyniki badań wilgotności optymalnej dla receptury C30/37 L

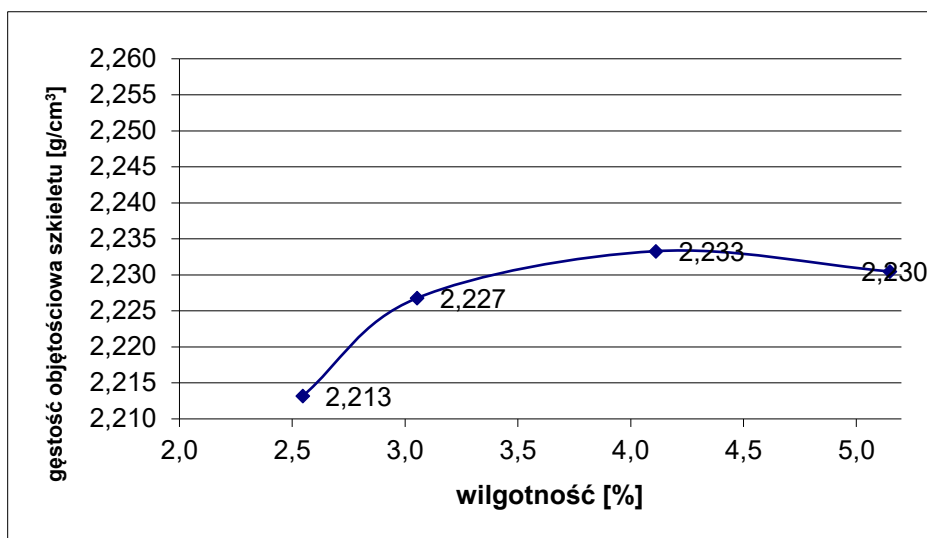
Badanie Proctora przeprowadzono wg procedury z punktu 4.2.1., co zdeterminowało wykonywanie próbek w późniejszych badaniach. Na różnych etapach pracy doktorskiej powtarzano procedurę w celu potwierdzenia wilgotności optymalnej W_{opt} . Wyniki badań dla receptury podstawowej dla betonu C30/37 wskazała następujące wartości [Wykres. 1]:



Wykres 1. Wilgotność optymalna (4,8%) i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu (2,257 g/cm³) dla receptury C30/37L

Wilgotność optymalna wynosi 4,8% dla receptury C30/37L. Jest to ilość wody, która wskazuje na maksymalne zagęszczenie mieszanki betonowej w jednostce objętości. Badanie zostało przeprowadzone w sposób bardzo dokładny, aby idealnie wyznaczyć zawartość wody. Niewielki dodatek wody powoduje uplastycznienie się mieszanki betonowej i spadek gęstości objętościowej szkieletu.

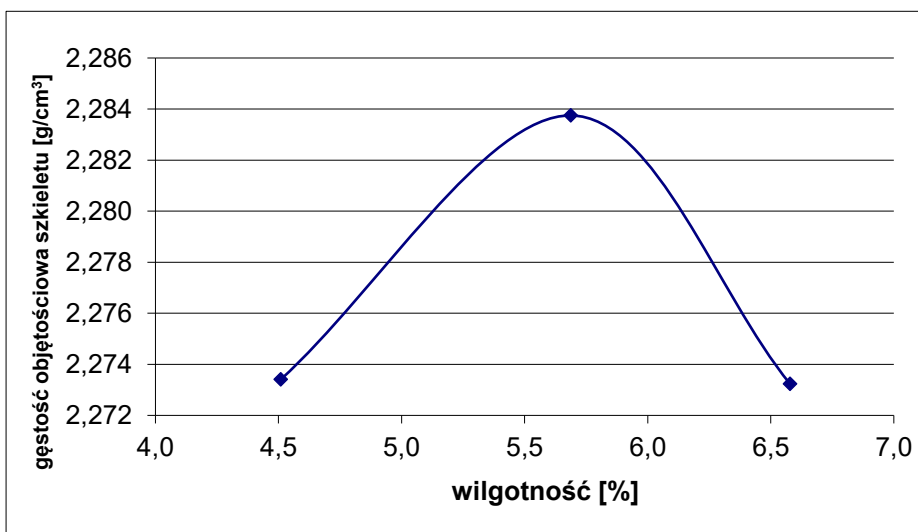
Procedura badania wilgotności została wyznaczona również dla receptury C30/37 z użyciem materiałów z Sępólna Wielkiego sprzed modyfikacji składu pod kątem makrotekstury betonu [Wykres 2].



Wykres 2. Wilgotność optymalna (4,1%) i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu (2,233 g/cm³) dla receptury C30/37L sprzed optymalizacji pod kątem makrotekstury

5.2.2 Wyniki badań wilgotności optymalnej dla receptury C30/37 R

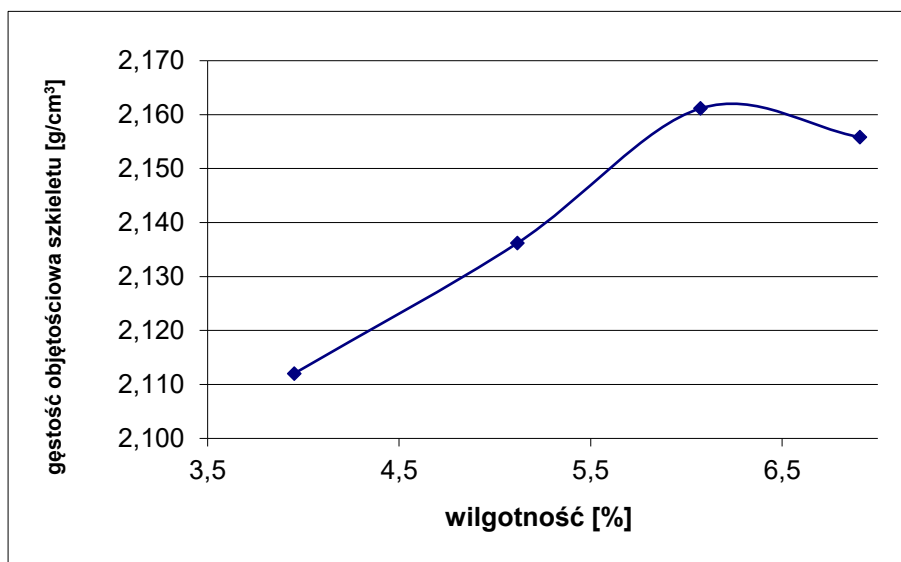
W celu ujednolicenia badań i potraktowania każdej receptury w ten sam sposób, wyznaczono również wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową dla receptury z dodatkiem kruszywa recyklingowego [Wykres 3].



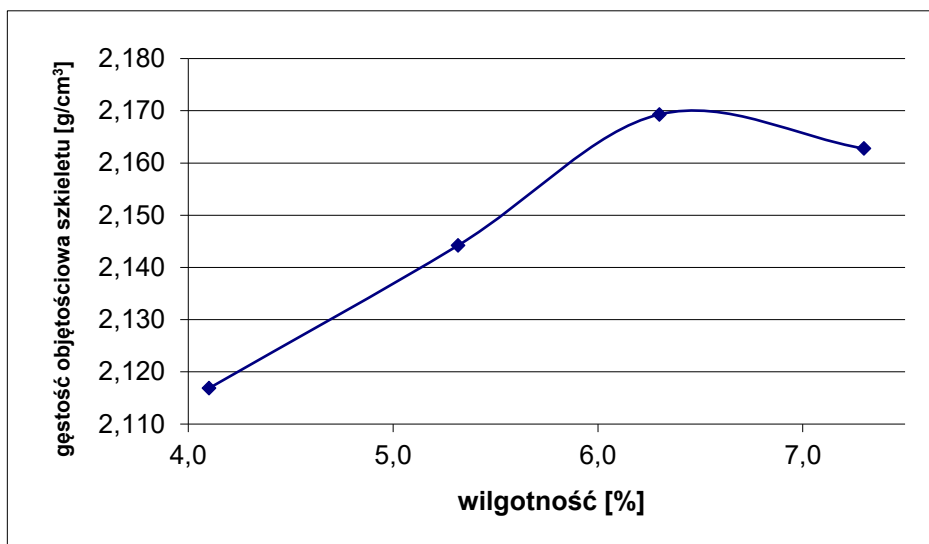
Wykres. 3. Wilgotność optymalna (5,7%) i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu (2,284 g/cm³) dla receptury C30/37R

5.2.3 Wyniki badań wilgotności optymalnej dla receptur pomocniczych C8/10 oraz C12/15

Dla receptur pomocniczych wyznaczono wilgotność optymalną w celu dobrania odpowiedniej ilości wody i w rzetelny sposób sprawdzić metodę zagęszczania [Wykres 4, Wykres 5].



Wykres. 4. Wilgotność optymalna (6,1%) i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu (2,161 g/cm³) dla receptury C8/10



Wykres. 5. Wilgotność optymalna (6,3%) i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu (2,169 g/cm³) dla receptury C12/15

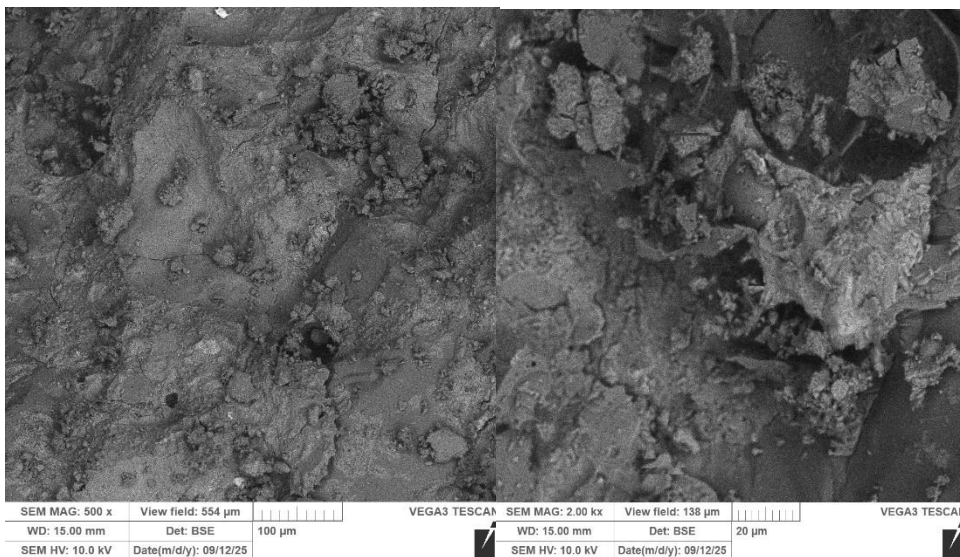
Zebrano wyniki uzyskanych wilgotności optymalnych i gęstości objętościowej szkieletu kruszowo-cementowego dla poszczególnych receptur [Tab. 5]. Na podstawie dokładnego zbadania ilości wody w mieszance betonowej, wykonano próbki w celu zweryfikowania metody zagęszczania w dalszych etapach pracy doktorskiej.

Tab. 5. Podsumowanie wyników wilgotności optymalnej oraz maksymalnej wartości Gęstości objętościowej szkieletu dla poszczególnych receptur.

Nr receptury	Wilgotność optymalna W_{opt} [%]	Gęstość obj. Szkieletu [g/cm ³]
C30/37	4,1	2,233
C30/37L	4,8	2,257
C30/37R	5,7	2,284
C8/10	6,1	2,161
C12/15	6,3	2,169

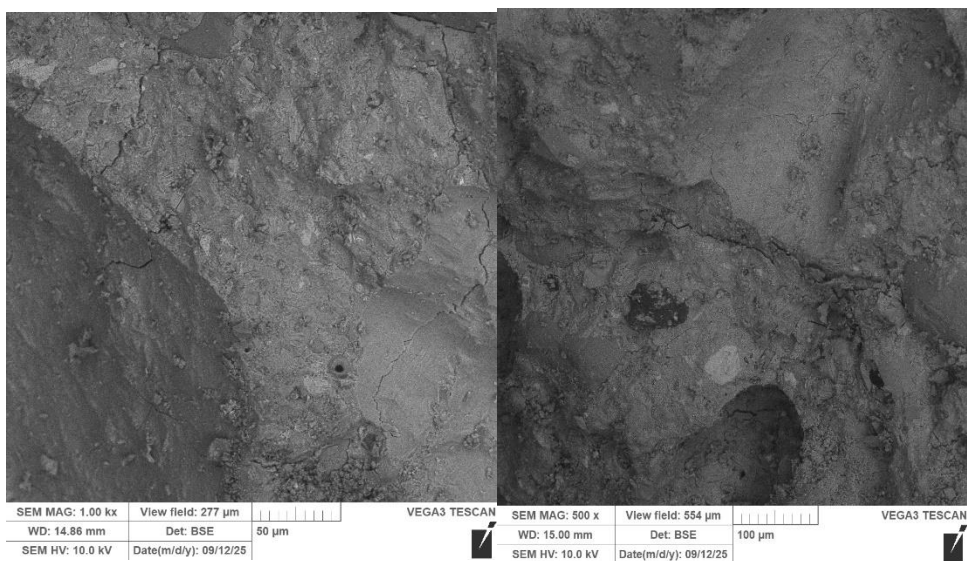
5.3. Wyniki badań obserwacji mikroskopowych

W przypadku badań mikroskopowych przedstawiono zdjęcia na podstawie receptury C30/37L, czyli tej wytypowanej do określenia autorskiej metody zagęszczenia. Wyniki badań przedstawiono w postaci obserwacji zdjęć struktury po przełomie. Obrazy są z przełomu warstwy, a nie z cięcia struktury, które mogłoby zaburzać pole widoku. W celu przedstawienia jak najbardziej dokładnych obserwacji posłużono się mikroskopem elektronowym Vega 3 oraz mikroskopem do badania struktury petrograficznej KEYENCE VHX-X1F. Obserwacje podzielono zgodnie z metodą zagęszczania próbek. Widok dla próbek przygotowywanych metodą Proctora przedstawiono na Rys. 53.

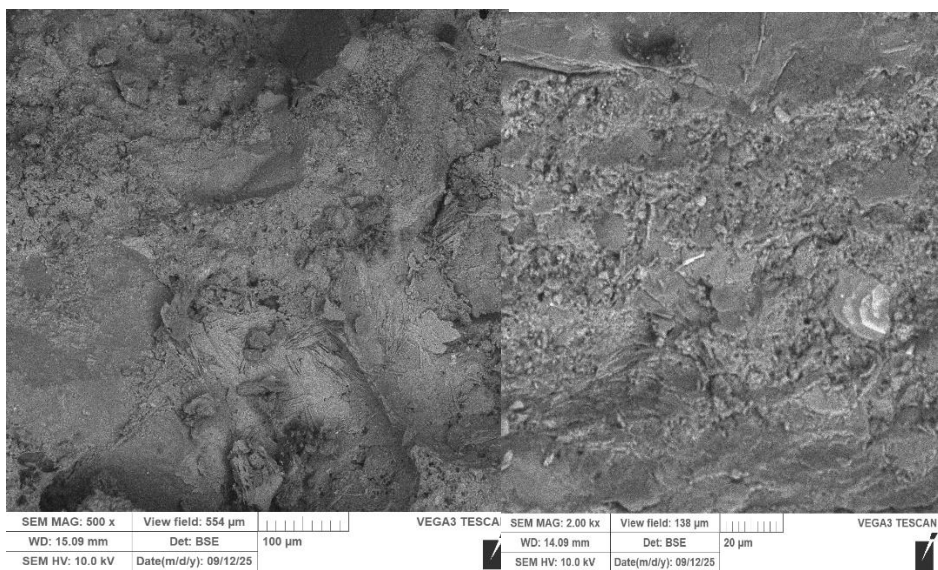


Rys. 53. Obrazy mikroskopowe Vega 3 dla metody zagęszczania wg Proctora. Zdjęcia autora.

Metoda zagęszczania ręczna oraz metoda autorska została przedstawiona na rys. 54-55.



Rys. 54. Widok struktury mikroskopowej dla zagęszczenia młotem wibracyjnym metodą ręczną. Zdjęcie autora.



Rys. 55. Widok struktury mikroskopowej dla zagęszczenia młotem wibracyjnym autorską metodą zagęszczenia na statywie. Zdjęcie autora.

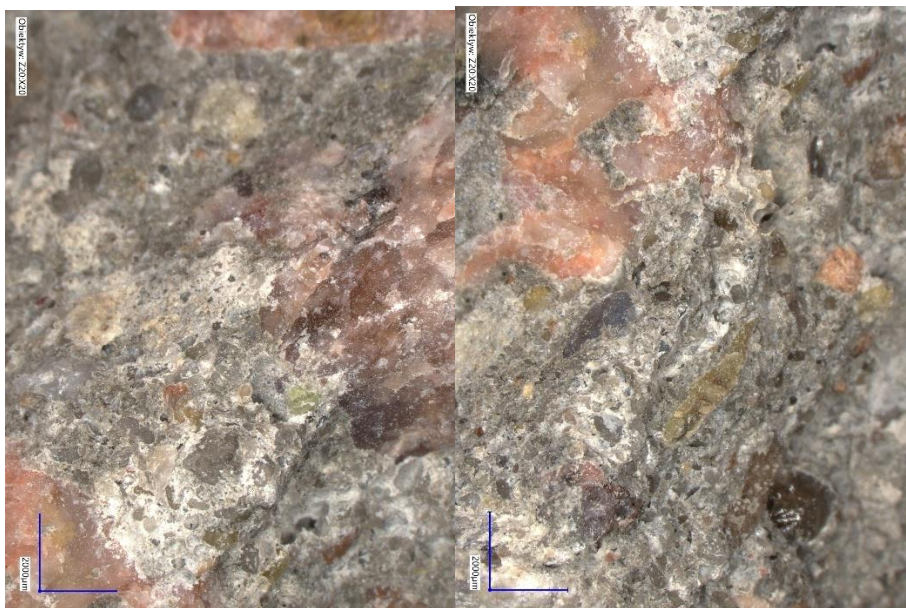
Poza obserwacją struktury za pomocą mikroskopu elektronowego, wykonano również analizy struktury petrograficznej dla tej samej receptury C30/37L. Celem była obserwacja obłóci ziaren i ich struktury i określenie różnic w metodzie zagęszczania próbek. Do badań użyto mikroskopu KEYENCE VHX-X1F dla odłamanych fragmentów betonu, aby nie zaburzyć struktury i odzwierciedlić realny obraz [Rys. 56-58].



Rys. 56. Widok struktury betonu zagęszczonego metodą Proctora. Zdjęcie autora.



Rys. 57. Widok struktury betonu zagęszczanego metodą ręczną. Zdjęcie autora.



Rys. 58. Widok struktury betonu zagęszczanego metodą autorską. Zdjęcie autora.

5.4. Wyniki badań wytrzymałości w odniesieniu do metody zagęszczenia

W celu zapewnienia takich samych warunków do opracowania autorskiej metody zagęszczenia zastosowano recepturę podstawową C30/37L do porównania metod zagęszczenia. Inne receptury wprowadzono podczas wykonywania badań, aby porównać metody zagęszczenia i wyciągnąć wnioski, czy też w późniejszym etapie porównać wpływ materiałów na wyniki wytrzymałości, jak dla kruszyw z recyklingu w betonie. Zagęszczanie próbek weryfikowano w kilku etapach, a dla każdego z nich przygotowywano próbki do badania w ilości 3 sztuki po 7 dniach dojrzewania i 3 sztuki po 28 dniach dojrzewania.

W pierwszym etapie sprawdzono, czy zagęszczanie metodą Proctora betonu wałowanego, czyli w wilgotności optymalnej pozwala na uzyskanie prawidłowych, powtarzalnych wyników. W tym celu prowadzono badania w formach walcowych o wymiarach 120x150 mm (hxd). Zgodnie z literaturą [70] stwierdzono również, że na wynik nie ma wpływu rodzaj form w stosunku do tradycyjnych form sześciennych, natomiast duże formy walcowe najlepiej odzwierciedlają uzyskane wyniki. Uzyskano następujące wyniki dla receptury C30/37L w wilgotności optymalnej, wynoszącej 4,8%. [Tab. 6].

Tab. 6. Wyniki wytrzymałości próbek przygotowywanych metodą Proctora dla receptury C30/37L. Wykonano 60 próbek.

Lp.	Gęstość R7 [kg/m ³]	Średni wynik wytrzymałości R7 [MPa]	Gęstość R28 [kg/m ³]	Średni wynik wytrzymałości R28 [MPa]
1	2,387	42,5	2,396	49,1
2	2,416	46,5	2,403	49,8
3	2,411	43,5	2,424	51,0
4	2,409	45,1	2,417	49,6
5	2,413	41,2	2,420	48,9
6	2,408	42,1	2,429	52,6
7	2,419	39,2	2,452	50,9
8	2,397	40,1	2,451	48,9
9	2,415	42,3	2,454	49,4
10	2,406	43,4	2,451	50,5

W celu sprawdzenia wpływu ilości wody na zagęszczanie, przygotowano próbki dla wilgotności niższej niż optymalna o 0,8% i wyższej niż optymalna o 0,5% dla receptury C30/38L [Tab.7]. Zmienność wilgotności uzależniono od możliwych zmiennych w parametrach wytrzymałości. Przyjmuje się wilgotność optymalną w zakresie -2% i +1% dla gruntów [109]. Dla mieszanki betonowej to założenie nie jest weryfikowalne ze względu na różne metody zagęszczania próbek. Istnieje zależność między wilgotnością mieszanki betonowej a metodą zagęszczania, co ma istotny wpływ na końcowy wynik wytrzymałości.

Tab. 7. Wyniki wytrzymałości próbek przygotowywanych metodą Proctora dla receptury C30/37L przy wyższej i niższej wilgotności. Wykonano 24 próbki.

Wilgotność [%]	Lp.	Gęstość R7 [kg/m ³]	Średni wynik wytrzymałość i R7 [MPa]	Gęstość R28 [kg/m ³]	Średni wynik wytrzymałość i R28 [MPa]
5,3	1	2,407	33,1	2,421	39,5
4,3	2	2,373	37,8	2,416	46,4
5,3	3	2,409	31,1	2,426	40,5
4,3	4	2,383	41,5	2,405	44,5

Podczas sporządzania próbek zawierających kruszywo z recyklingu przygotowano próbki metodą Proctora dla receptury C30/37R przy wilgotności optymalnej wynoszącej 5,7%. Wyniki wytrzymałości przedstawiają się następująco [Tab. 8]:

Tab. 8. Wyniki wytrzymałości próbek przygotowywanych metodą Proctora dla receptury C30/37R. Wykonano 18 próbek.

Lp.	Gęstość R7 [kg/m ³]	Średni wynik wytrzymałości R7 [MPa]	Gęstość R28 [kg/m ³]	Średni wynik wytrzymałości R28 [MPa]
1	2,306	23,1	2,347	35,6
2	2,316	24,5	2,353	37,3
3	2,315	22,4	2,347	36,9

Wnioskując, można stwierdzić, że gęstość próbek dla mieszanki kruszywa bez dodatku recyklingu jest nieco wyższa – na poziomie ok 2,420 g/cm³. Spadek wytrzymałości dla próbek z dodatkiem kruszyw przetworzonych wynika z ich pochodzenia oraz właściwości fizycznych.

Warto zwrócić uwagę, że gęstość próbek jest ściśle zależna od wytrzymałości dla próbek przygotowywanych wg metody Proctora.

W kolejnym etapie weryfikowania metody zagęszczenia, zastosowano formowanie próbek w sposób powszechny, który stosuje się w laboratoriach i na budowach, czyli zagęszczanie ręczne młotem wibracyjnym. Uzyskano następujące wyniki wytrzymałości w przypadku zagęszczania próbek przez jedną osobę na przestrzeni czasu dla jednej receptury przy wilgotności optymalnej dla receptury C30/37L [Tab. 9]. Amplituda ustawień młota wibracyjnego to 2870 uderzeń/min.

Tab. 9. Wyniki wytrzymałości próbek przygotowywanych ręcznie za pomocą młota wibracyjnego dla receptury C30/37L. Wykonano 96 próbek.

Lp.	Gęstość R7 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R7 [MPa]	Gęstość R28 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R28 [MPa]
1	2,388	33,4	2,376	50,2
2	2,320	33,8	2,338	42,5
3	2,414	42,0	2,410	48,1
4	2,328	37,9	2,353	43,4
5	2,357	42,1	2,354	52,0
6	2,351	43,3	2,353	44,8
7	2,334	39,3	2,367	45,5
8	2,306	32,3	2,328	39,6
9	2,339	39,3	2,351	44,4
10	2,365	41,2	2,397	54,4
11	2,343	37,7	2,370	49,9
12	2,333	35,6	2,358	41,0
13	2,308	31,1	2,331	39,9
14	2,345	28,6	2,300	32,1
15	2,399	44,4	2,429	53,2
16	2,340	39,3	2,371	49,4

Poszerzono doświadczenie o wykonanie próbek przez różne osoby przy zachowaniu wilgotności optymalnej i zastosowaniu receptury C30/37L. Zwracając uwagę na wyniki gęstości Wyniki wytrzymałości przedstawiają się następująco [Tab. 10]:

Tab. 10. Wyniki wytrzymałości próbek przygotowywanych ręcznie przez cztery różne osoby za pomocą młota wibracyjnego dla receptury C30/37L. Wykonano 24 próbki.

Lp.	Gęstość R7 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R7 [MPa]	Gęstość R28 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R28 [MPa]
1	2,399	48,1	2,399	54,6
2	2,362	38,8	2,359	46,6
3	2,281	30,1	2,347	42,4
4	2,291	30,5	2,320	36,9

W następnym etapie wykonano próbki autorską metodą opracowaną w niniejszej rozprawie – metodą autorską. Wykluczono wpływ czynnika ludzkiego w przygotowaniu próbek, czyli zbliżono się do powtarzalności wg metody Proctora. Czynniki ludzkie wyeliminowano dzięki specjalnej konstrukcji statywu [Rys. 35], w który umieszcza się formę i mocuje młot wibracyjny. Trudność polegała na:

- Dobranie odpowiedniego obciążenia do statywu
- Dobranie odpowiedniego czasu zagęszczania
- Określenia amplitudy drgań młota wibracyjnego
- Dobranie ilości warstw dla próbki

Wszystkie te aspekty sprawdzono na podstawie tzw. metody prób i błędów. Porównywano poszczególne zależności między sobą i na podstawie otrzymanych wyników wykluczano lub powtarzano kolejne kroki aż do osiągnięcia oczekiwanych rezultatów. Następnie potwierdzono uzyskany dobór odpowiednich ustawień poprzez wykonanie serii próbek w różnych odstępach czasu i weryfikację na innych recepturach w celu potwierdzenia uniwersalności autorskiej metody formowania. Podstawową zależnością było porównanie wyników autorskiej metody z metodą Proctora, która zapewnia powtarzalność i pewność zagęszczenia próbek do 100%, czyli maksymalnego upakowania materiału w jednostce objętości przy wilgotności optymalnej. Innowacyjność autorskiej metody polega również na skróceniu przygotowania próbek – czas potrzebny do zagęszczenia 6 próbek przez jedną osobę to około 20 minut. W przypadku metody Proctora jest to czas od 40 do 80 minut, w zależności, czy próbki są przygotowywane na automatycznym aparacie Proctora, czy ręcznie.

Należało zweryfikować wartości wytrzymałości na ściskanie, które uznaje się za prawidłowe. Odniesiono się zatem do wyników wytrzymałości z próbek przygotowanych metodą Proctora, ponieważ wyniki te były powtarzalne, przy wysokiej gęstości i energii zagęszczania, która pozwala na zagęszczenie do wskaźnika $I_s \geq 1,00$. Po otrzymaniu odpowiednich wartości z próbek przygotowanych zgodnie z określoną energią zagęszczania [95], uznano, że dobrane parametry i ustawienia statywu są prawidłowe. Wyniki dla różnych ustawień czasu i dobranego obciążenia do zestawu ze statywem przedstawiają się następująco [Tab. 11]:

Tab. 11 Wyniki badań wytrzymałości przy różnych wariantach obciążenia statywu i czasu zagęszczania przy formowaniu próbek w 2 warstwach. Wykonano łącznie 54 próbki dla receptury C30/37L.

Lp.	Opis	Gęstość R7 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R7 [MPa]	Gęstość R28 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R28 [MPa]
1	2 kg/15 s	2,308	19,4	2,318	27,7
2	3 kg/15 s	2,315	26,6	2,327	35,5
3	3 kg/20 s	2,320	36,0	2,368	43,2
4	2,5 kg 20s	2,354	41,5	2,312	41,5
5	2,5 kg/20s	2,351	35,1	2,349	42,5
6	3 kg/20 s	2,355	43,0	2,368	46,7
7	3 kg/20 s	2,335	41,2	2,334	46,1
8	5kg 20 s	2,216	31,4	2,242	38,2
9	5 kg/20 s	2,328	33,2	2,345	42,8

Był to najważniejszy etap doboru ustawień, ponieważ od niego zależały kwestie związane z kolejnymi optymalizacjami ustawień, aby uzyskać prawidłowe wyniki. Na podstawie otrzymanych wartości dobrano 4 kg obciążenia do statywu i ustalono czas zagęszczania na 20 sekund dla każdej z dwóch warstw. Opisanie tego etapu badań i określenia odpowiednich parametrów dla stanowiska badawczego świadczy o oryginalności autorskiej metody zagęszczania i podkreśleniu wkładu w rozwój wdrożenia niniejszej pracy w firmie HOLCIM. Wyniki przedstawiały się następująco [Tab.12]:

Tab. 12. Wyniki badań wytrzymałości przy stałym obciążeniu statywu – 4 kg i czasie 20 sekund zagęszczania dla każdej z dwóch warstw - formowanie przy wilgotności optymalnej. Wykonano łącznie 96 próbek dla receptury C30/37L

Lp.	Opis	Gęstość R7 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R7 [MPa]	Gęstość R28 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R28 [MPa]
1	4 kg/20s	2,368	38,0	2,353	45,0
2	4 kg/20s	2,329	35,0	2,375	47,2
3	4 kg/20s	2,365	43,3	2,382	46,6
4	4 kg/20s	2,364	40,5	2,380	48,0
5	4 kg/20s	2,339	37,9	2,356	44,7
6	4 kg/20s	2,341	37,2	2,370	51,5
7	4 kg/20s	2,331	38,4	2,380	48,5
8	4 kg/20s	2,334	36,7	2,368	53,3
9	4 kg/20s	2,337	38,8	2,369	50,4
10	4 kg/20s	2,354	40,3	2,379	49,9
11	4 kg/20s	2,338	39,5	2,354	48,5
12	4 kg/20s	2,331	38,5	2,351	47,9
13	4 kg/20s	2,321	37,7	2,341	49,8
14	4 kg/20s	2,318	36,8	2,342	46,8
15	4 kg/20s	2,344	41,2	2,375	52,2
16	4 kg/20s	2,357	42,3	2,381	50,6

Zgodnie z hipotezą badawczą należało również sprawdzić wpływ wilgotności mieszanki betonowej na zagęszczenie. Zmienność wilgotności mieszanki betonowej obserwuje się często w warunkach budowy. Należało sprawdzić wpływ zawartości wody na zagęszczenie próbek oraz wytrzymałości na ściskanie. Dzięki określeniu parametrów stanowiska do zagęszczeń autorskiej metody, wykluczono inne zmienne poza wartością wilgotności. Określono wpływ wody na wytrzymałość na ściskanie dla próbek formowanych z obciążeniem 4 kg oraz czasem 20 sekund w 2 warstwach zagęszczania z różną wilgotnością, odbiegającą od wilgotności optymalnej o odpowiednie wartości. Wilgotność optymalną dla receptury C30/37L określono na 4,8%. Wartości dodatnie lub ujemne wskazują na odchyłki od wartości docelowej. [Tab. 13].

Tab. 13. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie przy stałym obciążeniu statywu – 4 kg i czasie 20 sekund zagęszczania dla każdej warstwy – formowanie próbek w 2 warstwach przy wilgotności różnej od optymalnej zgodnie z poniższym. Wykonano łącznie 60 próbek dla receptury C30/37L

Lp.	Opis	Gęstość R7 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R7 [MPa]	Gęstość R28 [g/cm ³]	Średni wynik wytrzymałości R28 [MPa]
1	+0,5%	2,373	44,5	2,399	48,6
2	+0,8%	2,361	43,3	2,372	49,0
3	+0,8%	2,380	42,1	2,397	50,1
4	+0,6%	2,367	46,4	2,407	51,8
5	+0,8%	2,351	42,9	2,396	48,2
6	-0,8%	2,320	33,8	2,329	42,7
7	-0,8%	2,306	30,2	2,326	42,9
8	-1,0%	2,195	29,9	2,205	37,5
9	-1,0%	2,229	26,2	2,257	28,5
10	-0,8%	2,329	36,1	2,309	36,7

Dodatkowo, zweryfikowano wpływ amplitudy uderów na młocie wibracyjnym w stosunku do możliwości uzyskania odpowiedniego zagęszczenia. Sprawdzono ustawienia amplitudy uderów na poziomie ½ i 1/3 uderów/min od ustawień maksymalnych. Przygotowano próbki w wilgotności optymalnej. Wyniki wytrzymałości zgodnie z Tab. 14:

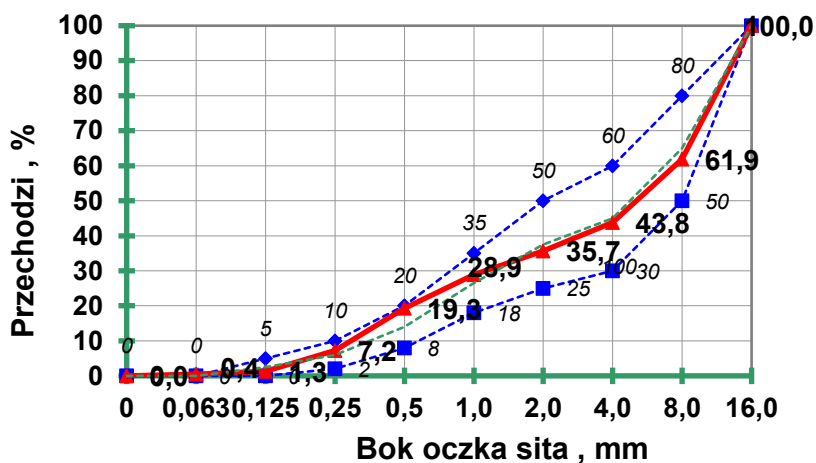
Tab. 14. Wyniki badań wytrzymałości przy zmiennej amplitudzie uderów młota oraz w różnych wariantach czasu zagęszczania i ilości warstw przy wilgotności optymalnej dla receptury C30/37L – wykonano łącznie 42 próbki.

Lp.	Ilość uderów młota	Opis	Gęstość R7 [g/cm ³]	Średni wynik wytrz. R7 [MPa]	Gęstość R28 [g/cm ³]	Średni wynik wytrz. R28 [MPa]
1	1435 uderzeń/min	4 kg/20 s, 2 warstwy	2,301	32,1	2,321	37,3
2	2153 uderzeń/min	4 kg/20 s, 2 warstwy	2,325	36,6	2,341	42,3
3	2870 uderzeń/min	4kg/30 s, 2 warstwy	2,335	41,1	2,349	49,9
4	2870 uderzeń/min	4kg/30 s, 2 warstwy	2,333	40,0	2,354	51,2
5	2870 uderzeń/min	4 kg/20s 3 warstwy	2,321	41,1	2,343	48,8
6	2870 uderzeń/min	4 kg/20s 3 warstwy	2,314	43,3	2,340	50,3
7	2870 uderzeń/min	4 kg/20s 3 warstwy	2,314	42,1	2,342	49,3

6. Dyskusja wyników

6.1 Omówienie wyników analizy sitowej mieszanki betonowej i wilgotności optymalnej mieszanki

Wyniki badań analizy sitowej zostały zweryfikowane na podstawie doświadczeń budowy. Przede wszystkim analizowano strukturę makroskopową oraz mikroskopową. Na podstawie analizy sitowej wykazano, że punkt piaskowy ma istotny wpływ na wygląd i strukturę betonu już wbudowanego technologią wałowania. Z kolei zawartość części drobnych, tj. na sitach 0,25 mm i 0,5 mm ma bezpośredni wpływ na wilgotność optymalną danej mieszanki betonowej. Na podstawie otrzymanych wyników wykazano, że punkt piaskowy powinien znajdować się powyżej wartości 38%, aby uzyskać prawidłową makrostrukturę na budowie. Wyższe wartości wskaźnika piaskowego powinny zostać przyjęte dla niższych klas projektowanego betonu. Uwzględniono wpływ zawartości wody w stosunku do stosu okruszowego. W przypadku jak poniżej [Rys. 60]



Rys 60. Wykres uziarnienia mieszanki kruszywa z Sępólna Wielkiego. Skład kruszywa to 37% frakcji 0/2 mm, 23% frakcji 2/8 mm oraz 40% frakcji 8/16 mm.

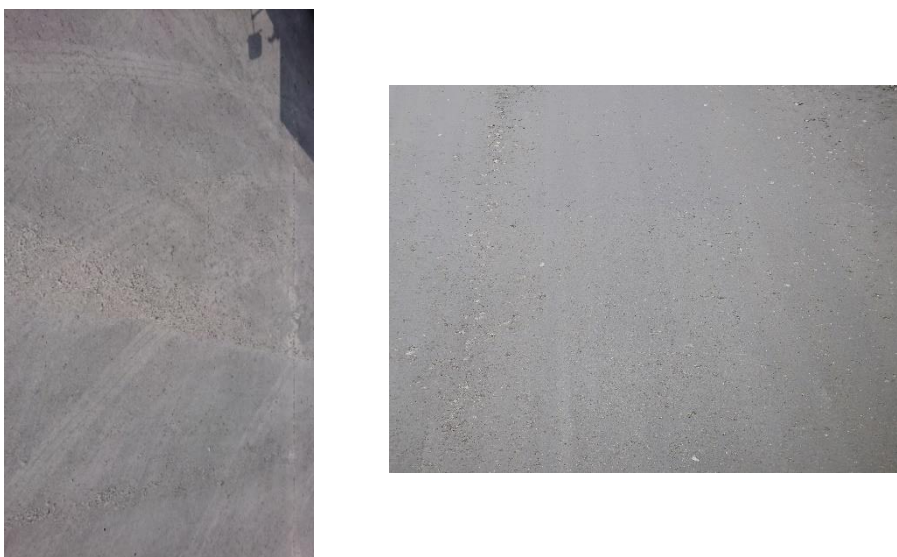
Wskazano wilgotność optymalną na poziomie 4,1% przy wskaźniku piaskowym na poziomie 35,7%, co bezpośrednio przekłada się na znaczne

obniżenie zawartości wody w mieszance betonowej. Tak niska wilgotność wpływa na:

- a. Trudność we wbudowywaniu mieszanki betonowej
- b. Niski margines błędu, czyli przedozowania bądź zbyt małej ilości wody.
- c. Potrzebę szybkiego zagęszczenia i „zamknięcia” konstrukcji przy jednoczesnej pielęgnacji

Wyznaczenie punktu piaskowego dla betonu wykonywanego w technologii wałowania na poziomie powyżej 38% sprzyja nie tylko polepszeniu struktury makroskopowej, ale również ma wpływ na zwiększenie wilgotności optymalnej przy założeniu odpowiedniego udziału frakcji na sicie #0,5 mm. Na poziomie około 16-20%.

Punkt piaskowy wpływa przede wszystkim na łatwość zagęszczania mieszanki betonowej, co ma przełożenie na późniejszą trwałość i wygląd już wbudowanego betonu [Rys. 61].



Rys. 61. Wygląd betonu stwardniałego z punktem piaskowym na poziomie ok 35% (lewy obraz) oraz wygląd betonu stwardniałego z punktem piaskowym na poziomie ok 39% (prawy obraz). Zdjęcie autora.

Wilgotność optymalna jest parametrem, który jest niezbędny do zbadania w trakcie wykonywania każdej receptury, ponieważ jest to

wartość, która definiuje ilość wody w 1 m³ mieszanki betonowej. W przypadku mieszanki betonowej, która jest zagęszczana w sposób mechaniczny przez wałowanie, nieznaczne przekroczenie wartości wilgotności optymalnej sprawia, że mieszanka wykazuje cechy uplastyczniania mimo, że zgodnie z Wykresami [Wykr. 1-5] gęstość mieszanki nie spada w znaczny sposób. Natomiast w warunkach budowy ma to bardzo negatywne skutki, przede wszystkim wizualne i użytkowe – pofalowanie i nierówności powierzchni. Niedoszacowanie odpowiedniej ilości wody również jest niebezpieczne dla warunków użytkowych, ponieważ powoduje szybsze przesychanie powierzchni betonu i jego łuszczenie się w przyszłości. W niedostatecznej ilości wody, nie występuje zjawisko pofalowania poprzez uplastycznienie mieszanki [Rys. 62]



Rys. 62. Złuszczenie betonu wałowanego w wyniku niedostatecznej pielęgnacji i szybkiego przeschnięcia podczas wbudowania. Wyraźnie widać porowatość betonu i wyższą nasiąkliwość warstwy po złuszczeniu. Zdjęcie autora.

6.2 Omówienie wyników uzyskanych obserwacji mikroskopowych

Przed przystąpieniem do badań mikroskopowych obserwowano próbki okiem nieuzbrojonym. Ze względu na to, że beton wałowany ocenia się makroskopowo, starano się wychwycić różnice w wyglądzie próbek. Metoda zagęszczania wpływała przede wszystkim na wygląd próbek wykonywanych Proctorem oraz młotem wibracyjnym [Rys. 63, 64].



Rys. 63. Struktura próbki zagęszczanej metodą Proctora o wymiarach 150x120 mm (dxh). Zdjęcie autora



Rys. 64. Próbkki zagęszczane młotem vibracyjnym. Wyraźne odcięcie warstwy na poboczniczy przy wykonywaniu warstwy szczepnej. Zdjęcie autora

Próbkki wyglądają na niedogęszczone przy poboczniczy. Jest to zjawisko powierzchniowe, które nie wpływa na wytrzymałość próbkki. Próbkki po zbadaniu wytrzymałości pękają w innych miejscach, co jest prawidłowym zjawiskiem [Rys. 65]



Rys. 65. Próbkki po zniszczeniu. Po lewej stronie próbka walcowa z metody Proctora, po prawej próbka sześcienna z metody zagęszczania młotem wibracyjnym autorską metodą. Zdjęcie autora.

Na podstawie obserwacji zniszczeń stwierdzono, że potencjalne niedogęszczenie na styku zagęszczanych warstw próbek sześciennych wykonywanych młotem wibracyjnym metodą autorską nie wpływa na ich wytrzymałość. Udowodniono to również po przecięciu próbki i sprawdzeniu jej struktury wewnętrznej, niedogęszczenie zauważalne przez pustki nie występuje w całym przekroju próbki, a tylko przy warstwie zewnętrznej [Rys. 66].



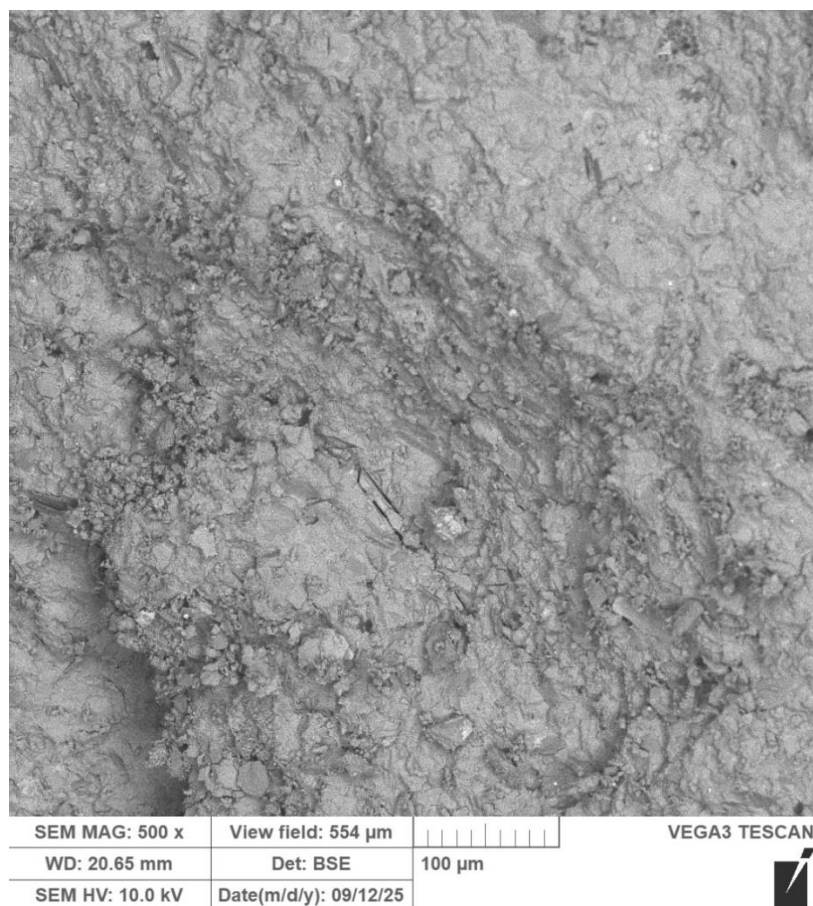
Rys. 66. Przekrój próbek z zaznaczeniem warstwy szczepnej i widocznych niedogęszczeń. Próbka zagęszczana metodą autorską. Zdjęcie autora.

Do sprawdzenia niedogęszczenia struktury wewnętrznej próbki wybrano niekorzystnie wyglądającą wizualnie próbkę [Rys. 67].

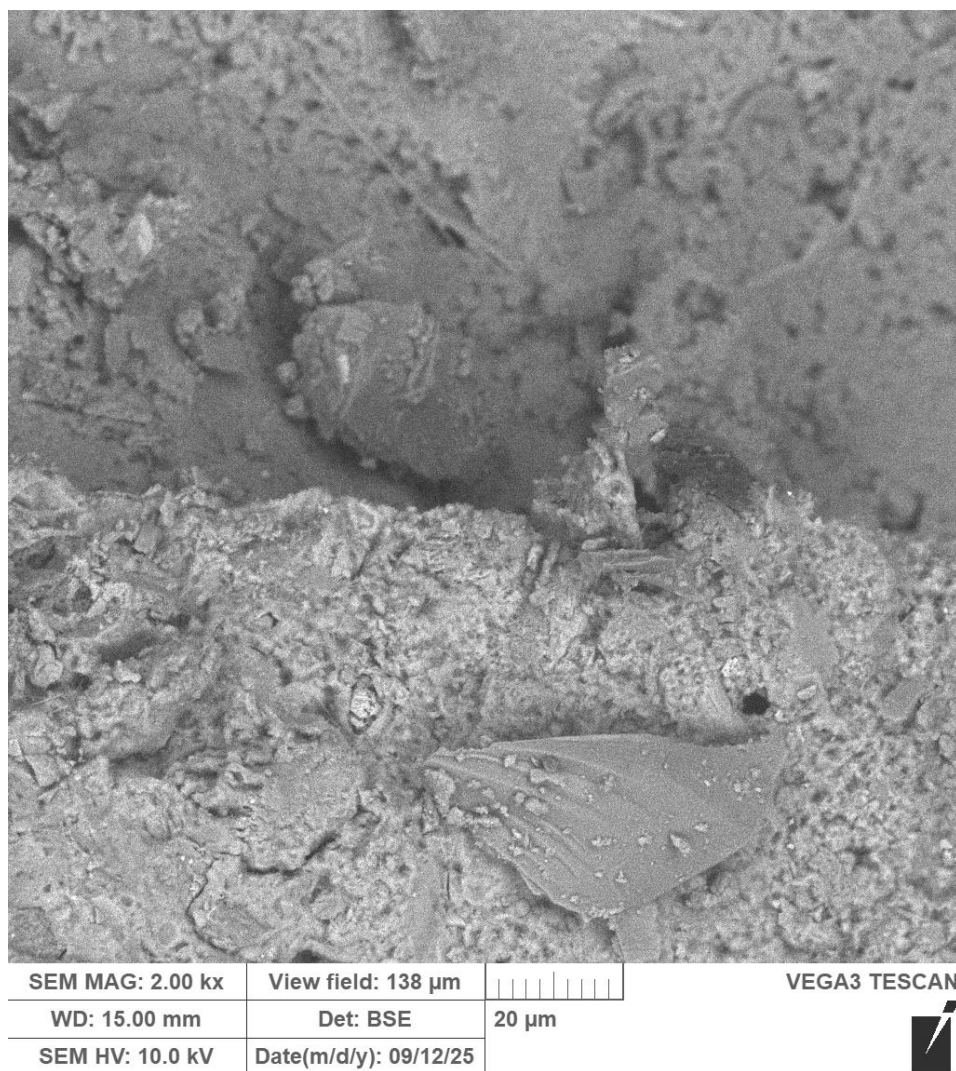


Rys. 67. Próbka użyta do obserwacji struktury makroskopowej po przecięciu, zagęszczana metodą autorską. Zdjęcie autora.

Na podstawie analizy makroskopowej stwierdzono, że warto zbadać strukturę próbek pod mikroskopem. Wykonano serie zdjęć mikroskopowych, a uzyskane dane podzielono wg metod obserwacji. Posłużono się mikroskopem elektronowym Vega 3 oraz mikroskopem do badania struktury petrograficznej KEYENCE VHX-X1F. Posłużono się różnymi powiększeniami w obydwóch metodach. Mikroskop elektronowy Vega 3 pozwolił na zaobserwowanie dogłębnej struktury dla różnych metod zagęszczania próbek. Zauważono pewne zależności w strukturze próbki, dzięki bardzo dużym powiększeniom, na które pozwalało rzędzenie – do 20 μm [Rys. 68, 69]. Próbkę obserwowano w przełomie, odłupaniu fragment betonu po zniszczeniu próbki. Celowo nie wykonywano cięć czy szlifów, aby nie zaburzać widoku struktury.



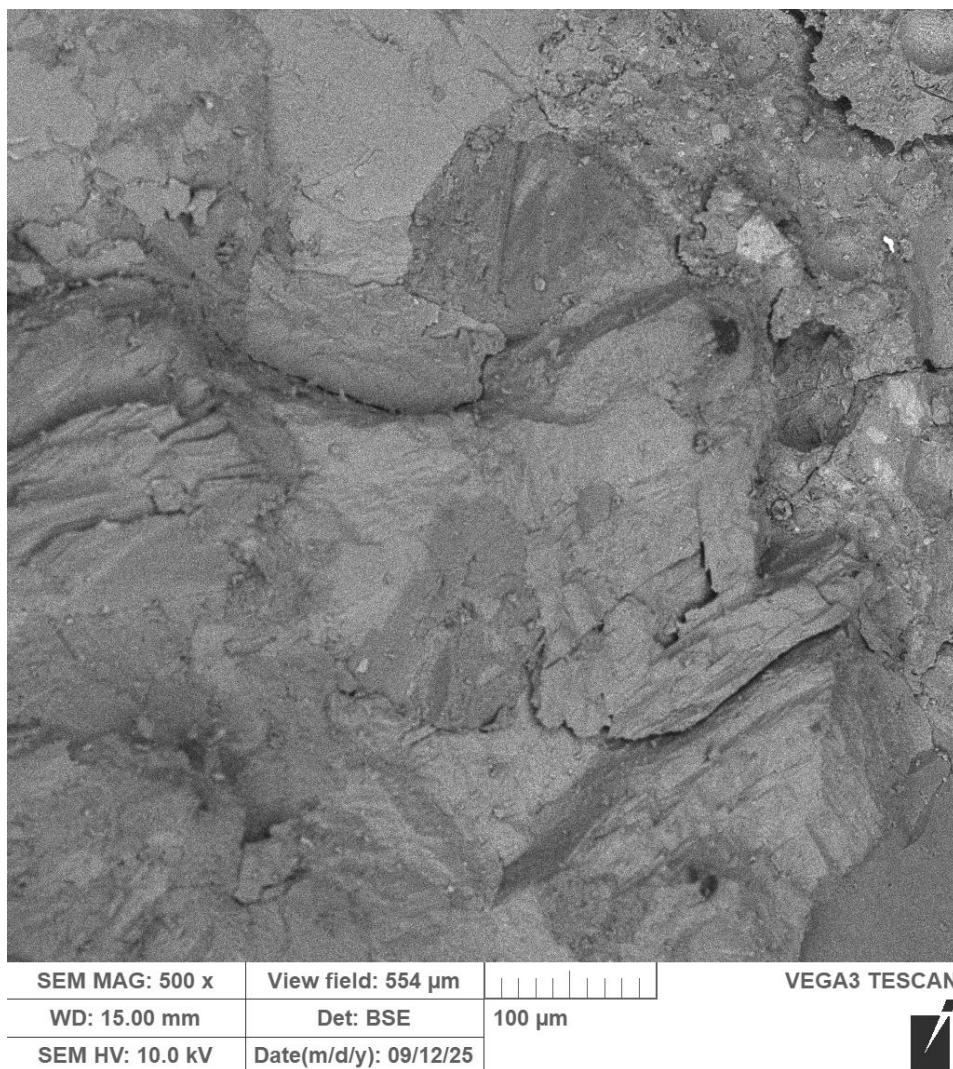
Rys. 68. Struktura wewnętrzna próbki betonu przygotowywanej metodą Proctora w powiększeniu 500 x – Vega 3. Próbkę wykonano po przełomie – bez cięcia. Zdjęcie autora.



Rys. 69. Struktura wewnętrzna próbki betonu przygotowywanej metodą Proctora w powiększeniu 2000 x – Vega 3. Próbkę wykonano po przełomie – bez cięcia. Zdjęcie autora.

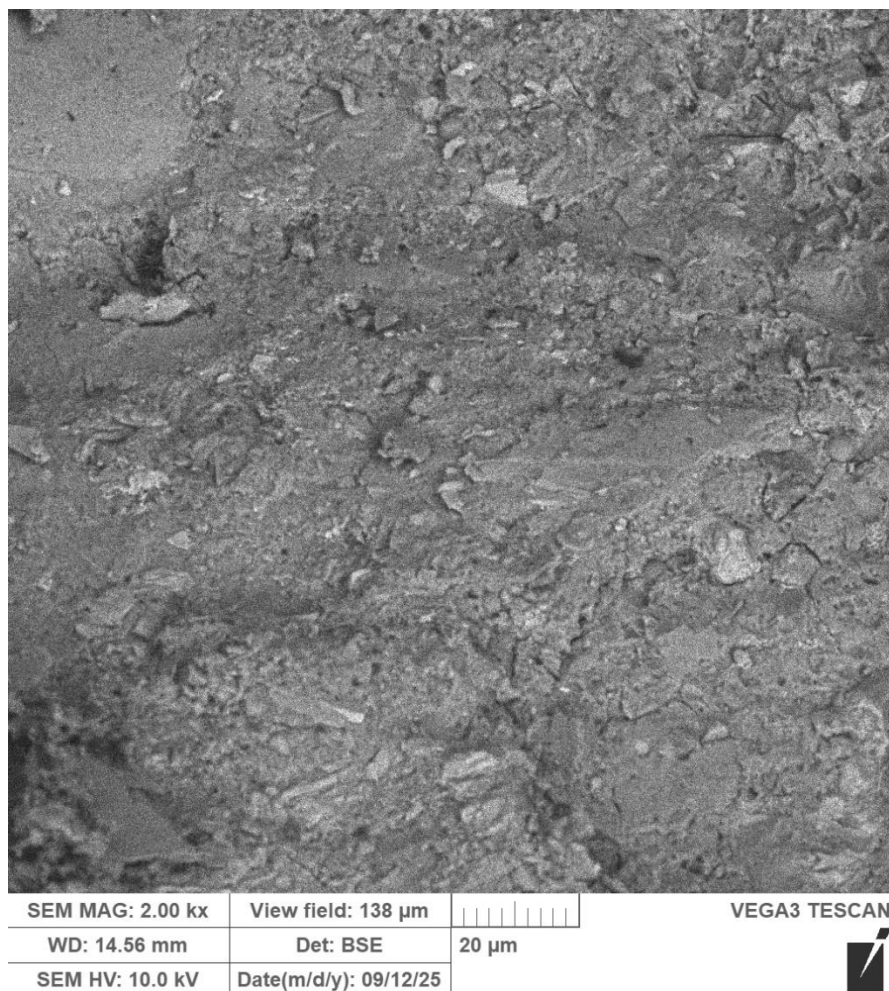
Na podstawie Rys 68 i Rys 69 można stwierdzić, że struktura badanej powierzchni jest poszarpana i kanciasta. Widać wyraźne ostrokrawędziste fragmenty kruszywa, spękanego pod wpływem uderowej metody zagęszczenia Proctora. Jednocześnie ściśle upakowanie materiału [Rys. 59] świadczy o właściwie użytej energii zagęszczenia do uzyskania prawidłowej mikrostruktury.

Dla metody zagęszczania młotem wibracyjnym zauważono pewne różnice w porównaniu z metodą Proctora w mikrostrukturze obserwowanej próbki. Obserwacje doprowadziły do stwierdzenia, że przy tożsamym powiększeniu jak dla próbek zagęszczanych metodą Proctora, wyraźnie widać, że materiał jest zaoblony w powiększeniu 500x, niezależnie od metody użycia młota wibracyjnego – ręcznie czy statyw [Rys. 70]



Rys. 70. Struktura wewnętrzna próbki betonu przygotowywanej metodą zagęszczania ręcznego młotem wibracyjnym w powiększeniu 500 x – Vega 3. Próbka wykonano po przełomie – bez cięcia. Zdjęcie autora.

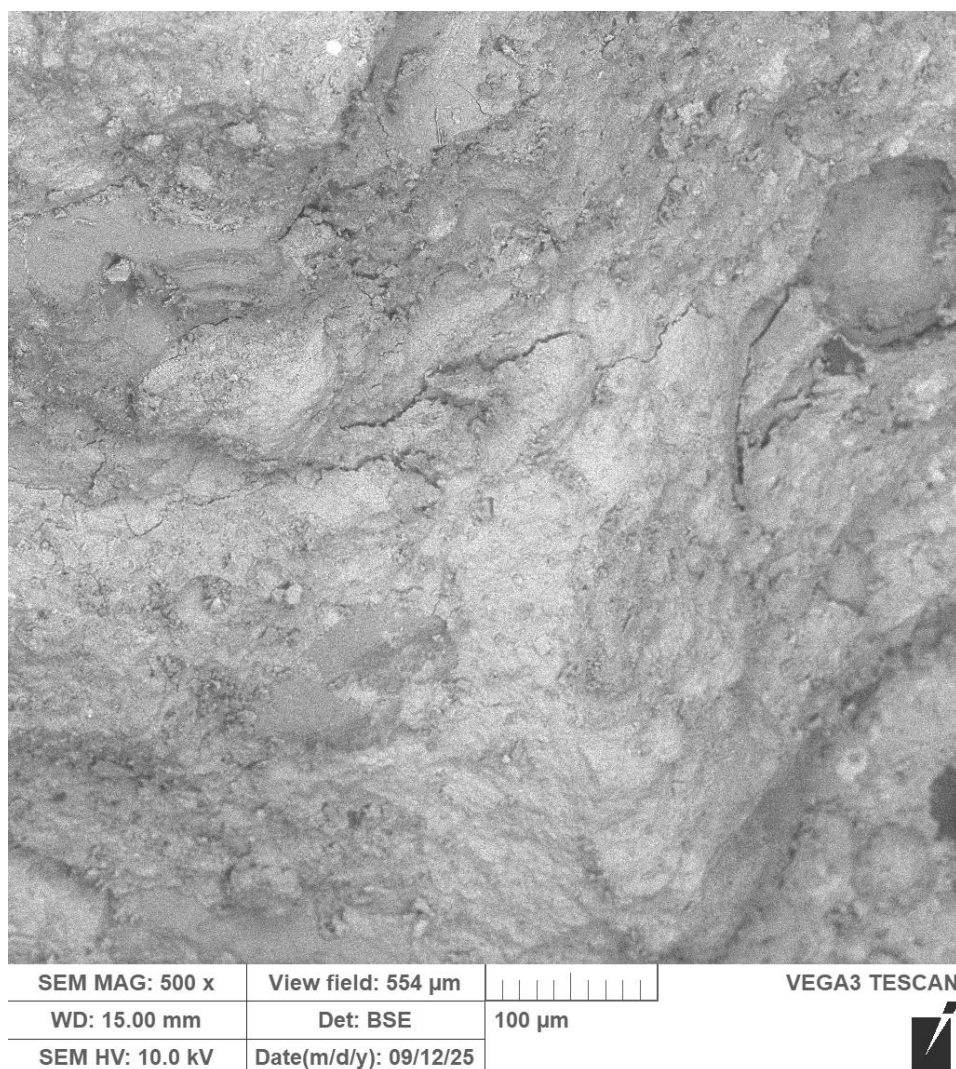
Powiększenie 2000 x pozwala na zaobserwowanie struktury lekko krawędzistej. Może to wynikać z wielkości frakcji, w którą wchodziły cząstki cementu [Rys. 71. Skala zjawiska jest wyraźnie mniejsza niż jak w przypadku metody zagęszczania udarowego Proctorem.



Rys. 71. Struktura wewnętrzna próbki betonu przygotowywanej metodą zagęszczania ręcznego młotem wibracyjnym w powiększeniu 2000 – Vega 3. Próbkę wykonano po przełomie – bez cięcia. Zdjęcie autora.

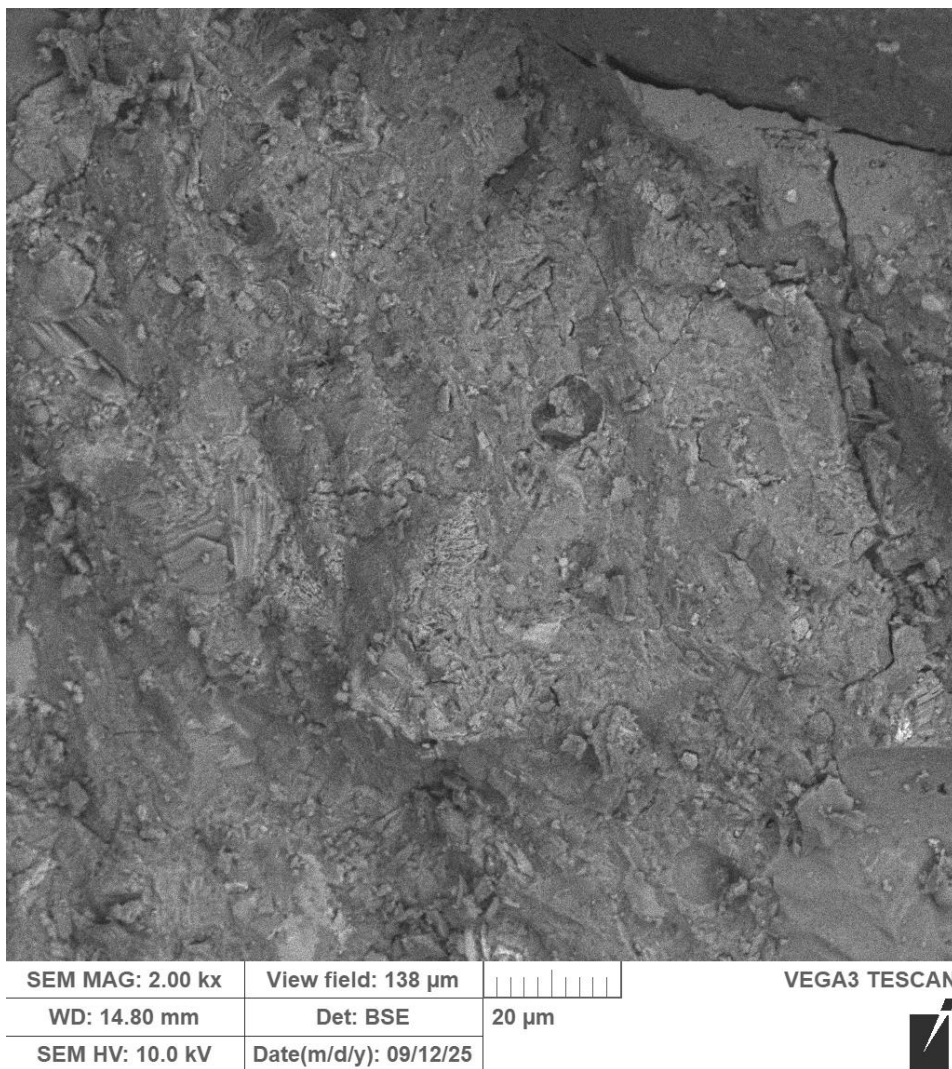
Powyższe obserwacje posłużyły do analizy próbek zagęszczanych metodą młota wibracyjnego na statywie. Interpretacja obrazów wskazała bardzo podobny wniosek jak do próbek zagęszczanych ręcznie.

Przedstawiono widok przełomu próbek w obrazie elektronowym mikroskopem Vega 3 [Rys. 72].



Rys. 72. Struktura wewnętrzna próbki betonu przygotowywanej metodą zagęszczania na statywie młotem wibracyjnym w powiększeniu 500 x – Vega 3. Próbką wykonano po przełomie – bez cięcia. Zdjęcie autora.

Obłóści w obserwacji próbek zagęszczanych młotem na statywie metodą autorską są wyraźne w przypadku powiększenia 500x. W przypadku większego powiększenia, widać ostrokrawędziste struktury [Rys. 73].



Rys. 73. Struktura wewnętrzna próbki betonu przygotowywanej metodą zagęszczania na statywie młotem wibracyjnym metodą autorską w powiększeniu 2000 x – Vega 3. Próbką wykonano po przełomie – bez cięcia. Zdjęcie autora.

Na podstawie powyższej analizy obserwacji zdjęć mikroskopowych w różnym powiększeniu można stwierdzić, że metoda udarowa Proctora zagęszczenia wpływa na niszczenie ziaren kruszywa w mieszance betonowej, przez co obserwuje się liczne, ostrokrawędziste struktury w powiększeniu 500x. Dla powiększenia 2000x obraz

zagęszczonej mieszanki może już się zlewać z matrycą struktury cementowej.

W przypadku obserwacji petrograficznej za pomocą mikroskopu KEYENCE model VHX-X1F zauważono podobne zależności dla różnych metod zagęszczenia. Różnice są mniej zauważalne ze względu na to, że obraz jest w kolorze i widać wyraźne struktury petrograficzne i całe ziarna. Metoda zagęszczania wg Proctora uwidacznia ostrokrawędziste ziarna [Rys. 74, Rys. 75].



Rys. 74. Struktura petrograficzna próbki zagęszczanej metodą Proctora. w powiększeniu 2000 μm . Widoczna ostrokrawędzista, zbita matryca. Zdjęcie autora.



Rys. 75. Struktura petrograficzna próbki zagęszczanej metodą Proctora. w powiększeniu 500 μm . Widoczna ostrokrawędzista, spękana, zbita matryca. Zdjęcie autora.

Ręczna metoda zagęszczenia młotem wibracyjnym wskazuje na podobne zjawisko jak dla mikroskopu elektronowego. Obłóści w strukturze są spowodowane samym mechanizmem zagęszczania, gdzie energia zagęszczenia jest dostarczana w sposób ciągły, a nie uderowy jak metody Proctora [Rys. 76]. Nie ma w tym wypadku uderzenia uderowego, a występuje amplituda drgań młota w bezpośrednim przyłożeniu do próbki, zgodnie ze schematem działania dla Rys. 35.



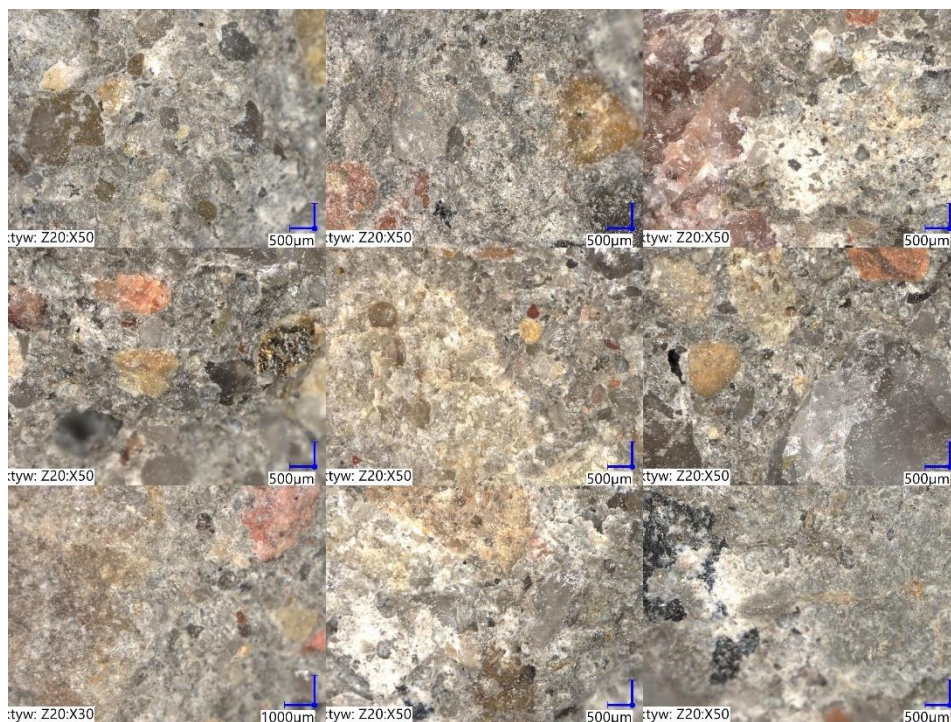
Rys. 76. Struktura petrograficzna próbki zagęszczanej metodą ręczną za pomocą młota wibracyjnego w powiększeniu 2000 μm . Widoczne zaoblenia matrycy kruszywowo-cementowej. Zdjęcie autora.

Podobnie w przypadku zagęszczenia młotem wibracyjnym na statywie. Przyłożona energia zagęszczenia bezpośrednio w styku materiału podczas amplitudy drgań nie wpływa na pękanie ziaren kruszywa w mieszance betonowej [Rys. 77]. Widoczna struktura próbki zagęszczanej młotem wibracyjnym ręcznie lub na statywie jest zauważalna w obrazie mikroskopowym [Rys. 77].



Rys. 77. Struktura petrograficzna próbki zagęszczanej metodą ręczną za pomocą młota wibracyjnego na statywie w powiększeniu 500 μm . Widoczne zaoblenia matrycy kruszywowo-cementowej. Zdjęcie autora.

Obraz dla powiększenia 500 μm różnych metod zagęszczenia zestawiono [Rys. 78] w celu porównania struktury. Petrografia pochodzenia kruszyw jest jednakowa, dlatego nie skupiono się na rozróżnieniu pochodzenia kruszyw, a na kształcie ziaren. Zestawiono obrazy w powiększeniu 500 μm w celu porównania wyglądu mikrostruktury dla różnych metod zagęszczenia.

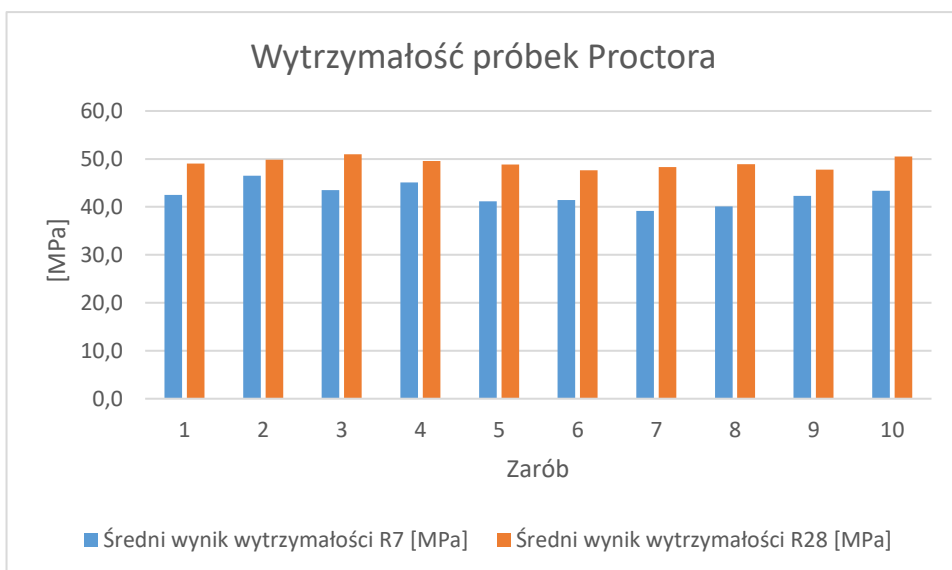


Rys. 78. Zestawienie zbiorcze zdjęć z mikroskopu KEYENCE VHX-X1F dla różnych metod zagęszczania. Od góry – metoda zagęszczania młotem wibracyjnym ręcznie, w środku metoda zagęszczenia młotem wibracyjnym na statywie, na dole metoda udarowa Proctora w powiększeniu 500 µm.

W przypadku dużych powiększeń, różnice w strukturze są słabo zauważalne ze względu na zlewanie się matrycy cementowo-kruszywowej. W porównaniu mikrostruktury z mieszanki betonowej w różnych metodach zagęszczania można zauważyć, że podczas zagęszczania, zniszczeniu ulegają kruszywa wielkości powyżej 0,5 mm, co jest wyraźnie zauważalne dla badań mikroskopowych wg Vega 3 oraz KEYENCE VHX-X1F [Rys. 67 do Rys 78.] dla odpowiednich powiększeń. Przeanalizowana mikrostruktura nie ma wpływu na ostateczną jakość i wytrzymałość betonu. Rozkruszenie ziaren mieszanki betonowej próbek wg Proctora nie ma korelacji w wytrzymałości w odniesieniu do próbek zagęszczanych metodą autorską młotem wibracyjnym na statywie. Struktura mikroskopowa jest inna, natomiast osiągnięte wytrzymałości dla odpowiednich parametrów zagęszczenia, metodą Proctora i metodą autorską są porównywalne, wiarygodne i mieralne. Świadczy to o oryginalności autorskiej metody przygotowania próbek.

6.3 Omówienie wyników wytrzymałości

W przypadku wyników wytrzymałości, przeprowadzono wiele różnych doświadczeń i zależności zagęszczenia od wilgotności optymalnej mieszanki betonowej. Doświadczenia przeprowadzono już na odpowiednio dobranym stosie okruszowym, tak aby wskaźnik piaskowy był wysoki, tj. minimum 38%. W ten sposób uniknięto błędów w uzyskanych wynikach wytrzymałości, które mogłyby wynikać z braku ciągłości uziarnienia lub nieodpowiedniego doboru stosu okruszowego – czyli np. typowego jak dla betonów w konsystencji plastycznej S3-S4 [12] – więcej frakcji grubej 8/16 mm niż 2/8 mm. Taki dobór nie zapewnia do końca odpowiedniej ciągłości uziarnienia, ale znacznie poprawia wytrzymałość betonu. Na podstawie uzyskanych wyników wytrzymałości, uzyskanych na próbkach przygotowanych metodą Proctora w wilgotności optymalnej stwierdzono, że wyniki odpowiadają wytrzymałości, której oczekiwano. Ponadto są powtarzalne – uzyskane wartości nie odbiegają od siebie [Wykres 6].

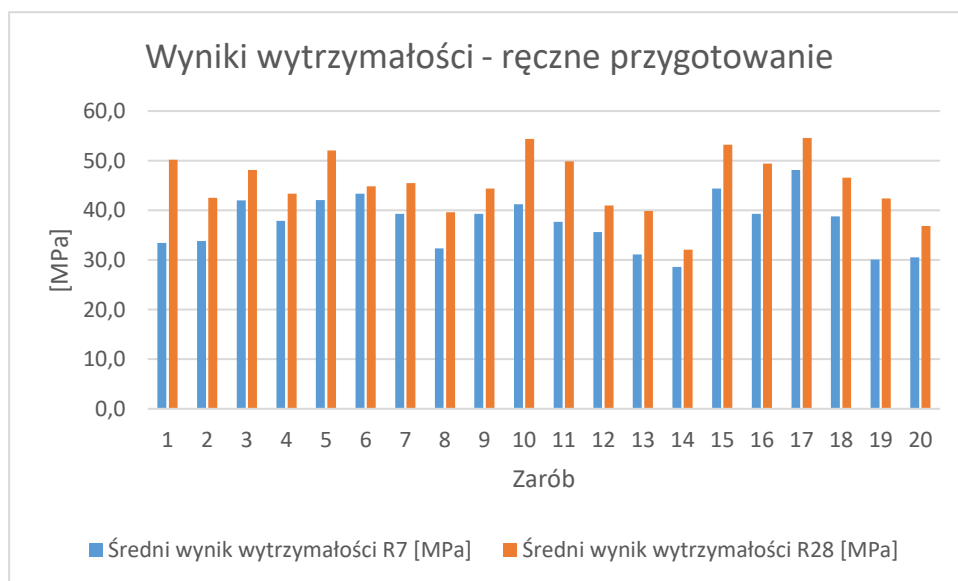


Wykres 6. Wyniki wytrzymałości dla próbek przygotowywanych metodą Proctora w wilgotności optymalnej.

Próbki z zawartością recyklingu znacznie odbiegały wartościami wytrzymałości od próbek standardowej receptury C30/37L, na co miało bezpośredni wpływ jakość kruszywa recyklingowego. Doświadczenie

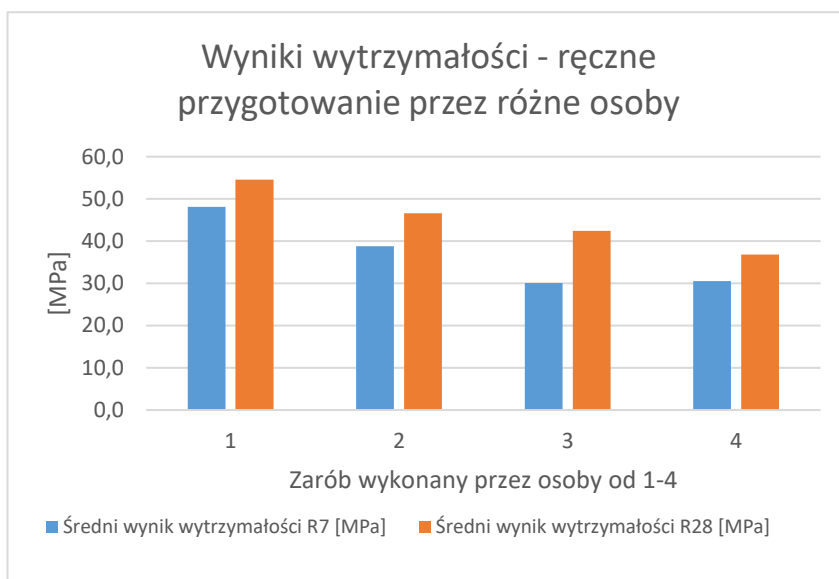
wskazało wyraźnie, że aby odtworzyć daną recepturę należałoby zwiększyć zawartość cementu w składzie.

Próbki, które zostały przygotowane metodą ręczną za pomocą młota wibracyjnego odbiegały znacznie wytrzymałością od siebie i potwierdzono również założenia hipotezy badawczej, że jest to metoda niedokładna. Nie można w niej jednoznacznie stwierdzić prawidłowości receptury, a zmiana osoby, która wykonuje próbki bezpośrednio przyczynia się do uzyskania innego wyniku przy tej samej recepturze [Wykres 7]:



Wykres. 7. Wyniki wytrzymałości dla próbek przygotowywanych ręcznie.

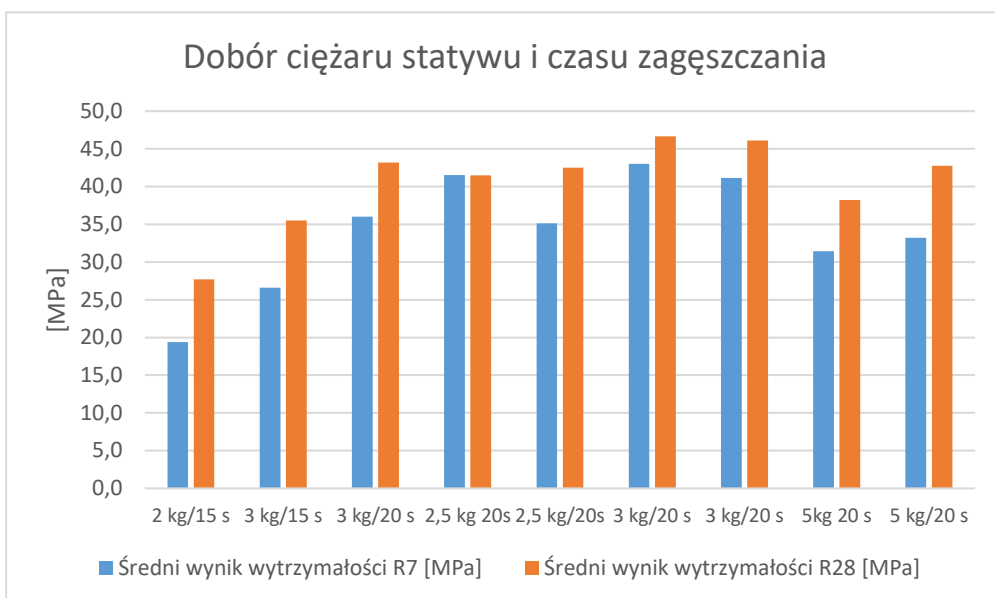
Według powyższego wykresu minimalny wynik dla próbek przygotowywanych ręcznie po 7 dniach to 28,6 MPa, a maksymalny 48,1 MPa. Po 28 dniach wynik minimalny to 32,1 MPa, a maksymalny 54,6 MPa. Rozrzut wyników to ponad 22 MPa na jednej recepturze, co jest niedopuszczalne w trakcie budowy oraz wbudowywania betonu. Potwierdzono również hipotezę, mówiącą o zmianie osoby przygotowującej próbki i wpływie czynnika ludzkiego na późniejszy wynik wytrzymałości.



Wykres 8. Wyniki wytrzymałości próbek przygotowywanych ręcznie przez cztery różne osoby.

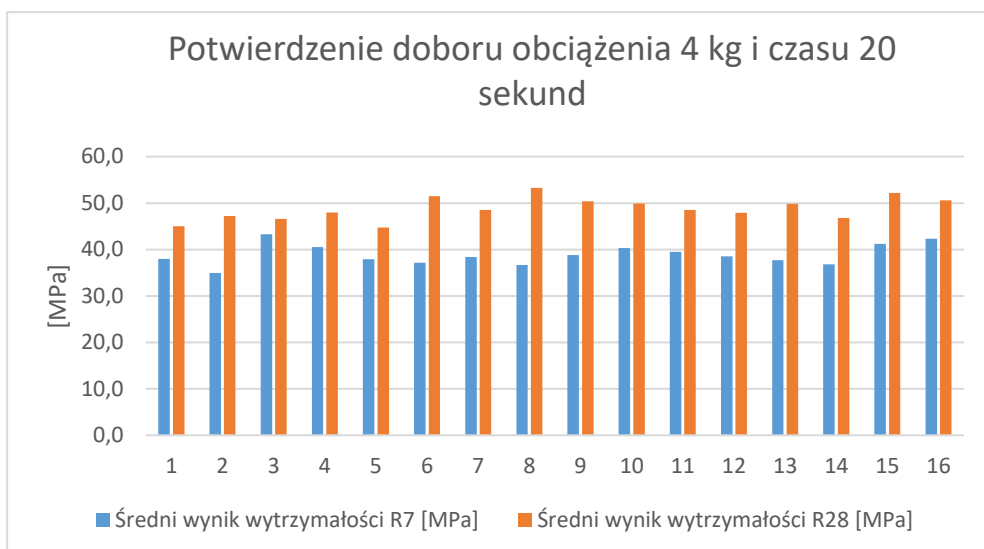
Wartości wytrzymałości minimalnych dla 7 dniowych oznaczeń to 30,1 MPa, a maksymalna to 48,1 Mpa. Wytrzymałości 28-dniowe to minimalnie 36,9 MPa, a maksymalnie 54,6 MPa. Za pomocą tego doświadczenia potwierdzono powyższe, tylko poprzez przeprowadzenie zagęszczania przez różne osoby.

Proces dojścia do prawidłowych ustawień autorskiej metody zagęszczania na statywie wymagał ostatecznie przygotowania łącznie ponad 60 zarobów, co daje 360 próbek samych badań wytrzymałości. Pierwszy etap zakładał zmianę obciążeń i czasu zagęszczania [Wykres 9].



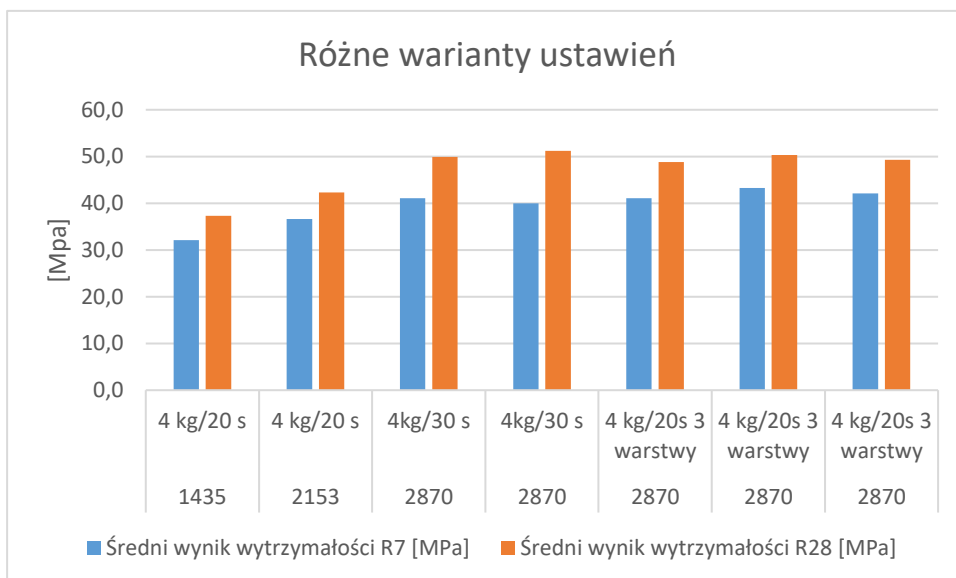
Wykres. 9. Przedstawienie wyników wytrzymałości próbek przygotowywanych pod różnym obciążeniem i czasem zagęszczenia dla metody autorskiej

Do przeprowadzenia doświadczenia przyjęto, że czas zagęszczania próbek poniżej 15 sekund nie będzie wystarczający, a średni czas zagęszczania młotem wibracyjnym ręcznie to ok 15-20 sekund. Autorska metoda nie zakładała wydłużenia czasu przygotowania próbek, ale znalezienie takich ustawień i założeń, które będą mogły zapewnić powtarzalność wyników i prawidłową ich weryfikację z metodą Proctora. Jednocześnie przygotowanie próbek nie powinno stanowić zbyt dużych nakładów energii i czasu. Wskazano natomiast, że przedział obciążenia do statywu powinien mieścić się w granicach 3-4 kg. Zbyt mały ciężar, tj. 2,5 kg sprawiał, że próbki nie były dogęszczane, co zauważano również na podstawie niższych mas próbek ok 7820 gramów. Istotne, że wyższy ciężar 5 kg nie sprawiał, że próbki uzyskały wyższe wyniki wytrzymałości. Taką zależność również zauważono podczas zagęszczania ręcznego. Osoby, które przykładają bardzo dużą siłę do młota wibracyjnego wcale nie uzyskiwały wysokich wyników wytrzymałości próbek. Kolejnym krokiem było sprawdzenie optymalnej kombinacji obciążenia i czasu [Wykres 10].



Wykres 10. Wyniki wytrzymałości próbek zagęszczanych za pomocą autorskiej metody przy obciążeniu 4 kg i czasie zagęszczania 20 sekund.

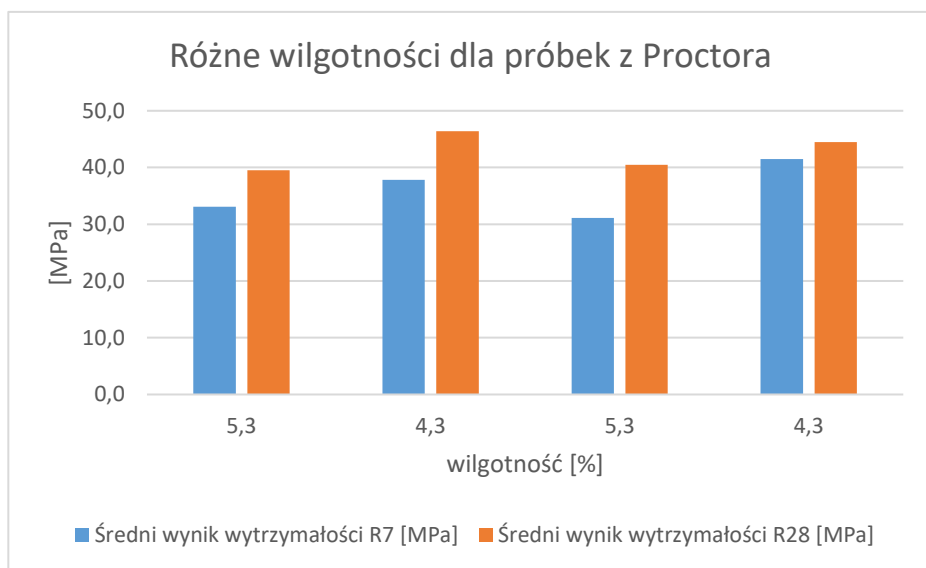
Wartości wytrzymałości po 7 dniach to minimalnie 35,0 MPa, a maksymalnie 43,3 MPa. Po 28 dniach minimalnie to 44,7 MPa oraz maksymalnie 53,3 MPa. Różnice to około 9 MPa, co już znacznie prościej pozwala na zweryfikowanie danej receptury. Ponadto pojedyncze wyniki z serii ściskanych próbek nie wykazywały anomalii odbiegających od siebie wartości. Poziom uzyskanych wyników wytrzymałości w odniesieniu do próbek przygotowywanych metoda Proctora jest podobny, co stanowi o tym, że dostarczona energia zagęszczania była wystarczająca i powtarzalna. Mimo to, postanowiono ulepszyć metodę i sprawdzić inne ustawienia, jak zmiana amplitudy lub wydłużenie czasu, czy zwiększenie ilości zagęszczanych warstw. Wyniki przedstawiają się następująco [Wykres 11]:



Wykres 11. Wyniki wytrzymałości dla różnych ustawień. Wartości pod wykresem to ustawienia poziomu uderów/min młota vibracyjnego.

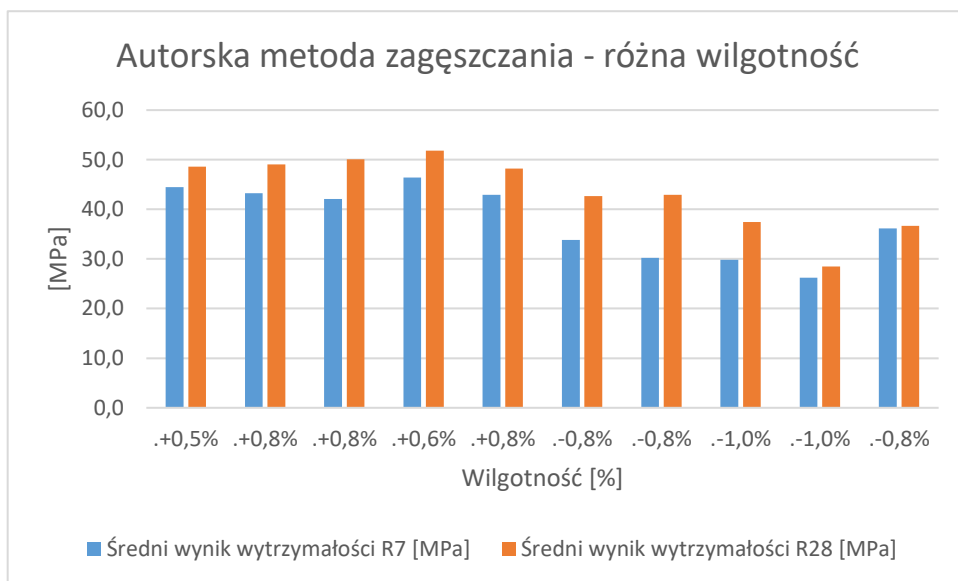
Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zmniejszenie częstotliwości uderów do wartości poniżej 2870 uderzeń/min nie sprzyja poprawie wyników, a wręcz przeciwnie – pogarszają się wyniki wytrzymałości, co świadczy o mniejszej energii zagęszczania. Wydłużenie czasu zagęszczania z 20 do 30 sekund oraz zmiana ilości warstw ze standardowych 2 do 3 nie poprawia znacznie wyników, dlatego w celach potwierdzenia skuteczności metody zastosowano obciążenie 4 kg i 20 sekund zagęszczania na warstwę.

Metodę sprawdzono jeszcze w jeden sposób, tj. w odniesieniu do wahań wilgotności. W celach potwierdzenia wyników badań, zagęszczano próbki w wilgotności optymalnej. Natomiast w celu sprawdzenia wpływu wilgotności na możliwość całkowitego zagęszczenia przeprowadzono serię doświadczeń w różnych wilgotnościach. Przygotowano próbki metodą Proctora oraz za pomocą autorskiej metody, symulując wyższą lub niższą wilgotność od optymalnej. Wyniki dla próbek z Proctora przedstawiają się następująco [Wykres 12]:



Wykres 12. Wyniki wytrzymałości dla próbek z Proctora dla wilgotności +0,5% (5,3%) oraz -0,5% (4,3%). Wilgotność optymalna wynosiła 4,8% dla mieszanki betonowej.

Uznano, że próbki należy zagęścić w wilgotnościach odbiegających od optymalnej tylko o $\pm 0,5\%$, ponieważ wyższe wartości stanowiłyby zbyt duże ryzyko błędu wynikającego z możliwości utrzymania próbki w całości po rozformowaniu. Uplastycznione próbki nie zachowywały swojego kształtu w przypadku przekroczenia wilgotności optymalnej. Na podstawie powyższych wyników wytrzymałości na ściskanie [Wykres 12] stwierdza się, że wartości są poniżej wytrzymałości otrzymanych dla wilgotności optymalnej próbek. Niedostatek wody nie pogarsza wyników w tak znaczny sposób jak jego nadmiar dla próbek przygotowywanych metodą Proctora. Przeciwnie zjawisko przedstawia się dla próbek przygotowywanych metodą autorską za pomocą statywu [Wykres 13]:



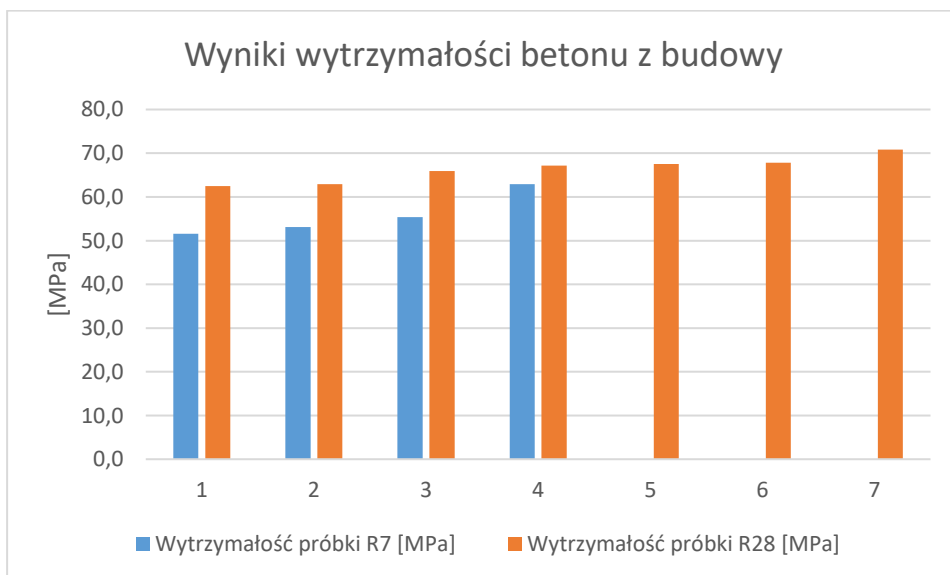
Wykres 13. Wyniki wytrzymałości przy większej wilgotności od optymalnej +0,5 do +0,8% oraz niższej od -0,8% do -1,0%. Wilgotność optymalna wynosiła 4,8%.

W przypadku zagęszczania próbek przy wyższej wilgotności od optymalnej, otrzymane wyniki były na poziomie wyników jak dla wilgotności optymalnej – średnio około 49,6 MPa – czyli poziom właściwej weryfikacji receptury. Wynika to zapewne z tego, że młot wprawia całą mieszankę w vibrację, które zapewniają bardzo dobre ułożenie się stosu okruszowego. W przypadku natomiast zbyt małej ilości wody, wyniki znacznie się pogorszyły – średnio 37,6 MPa. Jak już wspomniano, sytuacja jest zupełnie odwrotna jak dla próbek przygotowywanych metodą Proctora.

6.4 Omówienie wyników wytrzymałości z realizacji betonu na budowie

Warunki budowy są inne niż w laboratorium. Mieszanka betonowa wytworzona na węźle, jak i w laboratorium musi być jednorodna i wymieszana w odpowiednio długim czasie, aby wszystkie składniki się połączyły. Wpływa to na jakość wbudowanego betonu, jak i badanych próbek. W ciągu realizacji pracy doktorskiej wykonano również serię badań w realizacji konstrukcji Miejsc Obsługi Podróżnych w ciągu drogi S7. Konstrukcja stanowiła beton wałowany jako podbudowę zasadniczą pod warstwę nawierzchni z kostki betonowej na terenie miejsc postojowych dla samochodów ciężarowych. Wykonano serię próbek podczas realizacji na budowie.

W warunkach budowy przygotowuje się próbki młotem wibracyjnym ręcznie. W ten też sposób wykonano próbki. Recepturę przygotowano zgodnie z zachowaniem zależności wysokiego punktu piaskowego, tj. ok 41% [Załącznik nr 31], po to aby wbudowana warstwa była jednorodna, dobrze zagęszczalna i trwała. Wyniki wytrzymałości przedstawiały się następująco [Wykres 14]:



Wykres 14. Wyniki wytrzymałości poszczególnych próbek z budowy parkingu betonowego [15]

W tym wypadku przygotowane próbki nie odbiegały wytrzymałością od siebie, jednak weryfikacja receptury w warunkach budowy wykazała, że zaprojektowany beton w klasie C30/37 odpowiadał klasie C50/60. Wykonanie próbek i przygotowanie receptury przez dwie różne osoby potwierdzają potrzebę zastosowania i wprowadzenia uniwersalnej metody zagęszczania betonu wałowanego zgodnie z autorską metodą opracowaną w niniejszej pracy. Podjęto się optymalizacji receptury po zrealizowanej inwestycji w celu obniżenia kosztów w przyszłości w przypadku innych realizacji. Zgodnie z recepturą C30/37Z [Załącznik nr 31] wskazywano na wytrzymałość na ściskanie R28 na poziomie 50 MPa. Rzeczywiste wyniki uzyskano wyższe. Potrzeba weryfikacji zgodnie z autorską metodą wskazała na możliwość obniżenia ilości cementu o ok 10-15 kg [Tab. 14].

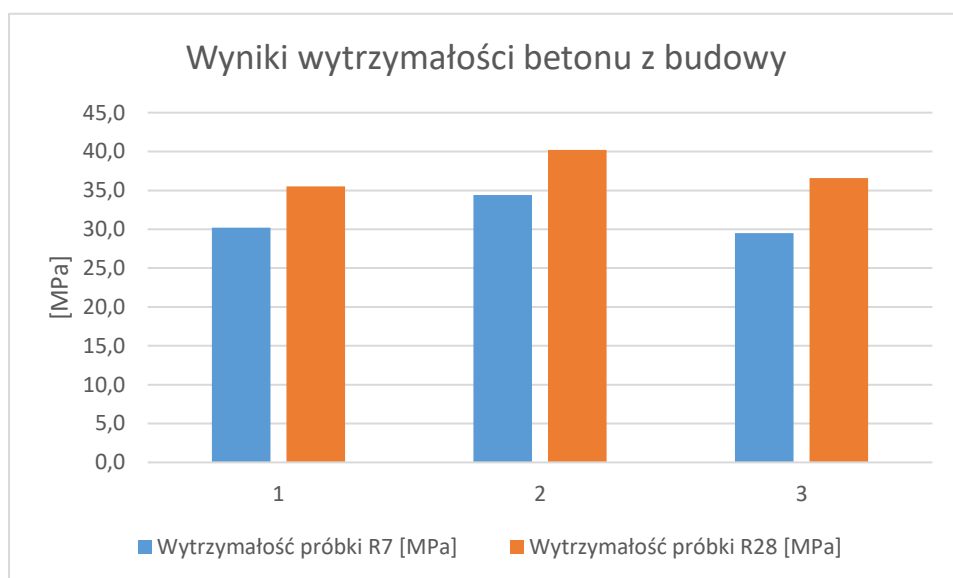
Tab. 14. Wyniki wytrzymałości i gęstości zoptymalizowanej receptury C30/37Z o 15 kg przy zagęszczaniu metodą autorską

Próbka	Gęstość próbki R7[g/cm ³]	Wytrzymałość próbki R7 [MPa]	Gęstość próbki R28 [g/cm ³]	Wytrzymałość próbki R28 [MPa]
1	2,450	43,4	2,512	55,5
2	2,453	45,5	2,534	49,2
3	2,502	41,2	2,521	51,6

Wbudowanie betonu zgodnego z [Rys. 43, Rys 44] sprawiało wiele problemów wynikających z utrzymania prawidłowej wilgotności optymalnej mieszanki betonowej. Jak wskazano, niska zawartość frakcji kruszywa do sita #0,5 mm, mimo wysokiego punktu piaskowego, wpłynęła na wytrzymałość próbek uzyskanych podczas zagęszczenia. Istnieje zależność wytrzymałości od wilgotności optymalnej, co wykazano w niniejszej pracy. Wyniki wytrzymałości przedstawiały się następująco [Tab. 15, Wykres 15]:

Tab. 15. Wyniki wytrzymałości i gęstości próbek przygotowanych młotem wibracyjnym ręcznie

Próbka	Gęstość próbki R7[g/cm3]	Wytrzymałość próbki R7 [MPa]	Gęstość próbki R28 [g/cm3]	Wytrzymałość próbki R28 [MPa]
1	2,275	30,2	2,298	35,5
2	2,307	34,4	2,324	40,2
3	2,279	29,5	2,302	36,6



Wykres. 15. Wyniki wytrzymałości próbek wykonanych młotem wibracyjnym ręcznie.

W związku z otrzymanymi niskimi wynikami, które nie zapewniły osiągnięcia klasy wytrzymałości C30/37 dla betonu, wykonano odwierty w stwardniałej warstwie o wymiarach 100x100 mm i sprawdzono pod kątem wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania betonu [Tab. 17]:

Tab. 17. Wyniki z odwiertów wykonanych w stwardniałej warstwie betonu:

Próbka	Gęstość próbek [g/cm ³]	Wytrzymałość próbki R28 [MPa]
1	2,339	45,5
2	2,327	55,4
3	2,308	42,2
4	2,314	49,4
5	2,314	46,6
6	2,318	48,4

Jak można zauważyć, w warunkach budowy, mieszanka betonowa została zagęszczona w sposób prawidłowy, na pewno dostarczono większą energię do warstwy niż w laboratorium na próbkach, co odzwierciedlają wyniki gęstości. Po analizie wyników z odwiertów spełniono klasę wytrzymałości C30/37.

W ciągu realizacji pracy doktorskiej wykonano również serię badań w realizacji konstrukcji Miejsc Obsługi Podróżnych w ciągu drogi S7. Konstrukcja stanowiła beton wałowany jako podbudowę zasadniczą pod warstwę nawierzchni z kostki betonowej na terenie miejsc postojowych dla samochodów ciężarowych. Wykonano serię próbek podczas realizacji na budowie. Próbkę wykonano młotem ręcznie

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz etapów i podjętych działań, prowadzących do uzyskania potwierdzenia stosowania autorskiej metody zagęszczania próbek betonu wykonywanego w technologii wałowania stwierdza się:

1. Dobór stosu kruszywowego przy projektowaniu mieszanki betonowej wpływa na makroteksturę betonu. Na podstawie doświadczeń z budowy i analizy wbudowywanych receptur [Rys. 43, 45, 46]. Wskazano, że odpowiednia wartość punktu piaskowego na poziomie powyżej 38% zapewnia prawidłowy wygląd betonu – tj. brak zjawiska tzw. „gniazd”, brak wykruszenia ziaren, co sprzyja trwałości oraz jednorodność wyglądu warstwy. Makrotekstura wpływa nie tylko na aspekty wizualne, ale również na trwałość i cechy fizyczne wbudowanej mieszanki. Ten aspekt zaobserwowano podczas doświadczeń na budowie.
2. Zawartość frakcji drobnych powinna być dostosowana w taki sposób, aby zapewnić wilgotność optymalną na tyle wysoką, aby można było zagęścić próbki. Frakcje drobne pozwalają utrzymać wodę w mieszance, tak aby nie traciła ona wilgoci w zbyt szybki sposób, co zapewnia bardziej optymalne możliwości wbudowania. Wpływ wilgotności ma bezpośredni wpływ na wyniki wytrzymałości w zależności od metody zagęszczenia [Tab. 13, Wykr. 12].
3. Struktura mikroskopowa zagęszczonych próbek jest różna dla metody Proctora oraz metody zagęszczania młotem wibracyjnym. W przypadku udarowego przyłożenia energii do próbek, struktura wewnętrzna jest poszarpana, a kruszywo połamane o ostrych krawędziach. Metody zagęszczania młotem wibracyjnym nie niszczą ziaren kruszyw. Struktura mikro może mieć wpływ na trwałość betonu w późniejszej fazie dojrzewania i eksploatacji.
4. Zagęszczanie udarowe metodą Proctora oraz metodą autorską z odpowiednio dobranymi parametrami nie koreluje w żaden sposób z wyglądem mikrostruktury. Kształt i wygląd ziaren jest różny. Zagęszczanie młotem wibracyjnym ma charakter ciągły o niskiej amplitudzie drgań, co nie niszczy ziaren [Rys. 70-73].
5. Zagęszczanie próbek ręcznie młotem wibracyjnym nie jest metodą, która daje pewność prawidłowości zaprojektowanej receptury pod kątem badań wytrzymałości na ściskanie. Zbyt duże rozbieżności w

- wynikach na podstawie przeprowadzonych badań i doświadczeń potwierdziły niepewność w uzyskanych wartościach. [Rys. 5, Tab. 1]
6. Określono jednakowe, optymalne parametry zagęszczania w autorskiej metodzie dla różnych receptur betonowych i skorelowano z metodą Proctora. Wskazano na:
 - a. obciążenie + 4kg, co daje łączną masę 16,3 kg dla zestawu na statywie, bezpośrednio wpływającego na zagęszczenie;
 - b. amplitudę drgań ustawień młota wibracyjnego na poziomie 2870 uderów/min;
 - c. 2 warstwy w celu zagęszczenia, łączone poprzez wzruszenie jako warstwa szczepna.
 7. Stosowanie autorskiej metoda zagęszczania próbek pozwala na skrócenie czasu przygotowania serii 6 próbek do czasu około 20 minut. Metoda Proctora to czas około 70 minut. [Rys. 31]. Zagęszczanie dla metody Proctora oraz metody autorskiej, na podstawie uzyskanych wyników wytrzymałości na ściskanie można korelować wobec energii zagęszczania wynoszącej od 0,5869-0,5944 MJ/m³ [95].
 8. Dla autorskiej metody, ilość zagęszczanych warstw – powyżej 2 oraz wydłużenie czasu zagęszczania próbki powyżej optymalnych 20 sekund wpływa na poprawę uzyskiwanych wytrzymałości na ściskanie. Wydłuża to jednak proces przygotowania próbek. Można stwierdzić, że przyłożona energia jest wyższa niż standardowe zagęszczanie.
 9. Wdrożenie autorskiej metody pozwala na optymalizację receptur pod kątem prawidłowego dobrania zawartości spoiwa oraz stosu okruszowego. Stosowanie zweryfikowanych receptur podczas ich wbudowywania zapobiega rozbieżnościom wyników wytrzymałości przy sprawdzaniach odbiorowych w warunkach budowy, jak i w laboratoriach.
 10. Doświadczenia z budów realizowanych podczas badań nad rozprawą doktorską przysłużyły do opracowania autorskiej metody zagęszczenia w poszczególnych etapach badań. Spostrzeżenia i wyniki z budów realizowanych w trakcie opracowywania wytycznych dla autorskiej metody zagęszczania oraz metody projektowania z uwzględnieniem punktu piaskowego i wpływu wilgotności na zagęszczenie miały bezpośredni wpływ na autorską metodę zagęszczania próbek.

Kierunki dalszych badań związanych z niniejszą rozprawą doktorską wskazywałyby na poszerzenie badań dla zweryfikowania autorskiej metody zagęszczenia większej ilości receptur z wykorzystaniem niestandardowych materiałów, np. recyklingowych. Przeprowadzone doświadczenia wykonane dla receptur C30/37L, C30/37R oraz C8/10P i C12/15P w metodzie autorskiej zagęszczenia próbek mogą być poszerzone o kombinacje dla mieszanek związanych [94] oraz betonów [16] w wilgotności optymalnej, które są wbudowywane metodą wałowania. Wykorzystanie betonu wałowanego nie tylko jako podbudowy, czy nawierzchnie w konstrukcji drogowej, ale również jako konstrukcje tam i zapór wodnych [2] są coraz bardziej powszechne, dlatego wdrożenie autorskiej metody zagęszczania i projektowania należy kontynuować w praktyce dla każdej klasy betonu wbudowywanego w wilgotności optymalnej.

Wdrożenie podczas realizacji pracy doktorskiej polegało na zweryfikowaniu doświadczeń z budowy i zoptymalizowaniu wbudowywanych receptur. Zastosowanie autorskiej metody zagęszczania próbek pozwoliło na rzetelne wskazanie możliwości obniżenia zawartości cementu w recepturze. W toku badań prowadzonej rozprawy doktorskiej przeszkolono zespół technologów firmy HOLCIM POLSKA S.A., w celu zwrócenia uwagi na projektowanie i dobór prawidłowej metody zagęszczenia dla betonu w wilgotności optymalnej. Możliwość przyspieszenia wykonania próbek jest bardzo istotna dla optymalizacji prac w laboratoriach. Szybsze przygotowanie próbek sprzyja również braku utraty wilgoci z mieszanki, która jest ściśle zależna od wytrzymałości, co udowodniono w niniejszej pracy. Przewiduje się wprowadzenie stanowiska badawczego autorskiego metody w laboratoriach HOLCIM POLSKA S.A., celem optymalizacji ekonomicznej receptur i ułatwienia pracy w laboratoriach.

8. Literatura

1. J. W. Salamon, K. G. Hansen, Ewolucja w zastosowaniu betonu wałowanego do budowy zapór wodnych, Cement Wapno Beton (2018/3), czerwiec 2018.
2. ACI.325.10 Report on Roller-Compacted Concrete Pavements (Reapproved 2001)
3. M. Akbarian (2015), Quantitative sustainability assessment of pavement-vehicle interaction: from bench-top experiments to integrated road network analysis. Doctoral thesis at MIT, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.
4. P. Heinrich, P. Moszczak, Ronda z betonu cementowego, zasady projektowania. IV Forum Beton w Drogownictwie, Kraków 23.10.2024 r.
5. H. Akbari, D. Matthews, H. D. Seto (2012), The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. Environmental Research Letters, 7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024004>
6. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie.
7. T. Rudnicki, P. Stałowski, Fast-Setting Concrete for Repairing Cement Concrete Pavement, 2023, DOI: 10.3390/ma161759091
8. P. Mackiewicz, A. Szydło, Doświadczenia przy projektowaniu i budowie nawierzchni betonowych w Polsce, Budownictwo, Technologia, Architektura, wyd. styczeń – marzec 2017.
9. B. Krawczyk, A. Szydło, P. Mackiewicz, D. Dobrucki, Przydatność kruszyw z recyklingu nawierzchni betonowych do warstw z niezwiązanych i związanych cementem, <https://doi.org/10.7409/rabdim.018.003>
10. T. Rudnicki, Nawierzchnie z betonu cementowego o obniżonym śladzie węglowym, IV Forum Beton w Drogownictwie, 23.10.2024 r. Kraków
11. P. Kijowski, P. Stałowski, Nawierzchnie Betonowe w Praktyce i Kierunki Rozwoju., LXIV Techniczne Dni Drogowe, Łódź 6-8 Listopada 2023 r.
12. PN-EN 12350-2 Badania mieszanki betonowej -- Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
13. Z. Wiłun, Zarys Geotechniki, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ, 2013

14. Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych, Nawierzchnie betonowe, D-05.03.04, v03, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2025
15. M. R. Dutkiewicz, A. Yildirim, P. Stałowski, H. E. Yucel, Roller compacted concrete technology for vehicle parking area solutions MATEC Web of Conferences 396, Maj 2024, DOI: 10.1051/mateconf/202439601001
16. PN-EN 206+A2:2021-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
17. PN-EN 12350-3:2019-07/Apl:2023-05 Badania mieszanek betonowej -- Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe
18. U. Marushchack, Design of roller compacted concrete composition, Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, May – 2021, DOI: 10.30977/BULL.2219-5548.2021.92.2.12
19. J. Patel, N. Gupta, R.K. Grouhan, M. Mudgal, "Structural Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer for Roller-Compacted Concrete Pavement, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004438, American Society of Civil Engineers.
20. P.N. Ojha, Brijesh Singh, Shivam Prakash, Pranay Singh, Effect of high ratio fly ash on roller compacted concrete for dam construction, Research on Engineering Structures and Materials, February 2022, DOI: 10.117515/resm2022.374ma1216
21. P. Łukowski, Rola domieszek we współczesnej technologii betonu, Materiały budowlane 10 '2015 (nr 518) ISSN 0137-2971, e-ISSN 2449-951X, DOI: 10.15199/33.2015.10.32,
22. E. Janowska-Renkas, D. Matyjaszczyk, Wpływ domieszek chemicznych o różnym działaniu na właściwości zaczynów i zapraw cementowych, Rocznik Inżynierii Budowlanej – zeszyt 17/2017 Komisja Inżynierii Budowlanej Oddział Polskiej Akademii Nauk w Katowicach
23. L. Czarnecki, Domieszki do betonu – możliwości i ograniczenia, Budownictwo, Technologie Architektura, Polski Cement, Zeszyt specjalny: Domieszki do betonu, (2003), 4-6
24. M. Szruba, Domieszki chemiczne i dodatki modyfikujące właściwości betonu. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 2 (2016), 22-27
25. S. K. Agarwal, I. U. Masood, S. K. Malhotra, Compatibility of superplasticizers with different cements, Construction and Building Materials, 14 (2000), 253-259.

26. S. Góralczyk, D. Kukielska, Surowce wtórne bazą zasobową do produkcji kruszyw, *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej* Nr 136, *Studia i materiały* nr 43, 2013.
27. D. Sybilski, Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu, *Rozwój Innowacji Drogowych RID*, Załącznik nr 9.6, 2018.
28. E. Helsing, L. Brader, P. Matinsson, Durability of Concrete with Recycled Aggregate, *Nordic Concrete Research – Publ. No. NCR 71 – ISSU 2/2024 – Article 4*, p.69-89, DOI:10.2478/ncr-2024-0014
29. M. Q. Khalid, Z. K. Abbas, Recycled Concrete Aggregated for the use in Roller Compacted Concrete: A Literature Review, *Journal of Engineering*, Volume 29, Number 3, March 2023.
30. K. Boulgebar, A. H. Sadok, A. Brahma, Effect of recycled brick sand on mechanical and transfer properties of roller compacted concrete “RCC” used for dams, *Revistamateria*, ISSN 1517-7076 articles e20240703, 2025.
31. O. Y. Bayraktar, S. Turhal, A. Benli, J. Shi, G. Kaplan, Application of recycled aggregates and biomas ash in fibre-reinforced green roller compacted concrete pavement-technical and environmental assessment, *International Journal of Pavement Engineering*, February 2025, DOI: 10.1080/10298436.2458140
32. S. Q. Abd Almajeed, Z. K. Abbas, Eco Friendly Roller Compacted Concrete: A review, *Joruanl of Engineering*, Volume 30, Number 7, July 2024
33. Z. M. Abed, W. I. Khalil, H. K. Ahmed, Effect of waste tire products on some characteristics of roller-compacted concrete, *Open Engineering* 2024, 14:20220559, <http://doi.org/10.1515/eng-2022-059>
34. N. Maafi, A. Benammar, A. Benouadah, O. Kessal, The Effects of Polypytylene Fibers on the Mechanical and Durability Performance of a Roller Comapcted Concrete for Pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology*, May 2023, DOI: 10.1007/s42947-023-00329-4
35. H. F. Mahmood, M. Abu-Bakhr, Different Mineral Admixture in Roller Compacted Concrete, *Journal of University of Duhok*, Vol. 26, No.2 (Pure and Engineering Sciences), Pp. 179-188, 2023 4th International Conferences on Recent Innovations in Engineering, <http://doi.org/10.26682/csjuod.2023.26.2.18>
36. A. Nadeem, S. A. Memon, T. Y. Lo, The Performance of Fly Ash and Metakaolin Concrete at Elevated Temperatures, *Constr. Build. Mater.* 2014, 62, 67-76.

37. S. Hesami, M. Soltaninejad, H. Madani, Mechanical properties of Roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Constr. Build Mater* 111:625–636, 2016
38. M. Meghwar, A. K. Hindu, Sustainable Roller Compacted Concrete: Assessing the Potential of Rice Husk as a Cement Partial Replacement, *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, January 2024, DOI: 10.56726/IRJMET49007
39. S. Hesami, S. Ahmadi, M. Nematzadeh, Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement *Constr. Build Mater* 53:680–691, 2014
40. M. H. Yaseen, S. F. Hashim, E. T. Dawood, M. Azmi, M. Johari, Evaluating the Impact of Pumice on the Production and Durability of Lightweight Roller Compacted Concrete, *Research Square*, March 2025, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6138360/v1>
41. G. Lütfullah, Ş. O. Kalkan. 2023. “Use of Pumice Aggregate in Cementitious Rheoplastic Lightweight Concrete.” *Journal of Sustainable Construction 57–Materials and Technologies* 8 (1):65. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1214086>.
42. A. Abbas, M. Mathura, P. Saru, B Ayati, F. Kanavaris. 2023. “Development of Low-Carbon Lightweight Concrete Using Pumice as Aggregate and Cement Replacement.” In 280 Rilem Bookseries, – 90. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33187-9_27
43. B. A. V. Ram Kumar, G. Ramakrishna, Performance Evaluation of Sustainable Materials in Roller Compacted Concrete Pavements: a State of Art Review, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7:78, 2022, <https://doi.org/10.1007/s41024-022-00212-y>
44. M. Frigione, Recycling of PET bottles as fine aggregates in concrete. *Waste Manage* 30:1101-1106, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>
45. R. Maddalena, J.J. Roberts, A. Hamilton, Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *J Clean Prod* 186(Jun):933–942., 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>
46. S. Debbarma, G. D. Ransinchung, R. N. Surender, Singh, Feasibility of Roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. *Constr. Build Mater* 199:508–525, 2019

47. S. Xuebao, Combination of high content limestone powder and fly ash used in RCC, *Journal of Hydraulic Engineering* 48 (4), p. 488-495, April 2017, DOI:10.13243/j.cnk.sixb.20160615
48. PN-B-06265:2022-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność -- Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
49. M. Khalafalla, The Recent Development in Roller Compacted Concrete, *BIE Journal of Engineering and Applied Sciences*, Volume 5 Issue 2 – December 2014
50. M. Hashemi, A. Ahrari, I. Asadi, Sustainable roller-compacted concrete pavement; a solution to reduce carbon dioxide footprint, 5th International Conference on Mechanical, Construction Industrial & civil Engineering, 31 December 2020 – Montreal
51. R. Nagalakshmi, Experimental study on strength characteristics on M25 concrete with partial replacement of cement with fly ash and coarse aggregate with coconut shell. *International Journal of Science&Engineering Research*, 4(1).
52. T. Rudnicki, P. Stałowski, Performance Research of Cement Concrete Pavements with a Lower Carbon Footprint, *Materials*, June 2024, DOI: 10.3390/ma17133162
53. P. Woyciechowski, K. Harat, Nawierzchnia drogowa z betonu wałowanego, *Budownictwo Technologie Architektura* nr 1 (57) 2012.
54. M. Gruszczyński, Beton wałowany – szansą na tanie i trwałe drogi lokalne, *Politechnika Krakowska, Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce, Przegląd Budowlany* 1/2016
55. M. Dutkiewicz, A. Yildirim, P. Stałowski, H. E. Yücel, Roller Compacted Concrete Technology for Vehicle Parking Area Solutions, *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium*, 4-8.9.2023 Prague Czech Republic.
56. J. R. Berry, D. S. Tayabji, Report on Roller-Compacted Concrete Pavements ACI, http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/32510r_95.pdf
57. M. Senderski, Beton wałowany – idea i zastosowanie, *Inżynier Budownictwa*, 29.04.2015, <https://inzynierbudownictwa.pl/beton-walowany-idea-i-zastosowanie/>
58. S. K. Rao, P. Sravana, T. C. Rao, Design and analysis of Roller compacted concrete pavements in low volume roads in India, *J. Civil Eng.* 5, 2015
59. S. Butnik, A. Mozgovyi, Prospect of application of roller compacted concrete in hydro schemes of Ukraine, *E3S Web of Conferences* 280, 03004 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128003004>

60. D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. Hazaree, Guide for Roller Compacted Concrete Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, August 2010
61. L. Gáspár, Z. Bencze, Roller compacted cement concrete (RCC) pavement, *Dorogi i mosty* 2020(21):120-129, DOI: 10.36100/dorogimosti2020.21.120
62. Ch. Chhorn, Y. K. Kim, S. J. Hong, J. Park, S. W. Lee, A study on Performance of Roller-Compacted Concrete Pavemtn in Accelerated Pavement Tests, *Journal of Testing and Evaluation* 48(4), June 2020, DOI: 10.1520/JTE20170390
63. J. L. Larson, Roller-Compacted Concrete Pavement Design Practices for Intermodal Freight Terminals at the Port of Tacoma, Facing the Challenge The Intermodal Terminal of the Future, New Orleans, LA, March 2–5, 1986, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 22–29.
64. Z. Wu, M. Mahdi, Roller Compacted Concrete over Soil Cement under Accelerated Loading, presented at Airfield and Highway Pavements 2015, Miami, FL, June 7–10, 2015, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 418–428.
65. A. R. A. Hamid, R. Zulkifli, M. F. Arshad, J. Ahmad, Construction of Roller Compacted Concrete Dam: A Case Study at Batu Hampar Dam, Researchgate Chapter July 2015, DOI: 10.13140/RG.2.1.4024.3923
66. M. Conrad, Some aspects of the Roller Compacted Concrete technology for dams – Experiences of a Swiss consultant, Researchgate Chapter May 2011
67. Q. H. W. Shaw, Chapter 2 : RCC Construction, RCC Mixes, RCC Instrumentation & RCC Dams Study. University of Pretoria: Ph.D. Thesis, 2011
68. C. Wagner, Batu Hampar dam - design and construction of an RCC dam. *Dams and Reservoirs*, 21(2), 77-90, 2011
69. Metoda nuklearna badania betonu – norma – UZUPEŁNIĆ.
70. J. Stępień, A. Chomicz-Kowalska, M. Tutaj-Dudała, M. Dudała, K. Maciejewski, P. Ramiączek, M. M. Iwański, Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces, *Materials* 2025, 18, 492, <https://doi.org/10.3390/ma18030492>
71. M. Selvan, S. Singh, Comparative investigation of laboratory and field compaction techniques for designing roller compacted concrete pavements (RCCP), *Journal of Pavement Engineering*, February 2023, DOI: 10.1080/10298436.2023.2177850

72. ASTM C1435 (ASTM 2010) Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer
73. ASTM C1800 (ASTM 2016) Standard Test Method for Determining Density of Roller-Compacted Concrete Specimens Using the Gyratory Compactor (Withdrawn 2025)
74. H. R. Hassoun, Z. K. Abbas, Effect of Production and Curing Methods on the Properties of Roller-Compacted Concrete: A Review, *Journal of Engineering*, Colume 30, Number 9, September 2024
75. H. K. Ahmed, I. K. Gata, Effect of practical curing methods on the properties of roller compacted concrete, *Engineering and Technology Journal*, 33, 2015.
76. N. Saoudi, H. Cherfa, B Saoudi, B. Zaanoun, The Compaction of Energy and properties of Roller-Compacted Concrete Pavement with Fillers, *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 30, 2022, No. 4, 23-30. DOI: 10.2478/sjce-2022-0025
77. I. Kiliç, Effect of Compaction Time With Vibrating Hammer on Strenght Properties in roller Compacted Concrete, *Euroasia Journal of Mathematics, Natural&Medical Sciences International Indexed and Refereed*, ISSN 2667-6702, 2022
78. E. Sengun, R. Shabani, M. A. Aykutlu, Comparison of Laboratory Practices for Roller Compacted Concrete Pavements, *Conference Paper – June 2018*
79. M. Selvan, R. K. Kandasami, N. Kalyan, S. Singh, Assesing the effect of different compaction mechanisms on the internal structure of roller compacted concrete, *Construction and Building Materials*, December 2022, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130072
80. C. Chhorn, S. W. Lee, Consistency control of roller-compacted concrete for pavement, *KSCE Journal of Civil Engineering* 21, 1757-1763, 2017, <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0820-y>
81. M. Selvan, S. Singh, Material selection and mixture proportioning methods sustainable roller-compacted concrete pavements – A state-of-art review, *Construction Building Materials* 317, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125838>
82. C. Elipse, J. W. Kim, B. S. Ohm, Performance Evaluation on the Application of MAST and RCC on a Cambodian Rural Road: A Case Study, *Buildings* 2023, 13, 2993, <https://doi.org/10.3390/buildings13122993>
83. A. Szydło, P. Mackiewicz, R. Wardęga, B. Krawczyk, Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.

84. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad: Ogólne Specyfikacje Techniczne, rozdział III: PRACE KONSTRUKCYJNE, dział 06: Nawierzchnie betonowe, 06.02: Nawierzchnia z betonu wałowanego, Warszawa 21.07.2014
85. PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
86. PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
87. PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu
88. PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu. Część 3 --Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań
89. PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 Badania betonu -- Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających – Złuszczenie
90. PN-EN 13877-1:2007 Nawierzchnie drogowe. Część 1: Materiały
91. PN-EN 13877-2:2007 Nawierzchnie drogowe Część 2: wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowej
92. PN-EN 14188-1:2010 Wypełniacze szczelin i zalewy drogowe -- Część 1: Wymagania wobec zalew drogowych na gorąco
93. PN-EN 934-2+A1:2012 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 2: Domieszki do betonu. Definicje, wymagania, zgodność, znakowanie i etykietowanie
94. PN-EN 14227-1:2013-10 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym -- Specyfikacje -- Część 1: Mieszanki związane cementem
95. PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie -- Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody -- Zagęszczanie metodą Proktora
96. PN-S-96014:1997 Drogi samochodowe i lotniskowe -- Podbudowa z betonu cementowego pod nawierzchnię ulepszoną -- Wymagania i badania
97. Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o wyrobach budowlanych, Dz.U. 2004 nr 92 poz. 881
98. PN-EN 13242+A1:2010 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym
99. Ł. Marcinkiewicz, T. Rudnicki, Optymalny jakościowo i ekonomicznie dobór materiałów budowlanych, Seminarium Samorządowca organizowane w ramach programu „Dobry

- Gospodarz” organizowane przez Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2022.
100. Przebudowa drogi gminnej nr 111099L Czerniczyn – Kozodawy w Gminie Hrubieszów – Wykonawca Cemex, źródło – dane Stowarzyszenia Producentów Cementu z dnia 16.12.2024 r. zebranie Komitetu Drogowego.
 101. PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania
 102. Załącznik 1. Procedura badawcza GDDKiA PB/1/18. Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1M roztworze NaOH w temperaturze 80⁰ C.
 103. Karta Charakterystyki dla cementu CEM II/A-V 42,5 R, CEM II/A-S 42,5 R Zgodna z Rozporządzeniem (WE) Nr 1907/2006 (REACH) wraz z późniejszymi zmianami
 104. PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu -- Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu
 105. PN-EN 12350-7:2019-08/AC:2022-03 Badania mieszanki betonowej -- Część 7: Zawartość powietrza -- Metody ciśnieniowe
 106. S. Majer, Zagęszczalność gruntów niespoistych a wskaźnik jednorodności uziarnienia, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym, Poznań 3-4 września 2009.
 107. PN-S 02205:1998 Drogi samochodowe -- Roboty ziemne -- Wymagania i badania
 108. W. Jackiewicz-Rek, Reaktywność alkaliczna kruszywa, Materiały budowlane nr 11, 2015.
 109. PN-S 96012:1997 Drogi samochodowe – Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem
 110. PN-EN 12350-2 Badania mieszanki betonowej -- Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka

9. Spis załączników

1. Załącznik 1 - Deklaracja Właściwości Użytkowych Nr Sep/0-2/24/01/12620/15015076 – kruszywo 0/2 mm z Kopalni Sępólno Wielkie
2. Załącznik 2 – Deklaracja Właściwości Użytkowych Nr Sep/2-8/24/01/12620/15015070 – kruszywo 2/8 mm z Kopalni Sępólno Wielkie
3. Załącznik 3 – Deklaracja Właściwości Użytkowych Nr Sep/8-16/24/01/12620/15015067 – kruszywo 8/16 mm z Kopalni Sępólno Wielkie
4. Załącznik 4 – Deklaracja Właściwości Użytkowych Nr 1487-CPR-023-02 – Cement Portlandzki CEM I 42,5 R
5. Załącznik 5 – Deklaracja Właściwości Użytkowych Nr 1487-CPR-023-04 – Cement Portlandzki Popiołowy CEM II/A-V 42,5 R
6. Załącznik 6 – Karta Informacyjna Produktu Sika Luftporenbildner LPS A-94 – domieszka napowietrzająca
7. Załącznik nr 7 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania. Kruszywo drobne 0/2 mm Sępólno Wielkie
8. Załącznik nr 8 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania. Kruszywo drobne 0/2 mm Kopalnia Łojewo
9. Załącznik nr 9 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania. Kruszywo grube 2/8 mm Sępólno Wielkie
10. Załącznik nr 10 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania. Kruszywo drobne 2/8 mm Kopalnia Łojewo
11. Załącznik nr 11 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania. Kruszywo grube 8/16 mm Sępólno Wielkie
12. Załącznik nr 12 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania. Kruszywo drobne 8/16 mm Kopalnia Łojewo
13. Załącznik nr 13 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania. Kruszywo grube 2/16 mm Aggneo – kruszywo z recyklingu
14. Załącznik nr 14 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania. Kruszywo grube 4/16 mm Aggneo – kruszywo z recyklingu

15. Załącznik nr 15 – receptura laboratoryjna RCC C30/37
16. Załącznik nr 16 - Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania wg Proctora
17. Załącznik nr 17 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania wg Proctora
18. Załącznik nr 18 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania wg Proctora
19. Załącznik nr 19 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania – młot ręcznie
20. Załącznik nr 20 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania – młot ręcznie
21. Załącznik nr 21 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania – młot ręcznie
22. Załącznik nr 22 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania – metoda autorska
23. Załącznik nr 23 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania – metoda autorska
24. Załącznik nr 24 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania – metoda autorska
25. Załącznik nr 25 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania – metoda autorska
26. Załącznik nr 26 – Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań” – metoda przygotowania – metoda autorska
27. Załącznik nr 27 – receptura laboratoryjna RCC C30/37Ł
28. Załącznik nr 28 – receptura laboratoryjna RCC C30/37R
29. Załącznik nr 29 – receptura laboratoryjna RCC C8/10P
30. Załącznik nr 30 – receptura laboratoryjna RCC C12/15P
31. Załącznik nr 31 – Recepta RCC C30/37Z

ZAŁĄCZNIK 1



DEKLARACJA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH

Nr SEP/0-2/24/01/12620/15015076

1. Niepowtarzalny kod identyfikacyjny typu wyrobu: **Kruszywo drobne 0/2 mm - P323 - 15015076**
2. Zamierzone zastosowanie lub zastosowania: **Przygotowanie betonu do zastosowań w budynkach, do dróg i innych obiektów budowlanych**
3. Producent: **Holcim Kruszywa sp. z o.o. ul. Aleje Jerozolimskie 142B; Żwirownia Sępólno, Sępólno Wielkie, 78-425 Białe Bórze**
4. System(-y) oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych: **System 2+**
5. Norma zharmonizowana: **EN 12620:2002+A1:2008**
6. Jednostka lub jednostki notyfikowane: **Instytut Materiałów Budowlanych i Technologii Betonu Sp. z o.o. nr notyfikacji 2311**
7. Deklarowane właściwości użytkowe:

Zasadnicze charakterystyki	Właściwości użytkowe	
Kształt, wymiar i gęstość ziarn	Wymiar kruszywa $d/D, mm$	0/2
	Uziarnienie	Gr85
	Tolerancja uziarnienia	NPD
	Wskaźnik kształtu, SI	NPD
	Wskaźnik płaskości, FI	NPD
	Gęstość objętościowa ziarn, $Mg/m^3, \rho_a$	2,66 (+/- 0,1)
	Gęstość ziarn wysuszonych w suszarce, $Mg/m^3, \rho_{sd}$	2,60 (+/- 0,1)
	Gęstość ziarn nasączonych i powierzchniowo osuszonych, $Mg/m^3, \rho_{ssd}$	2,63 (+/- 0,1)
Nasiąkliwość	Nasiąkliwość, WA_{24}	$WA_{24}1$
Obecność zanieczyszczeń	Zawartość mułu, S.C	NPD
	Pyły, f %	f ₁
Odporność na rozdrabnianie/ kruszenie	Odporność na rozdrabnianie, LA	NPD
	Odporność na ścieranie, M_{10}	NPD
Odporność na polerowanie/ ścieranie abrazyjne/ ścieranie	Odporność na polerowanie, PSV	NPD
	Odporność na ścieranie powierzchniowe, AAV ₁₀	NPD
	Odporność na ścieranie abrazyjne przez opony z kołcami, A ₁₀ X	NPD
	Chlorki	<0,02
Skład/ zawartość	Sierpczany rozpuszczalne w kwasie, AS	AS ₀₂
	Siarka całkowita, S	Spełnia wartość graniczną
	Składniki kruszyw naturalnych, które zmieniają szybkość wiązania i twardnienia betonu	Spełnia wartość graniczną
	Zawartość węgla w kruszywach drobnych do warstwy ścieralnej nawierzchni betonowych, CaCO ₂	NPD
	Stożek objętości	Spełnia wartość graniczną
Trwałość a zamrażanie- rozmrażanie	Mrozoodporność, F %	NPD
Trwałość a reaktywność alkaliczno - krzemionkowa	Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa	Stopień 0
Substancje niebezpieczne	Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l	Al < 0,291 As < 0,050 Ba < 0,050 Cd < 0,0005 Co < 0,005 Cr < 0,005 Cu < 0,009 Mo < 0,005 Ni < 0,005 Pb < 0,010 V < 0,005 Zn < 0,050

Właściwości użytkowe wyżej określonego wyrobu są zgodne z zestawem deklarowanych właściwości użytkowych. Niniejsza deklaracja właściwości użytkowych wydana zostaje zgodnie z rozporządzeniem (UE) nr 305/2011 na wyłączną odpowiedzialność producenta określonego powyżej.

W imieniu producenta podpisał(-a):

Kierownik Jakości i Rozwoju Kruszyw: Dariusz Sprawa

Dariusz Sprawa

Kierownik Jakości i Rozwoju Kruszyw

Sępólno Wielkie, 01.02.2024

(podpis)

(miejsce i data wydania)

140:56180852

ZAAŁĄCZNIK 2



DEKLARACJA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH

Nr SEP/2-8/24/01/12620/15015070

1. Niepowtarzalny kod identyfikacyjny typu wyrobu: **Kruszywo grube 2/8 mm – P323- 15015070**
2. Zamierzone zastosowanie lub zastosowania: **Przygotowanie betonu do zastosowań w budynkach, do dróg i innych obiektów budowlanych**
3. Producent: **Holcim Kruszywa sp. z o.o. ul. Aleje Jerozolimskie 142B; Zwirownia Sępólno, Sępólno Wielkie, 78-425 Białe Bórze**
4. System(-y) oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych: **System 2+**
5. Norma zharmonizowana: **EN 12620:2002+A1:2008**
6. Jednostka lub jednostki notyfikowane: **Instytut Materiałów Budowlanych i Technologii Betonu Sp. z o.o. nr notyfikacji 2311**
7. Deklarowane właściwości użytkowe:

Zasadnicze charakterystyki	Właściwości użytkowe	
Kształt, wymiar i gęstość ziarn	Wymiar kruszywa d/D, mm	2/8
	Uziarnienie	Gr85/20
	Tolerancja uziarnienia	NPD
	Przesiew przez sito pośrednie D/1,4	NPD
	Wskaźnik kształtu, SI	SI ₁₀
	Wskaźnik płaskości, FI	FI ₁₀
	Gęstość objętościowa ziarn, Mg/m ³ , ρ _a	2,69 (+/- 0,1)
	Gęstość ziarn wysuszonych w suszarce, Mg/m ³ , ρ _{rd}	2,62 (+/- 0,1)
Nasiąkliwość	Gęstość ziarn nasączonych i powierzchniowo osuszonych, Mg/m ³ , ρ _{ssd}	2,64 (+/- 0,1)
	Nasiąkliwość, W _{A_m}	W _{A_m} 1
	Zawartość muszli, S.C	NPD
Obecność zanieczyszczeń	Pyły, f%	f _{1,5}
Odporność na rozdrabnianie/ kruszenie	Odporność na rozdrabnianie, LA	LA ₂₅
	Odporność na ścieranie, M ₁₀	M ₁₀ 15
Odporność na polewanie/ ścieranie abrazyjne/ ścieranie	Odporność na polewanie, PSV	PSV ₄₈
	Odporność na ścieranie powierzchniowe, AAV ₁₀	NPD
	Odporność na ścieranie abrazyjne przez opony z kolcami, A ₁₀ X	NPD
	Chlorki	<0,02
Skład/ zawartość	Sierczany rozpuszczalne w kwasie, AS	AS _{0,2}
	Silka całkowita, S	Spełnia wartość graniczną
	Składniki kruszyw naturalnych, które zmieniają szybkość wiązania i twardnienia betonu	Spełnia wartość graniczną
	Zawartość węgla w kruszywach drobnych do warstwy ścieralnej nawierzchni betonowych, CaCO ₃	NPD
	Stalność objętości	Spełnia wartość graniczną
Trwałość a zamarzanie- rozmrażanie	Stalność objętości - skurcz przy wysychaniu	Spełnia wartość graniczną
Trwałość a reaktywność alkaliczno - krzemionkowa	Mrozoodporność, F %	F ₃
	Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa	Stopień 0
Substancje niebezpieczne	Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l	Al < 0,291 As < 0,050 Ba < 0,050 Cd < 0,0005 Co < 0,005 Cr < 0,005 Cu < 0,009 Mo < 0,005 Ni < 0,005 Pb < 0,010 V < 0,005 Zn < 0,050

Właściwości użytkowe wyżej określonego wyrobu są zgodne z zestawem deklarowanych właściwości użytkowych. Niniejsza deklaracja właściwości użytkowych wydana zostaje zgodnie z rozporządzeniem (UE) nr 305/2011 na wyłączną odpowiedzialność producenta określonego powyżej.

W imieniu producenta podpisali(-a):

Kierownik Jakości i Rozwoju Kruszyw: Dariusz Sprawa

Dariusz Sprawa

Kierownik Jakości i Rozwoju Kruszyw

Sępólno Wielkie, 01.02.2024

(podpis)

(miejsce i data wydania)

141:65547388

ZAŁĄCZNIK 3



DEKLARACJA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH

Nr SEP/8-16/24/01/12620/15015067

- Niepowtarzalny kod identyfikacyjny typu wyrobu: Kruszywo grube 8/16 mm - P323 - 15015067
- Zamierzone zastosowanie lub zastosowania: Przygotowanie betonu do zastosowań w budynkach, do dróg i innych obiektów budowlanych
- Producent: Holcim Kruszywa sp. z o.o. ul. Aleje Jerozolimskie 142B; Żwirownia Sępólno, Sępólno Wielkie, 78-425 Białe Bórze
- System(-y) oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych: System 2+
- Norma zharmonizowana: EN 12620:2002+A1:2008
- Jednostka lub jednostki notyfikowane: Instytut Materiałów Budowlanych i Technologii Betonu Sp. z o.o. nr notyfikacji 2311
- Deklarowane właściwości użytkowe:

Zasadnicze charakterystyki	Właściwości użytkowe	
Kształt, wymiar i gęstość ziarna	Wymiar kruszywa d/D, mm	8/16
	Uziarnienie	Gr85/20
	Tolerancja uziarnienia	NPD
	Przesiew przez sito pośrednie D/1,4	NPD
	Wskaźnik kształtu, SI	SI ₁₀
	Wskaźnik płaskości, FI	FI ₁₀
	Gęstość objętościowa ziarna, Mg/m ³ , ρ _a	2,69 (+/- 0,1)
	Gęstość ziarna wysuszonych w suszarce, Mg/m ³ , ρ _{sd}	2,62 (+/- 0,1)
Nasiąkliwość	Gęstość ziarna nasączonych i powierzchniowo osuszonych, Mg/m ³ , ρ _{ssd}	2,64 (+/- 0,1)
	Nasiąkliwość, WA ₂₄	WA ₂₄ 1
Obecność zanieczyszczeń	Zawartość muszli, S.C	NPD
	Pyły, f %	f _{1,5}
Odporność na rozdrabnianie/ kruszenie	Odporność na rozdrabnianie, LA	LA ₂₅
	Odporność na ścieranie, M ₁₀	M ₁₀ 15
Odporność na polewanie/ ścieranie abrazyjne/ ścieranie	Odporność na polewanie, PSV	PSV ₄₆
	Odporność na ścieranie powierzchniowe, AAV ₁₀	NPD
	Odporność na ścieranie abrazyjne przez opony z kółkami, A ₁₀ X	NPD
	Chlorki	<0,02
Skład/ zawartość	Szorstki rozpuszczalne w kwasie, AS	AS ₁₀ 2
	Szorstki całkowite, S	Spełnia wartość graniczną
	Składniki kruszyw naturalnych, które zmieniają szybkość wiązania i twardnienia betonu	Spełnia wartość graniczną
	Zawartość węgla w kruszywach drobnych do warstwy ścierniczej nawierzchni betonowych, CaCO ₂	NPD
	Stalność objętości	Spełnia wartość graniczną
Trwałość a zamarzanie- rozmrażanie	Mrozoodporność, F %	F ₁
Trwałość a reaktywność alkaliczno - krzemionkowa	Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa	Stopień 0
Substancje niebezpieczne	Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l	Al < 0,291
		As < 0,050
		Ba < 0,050
		Cd < 0,0005
		Co < 0,005
		Cr < 0,005
		Cu < 0,009
		Mo < 0,005
		Ni < 0,005
		Pb < 0,010
		V < 0,005
		Zn < 0,050

Właściwości użytkowe wyżej określonego wyrobu są zgodne z zestawem deklarowanych właściwości użytkowych. Niniejsza deklaracja właściwości użytkowych wydana zostaje zgodnie z rozporządzeniem (UE) nr 305/2011 na wyłączną odpowiedzialność producenta określonego powyżej.

W imieniu producenta podpisał(-a):

Kierownik Jakości i Rozwoju Kruszyw: Dariusz Sprawa

Dariusz Sprawa

Kierownik Jakości i Rozwoju Kruszyw

Sępólno Wielkie, 01.02.2024

(podpis)

(miejsce i data wydania)

142:47836145

DEKLARACJA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH Nr 1487-CPR-023-02

- Nagłówek/any kod identyfikacyjny typu wyrobu:
Cement portlandzki EN 197-1 – CEM I 42,5 R
- Zamierzane zastosowanie lub zastosowania:
Przygotowanie betonu, zapraw, szalicy i innych mieszanek dla budownictwa i do produkcji wyrobów budowlanych
- Producent:
Holcim Polska S.A.
ul. Warszawska 110, 28-366 Małogoszcz
Zakład: Cementownia KULAWY w Bielawach, 88-192 Piechocin
- System(-y) użyty i wykazany(-e) standard(-y) właściwości użytkowych:
System 1+
- Nazwa normizacyjna:
EN 197-1:2011 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
Jednostka lub jednostki notyfikowane
Ścieżka Badawcza: Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych,
Jednostka notyfikowana Nr 1407
- Deklarowane właściwości użytkowe:

Zasadnicze charakterystyki	Właściwości użytkowe	Zharmonizowana specyfikacja techniczna
Cement powszechnego użytku (eutrodziwny), składnik i sole	Kliniator cementu portlandzkiego 95 ± 100%, Składnik drugorzędny 0 ± 5%	EN 197-1:2011
Wytrzymałość na ściskanie: - wczesna, po 2 dniach - normalna, po 28 dniach	Klasa wytrzymałości 42,5 R 220,0 MPa 42,5 ± 62,5 MPa	
Początek czasu wiązania	≤ 60 min	
Pozostałość nierozpuszczalna	≤ 5,0%	
Strata pękania	≤ 5,0%	
Stężenie objętości: - rozpuszczalność zawartość siarczków (jako SO ₃) zawartość chlorków	≤ 10 mm ≤ 4,0% ≤ 0,10%	

Właściwości użytkowe określonego powyżej wyrobu są zgodne z zezwaniem deklarowanych właściwości użytkowych.

Niniejsza deklaracja właściwości użytkowych wydawana została zgodnie z rozporządzeniem (UE) nr 305/2011 na wyłączną odpowiedzialność producenta określonego powyżej.

W imieniu producenta podpisał:

Tomasz Błady – Dyrektor Cementowni Kulawy


 Dyrektor Cementowni Kulawy
 Tomasz Błady
 (podpis)

Bielawy, dnia 1 lutego 2024 roku.

Status zwozu: wydanie 08

Holcim Polska S.A.

ul. Warszawska 110, 28-366 Małogoszcz
 NIP: 526-00-60-765, REGON: 141643520
 KRS: 000062958 (Sąd Rejonowy w Kielcach X Wydział Gospodarczy KRS)
 Kapitał akcyjny: 8 1 328 500 opłacony w pełni, nr rejestrowy REGON: 000001037

www.holcim.pl

DEKLARACJA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH Nr 1487-CPR-023-04

1. Niepowtarzalny kod identyfikacyjny typu wyrobu:
Cement portlandzki popiołowy EN 197-1 – CEM IMA-V 42,5 R
2. Zamierzane zastosowanie lub zastosowania:
Przygotowanie betonu, zapraw, zaczynów i innych mieszanek dla budownictwa i do produkcji wyrobów budowlanych
3. Producent:
Holcim Polska S.A.
ul. Warszawska 110, 28-368 Małogoszcz
Zakład: Cementownia KUJAWY w Bielawach, 88-192 Piechcin
4. System(-y) oceny i metody(-y) statyst. właściwości użytkowych:
System 1+
5. Norma zharmonizowana:
EN 197-1:2011 Cement, Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku. Jednostka lub jednostki notyfikowane:
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych,
Jednostka notyfikowana Nr 1487
6. Deklarowane właściwości użytkowe.

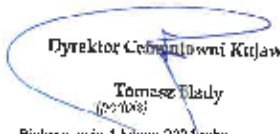
Zasadnicze charakterystyki	Właściwości użytkowe	Zharmonizowana specyfikacja techniczna
Cement powszechnego użytku (zubrodzony), składnik i skład	Klinkier cementu portlandzkiego 80 + 54% Popiół lotny klasa II/B po 20% Składnik II drugorzędna D + 6%	EN 197-1:2011
Wytrzymałość na ściskanie: - wczesna, po 2 dniach - i umiarkowana, po 28 dniach	Klasa wytrzymałości 42,5 R ≥ 20,0 MPa 42,5 + 62,5 MPa	
Przebieg czasu wiązania	≥ 60 min	
Stwierdzenie objętości: - rozszerzalność - zawartość H ₂ O	≤ 10 mm ≤ 4,0%	
Zawartość chlorków	≤ 0,10%	

Właściwości użytkowe określonego powyżej wyrobu są zgodne z zestawem deklarowanych właściwości użytkowych.

Niniejsza deklaracja właściwości użytkowych wydana została zgodnie z rozporządzeniem (UE) nr 305/2011 na wytyczną odpowiedzialności producenta określonego powyżej.

W imieniu producenta podpisam:

Tomasz Błady – Dyrektor Cementowni Kujawy


Dyrektor Cementowni Kujawy

Tomasz Błady

(podpis)

Bielawy, dnia 1 lipca 2024 roku

Stwierdzenie wykonania 08

Holcim Polska S.A.

ul. Warszawska 110, 28-368 Małogoszcz

NIP: 526-10-62-755, REGON: 011843520

KRS: 000062960 (Sąd Rejonowy w Kielcach X Wydział Gospodarczy KRS)

Kapitał akcyjny: 611.329.500 opłacony w pełni, nr rejestrowy BDO: 000051937

www.holcim.pl



KARTA INFORMACYJNA PRODUKTU

Sika® Luftporenbildner LPS A-94

Domieszka napowietrzająca do betonu

OPIS PRODUKTU

Sika® Luftporenbildner LPS A-94 jest domieszką napowietrzającą do betonów o szerokim spektrum konsystencji i zastosowań.

ZASTOSOWANIA

Sika® Luftporenbildner LPS A-94 jest odpowiednia do produkcji betonów od których wymaga się:

- dobrej urabialności,
- niskich wskaźników rozmieszczenia porów,
- wysokich stopni mrozoodporności.

Sika® Luftporenbildner LPS A-94 najczęściej stosuje się do:

- betonów drogowych o niskich klasach konsystencji i niskich wartościach w/c, również układanych maszynowo,
- betonów prefabrykacyjnych,
- betonów pompowych i innych betonów specjalnych, w których stosowanie domieszek napowietrzających innego typu jest mało efektywne.

CHARAKTERYSTYKA / ZALETY

Działanie domieszki w mieszance betonowej oparte jest na mechanizmie tworzenia w zaczynie cementowym bardzo drobnych pęcherzyków powietrza. Pozwala to uzyskać następujące właściwości mieszanki betonowej i betonu:

- poprawa urabialności na skutek napowietżenia,
- właściwa wielkość i rozmieszczenie porów,
- wysokie stopnie mrozoodporności w wodzie i roztworach soli.

Sika® Luftporenbildner LPS A-94 nie zawiera chlorków i innych związków chemicznych powodujących korozję stali zbrojeniowej. Może być stosowany bez ograniczeń do elementów i konstrukcji żelbetonowych oraz sprężonych.

INFORMACJE ŚRODOWISKOWE

- Przyczynia się do spełnienia wymagań kredytu Materiały i zasoby (MR): Materiały budowlane szczególnie i optymalizacja – Deklaracja Środowiskowa Produktu, w ramach LEED® v4.
- Deklaracja Środowiskowa Produktu (EPD) zgodna z EN 15804 zweryfikowana przez Institut für Bauen und Umwelt e.V. (IBU).

APROBATY / CERTYFIKATY

- Domieszka napowietrzająca (Tablica 5) zgodna z normą EN 934-2:2009+A1:2012, deklaracja właściwości użytkowych w oparciu o certyfikat zgodności zakładowej kontroli produkcji wydany przez notyfikowaną jednostkę certyfikującą zakładową kontrolę produkcji, oznakowany znakiem CE.

INFORMACJE O PRODUKCIE

Baza chemiczna	Modyfikowane tensydy
Pakowanie	Kontener: 1000 kg netto
Czas składowania	Produkt składowany w oryginalnym, nieuszkodzonym opakowaniu najlepiej użyć w ciągu 12 miesięcy od daty produkcji.
Warunki składowania	Produkt przechowywać w oryginalnym, nieuszkodzonym opakowaniu, w temperaturach od +5°C do +30°C, chronić przed mrozem i silnym nasłonecznieniem. Przy dostawach luzem stosować wyłącznie czyste pojemniki. Po dłuższym składowaniu produkt należy przemieszać przed użyciem.
Wygląd / Barwa	Brązowa, jednorodna ciecz
Gęstość	~1,00 kg/dm ³
Wartość pH	7,0 ± 1,0
Zawartość jonów chlorkowych	≤ 0,10 %
Równoważnik tlenu sodu	≤ 0,6 %

INFORMACJE O APLIKACJI

Zalecane dozowanie	0,05 - 1,0 % masy cementu, w zależności od oczekiwanego efektu. Z uwagi na specyfikę cementów i betonów drogowych i mostowych wymagane dozowanie wymaga weryfikacji polowej. Przy określonych eksperymentalnie niskich zakresach dozowania celowa jest zmiana domieszki na jej bardziej rozcieńczonej odmianę Sika® LPS A-945, a przy wysokich na bardziej stężoną Sika® Luftporenbildner LPS A.
Kompatybilność	Produkt zgodny z innymi domieszkami firmy Sika, szczególnie z domieszkami z grupy Sika® Plastiment®, Sikament®, Sika® ViscoCrete® i Sika® ViscoFlow®. W przypadku stosowania kombinacji domieszek konieczne jest wykonanie zarobów próbnych.

PODSTAWA DANYCH

Wszelkie podane dane techniczne bazują na próbach i testach laboratoryjnych. Praktyczne wyniki pomiarów mogą nie być identyczne w związku z okolicznościami, na które producent nie ma wpływu.

OGRANICZENIA

- Zastosowanie domieszki Sika® Luftporenbildner LPS A-94 umożliwia uzyskanie betonu wysokiej jakości, ale wszelkie powszechnie stosowane zasady betonowania nie mogą być pominięte. Świeży beton musi być odpowiednio pielęgnowany.
- W okresach obniżonych temperatur należy stosować powszechnie znane zasady betonowania w takich warunkach

EKOLOGIA, ZDROWIE I BEZPIECZEŃSTWO

Przed zastosowaniem produktów użytkownik jest zobowiązany do zapoznania się z zapisami aktualnych Kart Charakterystyki. Zawarte są w nich szczegółowe informacje dotyczące zdrowia, bezpieczeństwa stosowania, składowania i usuwania, a także dane dotyczą-

ce ekologii, właściwości toksykologicznych materiału itp.

INSTRUKCJA APLIKACJI

DOZOWANIE

Domieszkę należy dodawać do mokrej mieszanki w drugiej kolejności po domieszce uplastyczniającej lub upłynniającej. Czas mieszania po dodaniu wody i domieszki powinien być indywidualnie określany, minimalny czas mieszania wynosi 45 sekund. Czas mieszania zależy od rodzaju mieszarki i musi być starannie określony. Ilość wprowadzonych w beton porów powietrza zależy od wielu czynników np. takich jak: temperatura, skład mieszanki betonowej, czas mieszania, zagęszczanie, pompowanie itp. Podczas betonowania należy regularnie sprawdzać zawartość porów powietrza w betonie. Należy wykonać zaroby próbne.

NOTA PRAWNA

Informacje, a w szczególności zalecenia dotyczące działania i końcowego zastosowania produktów Sika Poland Spółka z o.o. z siedzibą w Warszawie (dalej: „Si-

Karta Informacyjna Produktu
Sika® Luftporenbildner LPS A-94
Kwiecień 2024, Wersja 01.03
021403021000000024

ka") są podane w dobrej wierze, przy uwzględnieniu aktualnego stanu wiedzy i doświadczenia Sika i odnoszą się do produktów składanych, przechowywanych i używanych zgodnie z zaleceniami podanymi przez Sika. Z uwagi na występujące w praktyce różnicowanie materiałów, substancji, warunków i sposobu ich używania i umieszczenia, pozostające całkowicie poza zakresem wpływu Sika, właściwości produktów podane w informacjach, pisemnych zaleceniach i innych wskazówkach udzielonych przez Sika nie mogą być podstawą do przyjęcia odpowiedzialności Sika w przypadku używania produktów niezgodnie z zaleceniami podanymi przez Sika. Użytkownik produktu jest zobowiązany do używania produktu zgodnie z jego przeznaczeniem i zaleceniami podanymi przez firmę Sika. Prawa własności osób trzecich muszą być przestrzegane. Sprzedaż, w której stroną sprzedającą jest Sika Poland, jest realizowana zgodnie z aktualnie obowiązującymi Ogólnymi Warunkami Sprzedaży Sika (w skrócie OWS), określającymi prawa i obowiązki stron umów sprzedaży towarów Sika. OWS stanowią integralną część wszystkich umów sprzedaży zawieranych z firmą Sika. Kupujący jest zobowiązany zapoznać się z postanowieniami aktualnie obowiązujących Ogólnych Warunków Sprzedaży Sika jeszcze przed ostatecznym uzgodnieniem wszystkich istotnych elementów umowy, w momencie podpisania umowy lub złożenia zamówienia, a najpóźniej w momencie odbioru towaru, kupujący jest także zobowiązany do zapoznania się z informacjami zawartymi w aktualnej Karcie Informacyjnej użytkownika produktu oraz do przestrzegania postanowień lub wymagań zawartych w tych dokumentach. OWS są ogólnie dostępne na stronie internetowej www.sika.pl oraz we wszystkich oddziałach Sika na terenie kraju. Kopię aktualnej Karty Informacyjnej Produktu Sika dostarcza Użytkownikowi na jego żądanie. Deklaracje Właściwości Użytkowych dostępne są na stronie www.sika.pl w zakładce Dokumentacja Techniczna.

Sika Poland Sp. z o.o.
ul. Karzunkowska 89
02-871 Warszawa
tel: 22 27 28 700
mail: sika.poland@pl.sika.com
www.sika.pl
BDO 000013413

Karta Informacyjna Produktu
Sika® Luftporenbildner LPS A-94
Kwiecień 2024, Wersja 01.03
021403021000000024

3 / 3

Sika/Luftporenbildner LPSA-94-pl-PL-[04-2024]-1-3.pdf

BUILDING TRUST

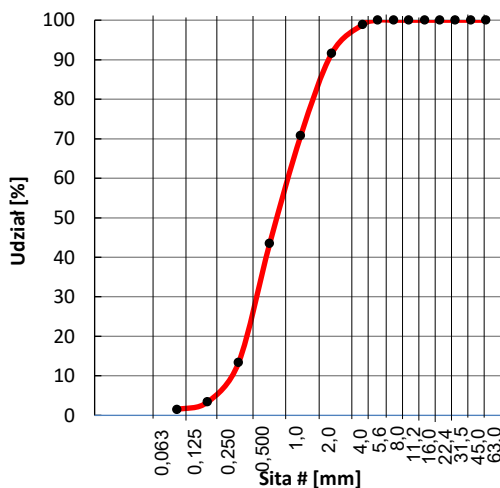


**PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw --
Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania**

Rodzaj materiału	Kruszywo drobne 0/2 mm
Pochodzenie materiału	Sępólno Wielkie
Metoda przesiewania	Na mokro
Data badania	01.02.2022
Norma odniesienia	PN-EN 933-1:2012

Tab. 1. Uziarnienie badanego materiału

Uziarnienie badanego materiału			
Wymiar sita	Ilość [g]	Udział %	Przesiew [%]
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	100,0
8	0,0	0,0	100,0
5,6	0,0	0,0	100,0
4	19,5	1,1	98,9
2	129,3	7,3	91,6
1	369,3	20,9	70,7
0,5	483,1	27,3	43,5
0,25	532,3	30,1	13,4
0,125	177,6	10,0	3,4
0,063	33,8	1,9	1,5
0	25,8	1,5	0,0
SUMA	1770,7	100	-



Badanie wykonał:

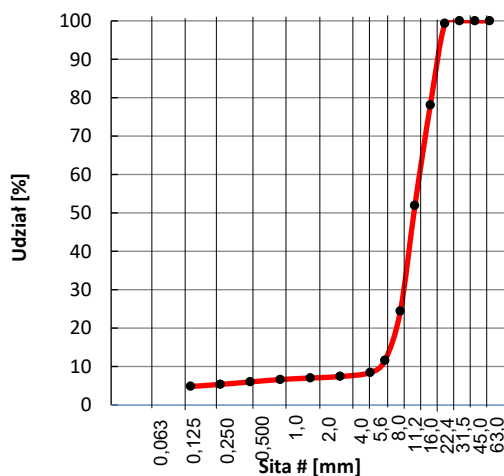
Przemysław Stałowski

**PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw --
Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania**

Rodzaj materiału	Kruszywo drobne 0/2 mm
Pochodzenie materiału	Kopalnia Łojewo
Metoda przesiewania	Na mokro
Data badania	02.09.2021
Norma odniesienia	PN-EN 933-1:2012

Tab. 1. Uziarnienie badanego materiału

Uziarnienie badanego materiału			
<i>Wymiar sita</i>	<i>Ilość [g]</i>	<i>Udział %</i>	<i>Przesiew [%]</i>
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	100,0
8	0,0	1,2	98,8
5,6	0,0	10,6	88,3
4	1,6	20,5	67,7
2	6,2	41,5	26,2
1	142,0	18,0	8,2
0,5	271,4	5,6	2,6
0,25	127,9	2,1	0,5
0,125	43,7	0,3	0,2
0,063	7,8	0,1	0,1
0	1,6	0,1	0,0
SUMA	602,16	100	-



Badanie wykonał:

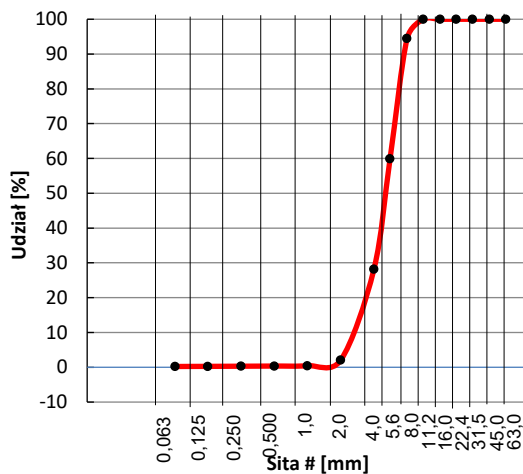
Przemysław Stałowski

**PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw --
Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania**

Rodzaj materiału	Kruszywo grube 2/8 mm
Pochodzenie materiału	Sępólno Wielkie
Metoda przesiewania	Na mokro
Data badania	01.02.2022
Norma odniesienia	PN-EN 933-1:2012

Tab. 1. Uziarnienie badanego materiału

Uziarnienie badanego materiału			
<i>Wymiar sita</i>	<i>Ilość [g]</i>	<i>Udział %</i>	<i>Przesiew [%]</i>
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	100,0
8	180,4	5,5	94,5
5,6	1127,0	34,6	59,9
4	1034,4	31,7	28,2
2	851,4	26,1	2,1
1	52,2	1,6	0,5
0,5	3,6	0,1	0,4
0,25	1,6	0,0	0,3
0,125	1,4	0,0	0,3
0,063	1,2	0,0	0,2
0	7,3	0,2	0,0
SUMA	3260,5	100	-



Badanie wykonał:

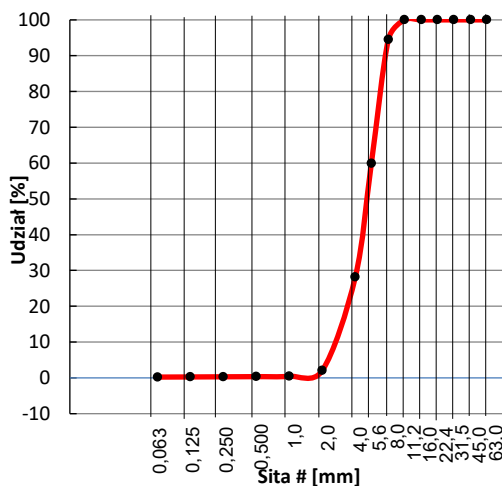
Przemysław Stałowski

**PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw --
Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania**

Rodzaj materiału	Kruszywo grube 2/8 mm
Pochodzenie materiału	Kopalnia Łojewo
Metoda przesiewania	Na mokro
Data badania	02.09.2021
Norma odniesienia	PN-EN 933-1:2012

Tab. 1. Uziarnienie badanego materiału

Uziarnienie badanego materiału			
<i>Wymiar sita</i>	<i>Ilość [g]</i>	<i>Udział %</i>	<i>Przesiew [%]</i>
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
11,2	0,0	0,0	100,0
8	180,4	5,5	94,5
5,6	1127,0	34,6	59,9
4	1034,4	31,7	28,2
2	851,4	26,1	2,1
1	52,2	1,6	0,5
0,5	3,6	0,1	0,4
0,25	1,6	0,0	0,3
0,125	1,4	0,0	0,3
0,063	1,2	0,0	0,2
0	7,3	0,2	0,0
SUMA	3260,5	100	-



Badanie wykonał:

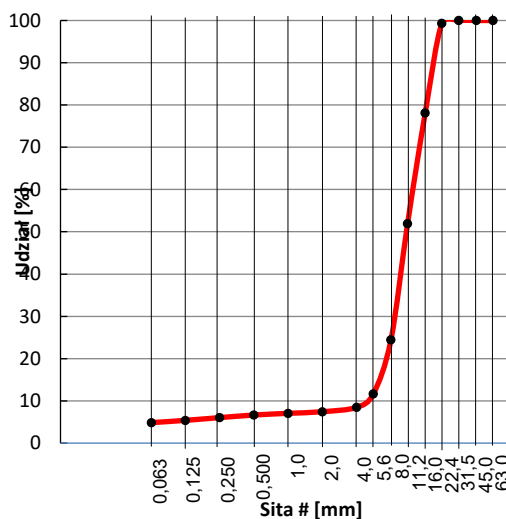
Przemysław Stałowski

**PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw --
Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania**

Rodzaj materiału	Kruszywo grube 8/16 mm
Pochodzenie materiału	Sępólno Wielkie
Metoda przesiewania	Na mokro
Data badania	01.02.2022
Norma odniesienia	PN-EN 933-1:2012

Tab. 1. Uziarnienie badanego materiału

Uziarnienie badanego materiału			
<i>Wymiar sita</i>	<i>Ilość [g]</i>	<i>Udział %</i>	<i>Przesiew [%]</i>
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0
16	379,4	7,8	92,2
11,2	2063,2	42,4	49,8
8	1945,2	39,9	9,9
5,6	352,4	7,2	2,7
4	38,6	0,8	1,9
2	29,4	0,6	1,3
1	9,6	0,2	1,1
0,5	5,2	0,1	1,0
0,25	5,2	0,1	0,9
0,125	7,2	0,1	0,7
0,063	7,6	0,2	0,5
0	26,6	0,5	0,0
SUMA	4869,6	100	-



Badanie wykonał:

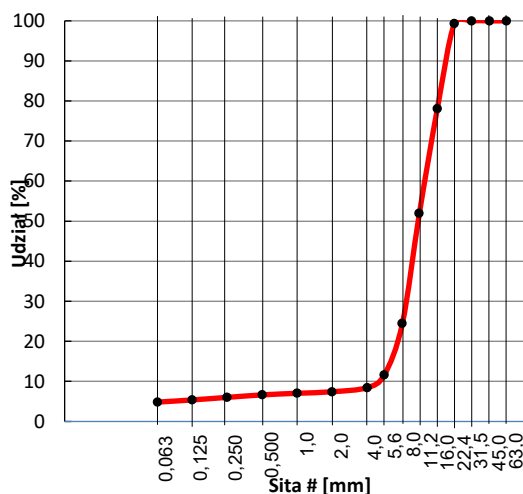
Przemysław Stałowski

**PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw --
Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania**

Rodzaj materiału	Kruszywo grube 8/16 mm
Pochodzenie materiału	Kopalnia Łojewo
Metoda przesiewania	Na mokro
Data badania	02.09.2021
Norma odniesienia	PN-EN 933-1:2012

Tab. 1. Uziarnienie badanego materiału

Uziarnienie badanego materiału			
Wymiar sita	Ilość [g]	Udział %	Przesiew [%]
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0
16	65,2	2,1	97,9
11,2	172,8	5,5	92,4
8	652,0	20,8	71,6
5,6	1414,8	45,1	26,5
4	710,7	22,7	3,8
2	55,4	1,8	2,1
1	32,6	1,0	1,0
0,5	13,0	0,4	0,6
0,25	6,5	0,2	0,4
0,125	5,2	0,2	0,2
0,063	4,3	0,1	0,1
0	3,3	0,1	0,0
SUMA	3135,84	100	-



Badanie wykonał:

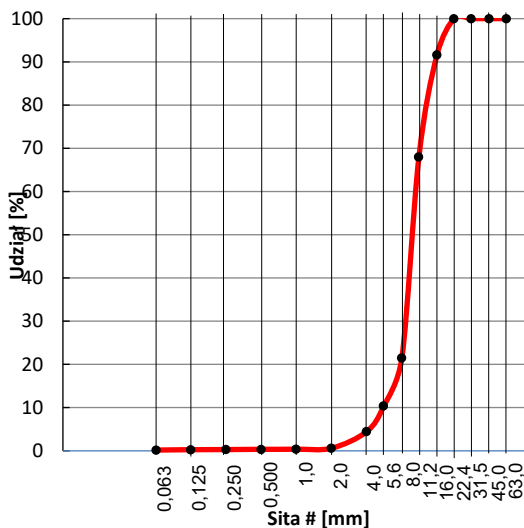
Przemysław Stałowski

**PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw --
Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania**

Rodzaj materiału	Kruszywo grube Aggneo 2/16 mm
Pochodzenie materiału	Kruszywo z recyklingu
Metoda przesiewania	Na mokro
Data badania	01.02.2022
Norma odniesienia	PN-EN 933-1:2012

Tab. 1. Uziarnienie badanego materiału

Uziarnienie badanego materiału			
<i>Wymiar sita</i>	<i>Ilość [g]</i>	<i>Udział %</i>	<i>Przesiew [%]</i>
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	0,0	0,0	100,0
16	340,8	8,4	91,6
11,2	960,0	23,6	68,0
8	1892,4	46,5	21,5
5,6	452,4	11,1	10,4
4	240,0	5,9	4,5
2	156,0	3,8	0,6
1	9,6	0,2	0,4
0,5	1,2	0,0	0,4
0,25	2,4	0,1	0,3
0,125	1,2	0,0	0,3
0,063	3,6	0,1	0,2
0	7,2	0,2	0,0
SUMA	4066,8	100	-



Badanie wykonał:

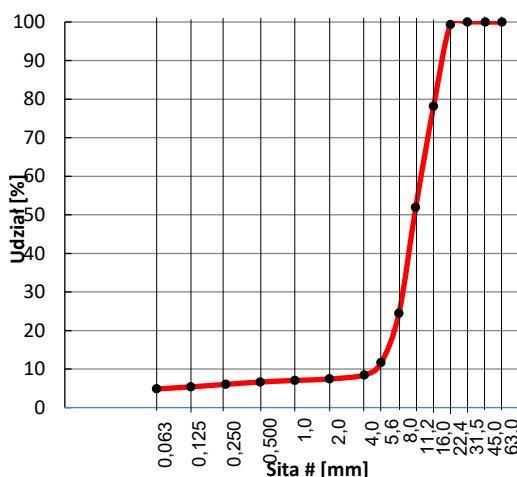
Przemysław Stałowski

**PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw --
Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania**

Rodzaj materiału	Kruszywo grube Aggneo 4/16 mm
Pochodzenie materiału	Kruszywo z recyklingu
Metoda przesiewania	Na mokro
Data badania	01.02.2022
Norma odniesienia	PN-EN 933-1:2012

Tab. 1. Uziarnienie badanego materiału

Uziarnienie badanego materiału			
<i>Wymiar sita</i>	<i>Ilość [g]</i>	<i>Udział %</i>	<i>Przesiew [%]</i>
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
22,4	25,4	0,7	100,0
16	787,8	21,2	100,0
11,2	973,0	26,2	100,0
8	1021,9	27,5	100,0
5,6	477,1	12,8	100,0
4	118,2	3,2	99,7
2	38,1	1,0	98,7
1	14,0	0,4	75,1
0,5	15,0	0,4	30,1
0,25	23,0	0,6	8,8
0,125	24,0	0,6	1,6
0,063	20,0	0,5	0,3
0	180,0	4,8	0,0
SUMA	3717,5	100	-



Badanie wykonał:

Przemysław Stałowski

Załącznik 15

	HOLCIM POLSKA S.A.		Bielawy 18.05.2022 r.
	Receptura laboratoryjna wg PN-EN 206+A2:2021-08		Laboratorium CBB Kujawy
Projektowany beton	C30/37		
Inwestycja	RCC		
Normy	PN-EN 206+A2:2021-08 <i>Beton. Część 1. "Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność"</i> 47. PN-B-06265:2022: <i>Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08</i>		

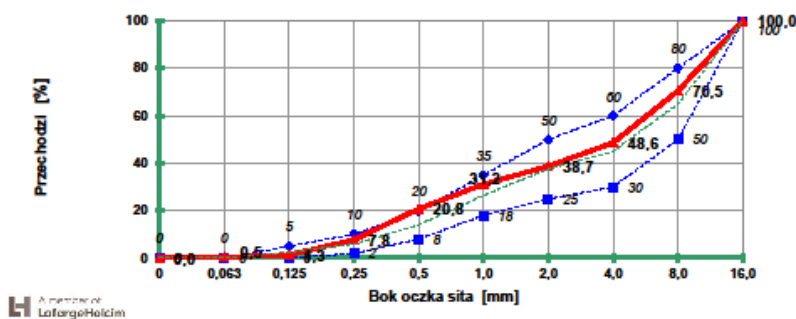
1. Dane projektowe mieszanki betonowej:

Klasa wytrzymałości na ściskanie	C30/37
Klasa konsystencji Ve-Be	-
Założona ilość powietrza [%]	5,0
Klasy ekspozycji	-
Maksymalny wymiar ziarn kruszywa [mm]	16

2. Receptura- sklad suchy na 1m³ betonu:

Ilość składników na 1 m ³ mieszanki betonowej			Udział objętościowy %
Producent	Składniki	Ilość [kg/m ³]	
HOLCIM	CEM II A-V 42,5R	320	
HOLCIM	0	0	
Janikowo	Popiół lotny V	0	
MW	0	0	
Sepólno Wik.	0-2 mm	813	40
Sepólno Wik.	2-8 mm	610	30
Sepólno Wik.	8-16 mm	610	30
WODA	Woda wodociągowa	112	
SIKA	Napowietrzacz LPS A94	3,20	1,00%
SIKA	0	0,00	0,00%
Ciężar objętościowy mieszanki betonowej		2487,9	

3. Krzywa przesiewu:



4. Właściwości mieszanki betonowej:

Lp.	Badana cecha	Jednostka	Wartość
1	W/C	—	0,35
2	W/(C+P)	—	0,35
3	Punkt piaskowy	%	38,7
4	Objętość zaprawy	dm ³	511
5	Objętość zaczynu	dm ³	218
6	Zawartość cząstek < 0,25 mm	kg/m ³	478
7	Zawartość cząstek < 0,125 mm	kg/m ³	347
8	Konsystencja mieszanki betonowej [mm]	10'	0
		60'	0
9	Zawartość powietrza [%]	10'	5,0
		60'	-

5. Właściwości stwardniałego betonu:

Lp.	Badana cecha	Jednostka	Wartość
1	Wytrzymałość betonu na ściskanie	2 dni	-
		7 dni	38,1
		28 dni	49,3
		56 dni	-
2	Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu	16 dni	-
		28 dni	-
3	Nasiąkliwość	%	-
4	Wodoszczelność	Stopień W	-
5	Mrozoodporność zwykła	Stopień F	-
6	Mrozoodporność w soli odładzającej		-

6. Uwagi:

Skład mieszanki betonowej zaprojektowany w oparciu o wykonaną analizę sitową kruszywa. Recepturę należy zweryfikować na węźle podczas normalnych warunków produkcyjnych. Dozowanie domieszki chemicznej może ulec zmianie w zależności od panujących warunków atmosferycznych oraz czasu transportu mieszanki betonowej. W przypadku zmiany charakterystyki surowców, producent zastrzega sobie prawo do korekty receptury. Czas od pierwszego kontaktu cementu z wodą do wbudowania powinien wynosić max 90 min. Warunkiem niezbędnym do osiągnięcia projektowanych parametrów, jest właściwe prowadzenie procesu pielęgnacji wg PN-EN 13670.

Recepturę opracował:

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					120x150 mm (hxd)			
Receptura					C30/37L			
Metoda zagęszczania					Proctor			
Zarób	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytr. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytr. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytr. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytr. R28 [MPa]
1	5074	5062,0	43,6	42,5	5079	5080,0	48,9	49,1
	5079		43,2		5078		50,2	
	5033		40,7		5083		48,1	
2	5120	5122,7	47,1	46,5	5109	5095,0	47,2	49,8
	5114		43,4		5095		52,1	
	5134		49,0		5081		50,2	
3	5092	5112,7	39,5	43,5	5151	5140,3	48,2	51,0
	5114		46,1		5125		51,6	
	5132		44,9		5145		53,1	
4	5090	5108,0	43,8	45,1	5119	5125,3	49,6	49,6
	5143		48,1		5119		47,9	
	5091		43,5		5138		51,3	
5	5123	5116,5	39,0	41,2	5119	5131,0	45,1	48,9
	5119		42,1		5140		51,2	
	5107		42,4		5134		50,3	
6	5099	5106,5	40,5	41,4	5139	5150,5	48,6	47,6
	5111		43,7		5156		46,6	
	5110		40,0		5157		47,7	
7	5166	5129,0	40,1	39,2	5197	5200,3	48,7	48,3
	5116		43,0		5212		46,6	
	5105		34,4		5192		49,7	
8	5098	5083,4	43,3	40,1	5187	5198,4	47,9	48,9
	5078		39,3		5209		49	
	5074		37,7		5199		49,7	
9	5126	5120,0	40,9	42,3	5198	5204,4	49,9	47,8
	5109		43,4		5209		46,6	
	5125		42,5		5206		47	
10	5084	5101,1	42,3	43,4	5203	5198,5	47,4	47,8
	5110		43,1		5193		50,1	
	5109		44,8		5199		46	

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					120x150 mm (hxd)				
Receptura					C30/37L				
Metoda zagęszczania					Proctor				
Wilg. [%]	Zarób	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytrż. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytrż. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytrż. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytrż. R28 [MPa]
5,3	1	5092	5104,0	35,5	33,1	5155	5134,0	40,3	39,5
		5098		32,2		5130		41,1	
		5122		31,7		5117		37,0	
4,3	2	5019	5033,0	39,0	37,8	5144	5123,0	47,9	46,4
		5034		38,0		5119		46,0	
		5046		36,5		5106		45,4	
5,3	3	5112	5109,1	33,5	31,1	5142	5145,5	42,3	40,5
		5092		29,3		5160		40,2	
		5123		30,6		5135		39,0	
4,3	4	5033	5054,0	42,3	41,5	5110	5100,2	44,4	44,5
		5066		42,1		5090		47,2	
		5063		40,0		5101		42,0	

Załącznik nr 18

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					120x150 mm (hxd)			
Receptura					C30/37R			
Metoda zagęszczania					Proctor			
Zarób	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytr. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytr. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytr. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytr. R28 [MPa]
1	4921	4890,3	27,1	23,1	4992	4976,7	42,3	35,6
	4900		21,7		4962		37,9	
	4850		20,6		4976		26,6	
2	4890	4910,3	26,1	24,5	4993	4989,4	40,4	37,3
	4933		24,3		4966		34,5	
	4908		23,1		5009		37,0	
3	4927	4909,3	19,0	22,4	4998	4977,0	40,2	36,9
	4923		27,0		4971		36,0	
	4878		21,1		4962		34,5	

Załącznik nr 19

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					150x150x150 mm			
Receptura					C30/37L			
Metoda zagęszczania					Młot wibracyjny ręcznie			
Zarób	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytr. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytr. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytr. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytr. R28 [MPa]
1	8078	8060,0	34,4	33,4	8012	8018,0	47,0	50,2
	8044		36,8		8088		51,3	
	8058		29,0		7954		52,3	
2	7798	7829,0	31,0	33,8	7940	7889,7	44,4	42,5
	7843		37,3		7764		40,6	
	7846		33,0		7965		42,5	
3	8225	8148,3	40,3	42,0	7980	8133,0	44,5	48,1
	8032		41,0		8221		50,2	
	8188		44,7		8198		49,6	
4	7849	7858,3	42,7	37,9	7947	7939,8	42,7	43,4
	7873		36,0		8033		49,4	
	7853		34,9		7839		38,0	
5	7947	7955,3	41,3	42,1	7950	7944,0	51,0	52,0
	8033		42,4		7986		53,2	
	7886		42,5		7896		51,9	
6	7942	7936,0	42,7	43,3	7932	7940,0	45,2	44,8
	7929		42,9		7889		48,2	
	7937		44,4		7999		41,1	
7	7872	7878,4	42,2	39,3	7990	7989,0	49,0	45,5
	7873		38,3		7979		45,0	
	7890		37,4		7998		42,5	
8	7754	7784,4	30,2	32,3	7865	7856,0	44,4	39,6
	7798		31,1		7841		36,4	
	7801		35,5		7862		38,1	
9	7890	7893,3	40,1	39,3	7956	7934,5	46,6	44,4
	7866		36,8		7932		41,0	
	7924		41,1		7916		45,7	
10	7990	7983,4	44,4	41,2	8099	8088,3	56,6	54,4
	7974		35,5		8082		51,0	
	7986		43,6		8083		55,5	

Załącznik nr 20

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					150x150x150 mm			
Receptura					C30/37L			
Metoda zagęszczania					Młot wibracyjny ręcznie			
Zarób	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytr. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytr. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytr. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytr. R28 [MPa]
11	7923	7909,3	39,9	37,7	7989	7998,3	51,4	49,9
	7898		34,4		8016		49,1	
	7907		38,9		7990		49,1	
12	7899	7873,3	37,7	35,6	7978	7956,6	44,4	41,0
	7847		35,9		7943		40,2	
	7874		33,2		7948		38,3	
13	7787	7789,4	28,8	31,1	7884	7867,7	43,3	39,9
	7782		32,4		7854		39,1	
	7799		32,1		7864		37,4	
14	7913	7915,0	27,3	28,6	7745	7764,0	34,8	32,1
	7923		25,5		7798		32,1	
	7909		32,9		7749		29,4	
15	8099	8098,0	41,0	44,4	8209	8198,3	56,2	53,2
	8078		44,4		8194		53,1	
	8117		47,7		8192		50,2	
16	7891	7898,3	38,5	39,3	8012	8001,2	48,0	49,4
	7923		40,2		8003		51,2	
	7881		39,3		7988		49,0	

Załącznik nr 21

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					150x150x150 mm			
Receptura					C30/37L			
Metoda zagęszczania					Młot wibracyjny ręcznie/4 osoby			
Zarób	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytr. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytr. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytr. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytr. R28 [MPa]
1	8120	8096,7	47,8	48,1	8100	8096,7	51,8	54,6
	8087		47,9		8138		57,7	
	8083		48,6		8052		54,2	
2	8020	7971,5	40,2	38,8	7974	7961,0	45,5	46,6
	7918		36,1		7937		46,5	
	7977		40,1		7972		47,8	
3	7713	7699,0	31,1	30,1	7855	7921,0	38,1	42,4
	7679		28,1		8007		46,2	
	7705		31,1		7901		42,9	
4	7746	7730,5	31,9	30,5	7811	7829,0	32,9	36,9
	7723		29,9		7837		42,0	
	7723		29,7		7839		35,7	

Załącznik nr 22

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					150x150x150 mm				
Receptura					C30/37L				
Metoda zagęszczania					Metoda autorska				
Zarób	Opis	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytrż. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytrż. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytrż. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytrż. R28 [MPa]
1	2 kg/15 s	7785,0	7789,4	17,0	19,4	7844,0	7823,3	29,3	27,7
		7755,0		22,2		7821,0		23,3	
		7828,2		18,9		7804,8		30,5	
2	3 kg/15 s	7824,4	7812,1	28,6	26,6	7834,0	7854,4	32,3	35,5
		7791,0		21,0		7867,0		36,6	
		7821,0		30,2		7862,2		37,7	
3	3 kg/20 s	7834,0	7831,0	37,0	36,0	7987,7	7991,0	46,4	43,2
		7839,0		36,6		7983,0		43,2	
		7820,0		34,5		8002,3		40,1	
4	2,5 kg 20s	7863,0	7944,0	39,1	41,5	7821,0	7802,3	41,3	41,5
		7932,0		44,9		7784,0		41,1	
		8037,0		40,6		7802,0		42,1	
5	2,5 kg/20s	7822,0	7934,3	38,5	35,1	8026,0	7928,0	47,7	42,5
		8049,0		28,4		7903,0		42,0	
		7932,0		38,5		7855,0		37,8	
6	3 kg/20 s	7947,0	7949,7	44,5	43,0	7922,0	7993,7	43,1	46,7
		7958,0		42,6		8040,0		50,4	
		7944,0		42,0		8019,0		46,5	
7	3 kg/20 s	7896,0	7880,7	42,6	41,2	7855,0	7876,7	44,7	46,1
		7825,0		38,1		8022,0		51,3	
		7921,0		42,8		7753,0		42,4	
8	5kg 20 s	7448,0	7479,7	30,1	31,4	7544,0	7565,6	38,5	38,2
		7553,0		33,3		7578,5		36,6	
		7438,0		30,9		7574,3		39,6	
9	5 kg/20 s	7979,0	7857,0	34,6	33,2	7975,0	7915,0	40,7	42,8
		7763,0		34,0		7813,0		39,4	
		7829,0		31,0		7957,0		48,2	

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					150x150x150 mm				
Receptura					C30/37L				
Metoda zagęszczania					Metoda autorska				
Zarób	Opis	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytr. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytr. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytr. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytr. R28 [MPa]
1	4 kg/20s	7916,0	7990,7	40,2	38,0	7968,0	7942,7	47,1	48,6
		7957,0		38,2		7923,0		47,7	
		8099,0		35,5		7937,0		51,1	
2	4 kg/20s	7812,0	7859,7	29,4	35,0	8145,0	8014,3	42,8	47,2
		7965,0		38,6		7972,0		49,8	
		7802,0		36,9		7926,0		49,0	
3	4 kg/20s	7978,0	7982,0	44,7	43,3	7950,0	8038,0	48,7	46,6
		7963,0		41,5		8117,0		43,9	
		8004,9		43,8		8046,9		47,3	
4	4 kg/20s	7974,0	7978,5	41,0	40,5	7989,0	8032,0	46,7	48,0
		7976,0		39,6		8044,0		48,4	
		7985,6		41,0		8063,0		49,0	
5	4 kg/20s	7867,0	7893,0	34,4	37,9	7856,0	7953,0	43,4	44,7
		7899,0		39,3		8035,0		46,6	
		7913,0		39,9		7968,0		44,2	
6	4 kg/20s	7977,0	7901,7	38,5	37,2	7908,0	8000,3	49,1	51,5
		7820,0		34,4		8099,0		55,5	
		7908,0		38,6		7994,0		49,8	
7	4 kg/20s	7899,0	7867,6	41,5	38,4	8044,0	8032,1	49,8	48,5
		7855,0		38,4		8023,0		47,4	
		7848,7		35,4		8029,2		48,4	
8	4 kg/20s	7867,3	7878,4	35,5	36,7	7990,0	7993,4	54,0	53,3
		7912,0		38,0		7980,0		50,9	
		7856,0		36,6		8010,1		55,0	
9	4 kg/20s	7894,4	7887,7	41,1	38,8	8008,1	7994,4	53,0	50,4
		7893,0		39,1		7985,0		50,2	
		7875,6		36,1		7990,0		48,0	
10	4 kg/20s	7955,0	7945,5	43,3	40,3	8045,0	8029,2	53,3	49,9
		7912,0		40,0		8021,0		49,1	
		7969,4		37,7		8021,6		47,4	

Załącznik nr 24

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					150x150x150 mm				
Receptura					C30/37L				
Metoda zagęszczania					Metoda autorska				
Zarób	Opis	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytrż. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytrż. R7 [MPa]	Masa próbek R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytrż. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytrż. R28 [MPa]
11	4 kg/20s	7910,0	7889,4	41,0	39,5	7956,6	7945,5	51,0	48,5
		7875,3		39,4		7941,2		49,4	
		7883,0		38,2		7938,7		45,0	
12	4 kg/20s	7893,0	7867,7	39,1	38,5	7955,0	7935,5	49,9	47,9
		7841,0		34,9		7932,0		46,7	
		7869,0		41,5		7919,5		47,0	
13	4 kg/20s	7845,0	7834,4	40,0	37,7	7909,0	7899,5	53,3	49,8
		7823,0		39,4		7834,0		49,2	
		7835,2		33,7		7955,6		47,0	
14	4 kg/20s	7839,0	7823,3	35,5	36,8	7925,2	7905,4	49,5	46,8
		7830,0		38,7		7902,0		45,5	
		7801,0		36,2		7889,0		45,4	
15	4 kg/20s	7921,6	7912,2	44,4	41,2	8034,0	8015,5	55,4	52,2
		7931,0		41,2		8010,0		50,2	
		7884,0		38,0		8002,4		51,0	
16	4 kg/20s	7976,6	7955,5	45,5	42,3	8045,0	8034,4	53,3	50,6
		7939,0		42,3		8031,2		50,2	
		7951,0		39,0		8027,0		48,3	

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					150x150x150 mm				
Receptura					C30/37L				
Metoda zagęszczania					Metoda autorska				
Zarób	Opis	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytrż. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytrż. R7 [MPa]	Masa próbek R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytrż. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytrż. R28 [MPa]
1	.+0,5%	7981,0	8007,7	41,0	44,5	8011,0	8096,0	47,1	48,6
		7974,0		46,0		8089,0		47,7	
		8068,0		46,5		8188,0		51,1	
2	.+0,8%	7895,0	7967,0	44,4	43,3	8003,3	8006,4	48,9	49,0
		7984,0		43,1		7993,0		47,9	
		8022,0		42,3		8023,0		50,3	
3	.+0,8%	8044,0	8032,3	45,0	42,1	8099,0	8089,0	53,3	50,1
		8023,0		41,0		8109,0		50,2	
		8029,9		40,3		8059,0		46,7	
4	.+0,6%	7989,6	7988,3	49,4	46,4	8145,5	8123,0	54,5	51,8
		7975,9		44,4		8109,3		50,9	
		7999,3		45,5		8114,1		49,9	
5	.+0,8%	7894,4	7934,4	45,4	42,9	8100,0	8087,4	49,9	48,2
		7956,0		42,9		8098,0		50,2	
		7952,9		40,4		8064,2		44,6	
6	.-0,8%	7902,0	7830,0	31,7	33,8	8003,0	7859,3	47,3	42,7
		7917,0		39,0		7882,0		41,8	
		7671,0		30,8		7693,0		39,0	
7	.-0,8%	7798,3	7783,3	29,3	30,2	7867,0	7851,3	45,5	42,9
		7765,4		34,4		7844,4		42,3	
		7786,3		27,0		7842,5		40,9	
8	.-1,0%	7450,0	7407,0	31,6	29,9	7540,0	7441,7	40,8	37,5
		7272,0		29,6		7465,0		36,4	
		7499,0		28,4		7320,0		35,2	
9	.-1,0%	7297,0	7522,3	29,2	26,2	7539,0	7616,3	25,6	28,5
		7685,0		21,7		7536,0		32,0	
		7585,0		27,8		7774,0		27,8	
10	.-0,8%	7931,0	7861,3	29,8	36,1	7702,0	7792,0	33,3	36,7
		7821,0		38,5		7783,0		36,0	
		7832,0		40,1		7891,0		40,8	

Badanie betonu na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2019-07 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”

Wymiary próbki					150x150x150 mm				
Receptura					C30/37L				
Metoda zagęszczania					Metoda autorska				
Drgania młota [udar/min]	Opis	Masy próbek R7 [g]	Średnia masa próbki R7 [g]	Wytr. próbki R7 [Mpa]	Średni wynik wytr. R7 [MPa]	Masa próbki R28 [g]	Średnia masa próbek R28 [g]	Wyniki wytr. próbek R28 [Mpa]	Średnia wytr. R28 [MPa]
1435	4 kg/20 s	7754,0	7765,4	34,4	32,1	7839,0	7832,3	39,9	37,3
		7785,0		32,1		7835,4		37,7	
		7757,3		29,7		7822,4		34,4	
2153	4 kg/20 s	7849,3	7845,5	34,4	36,6	7900,0	7900,1	41,3	42,3
		7876,9		39,4		7924,4		45,5	
		7810,3		35,9		7876,0		40,0	
2870	4kg/30 s	7906,6	7879,3	44,4	41,1	7945,5	7927,7	51,8	49,9
		7854,4		36,9		7910,9		48,4	
		7877,0		41,9		7926,8		49,4	
2870	4kg/30 s	7899,0	7874,4	43,3	40,0	7921,0	7943,3	53,3	51,2
		7854,0		39,4		7957,6		51,2	
		7870,3		37,3		7951,4		49,0	
2870	4 kg/20s 3 warstwy	7856,0	7833,3	44,5	41,1	7945,0	7909,2	50,2	48,8
		7834,5		40,3		7890,9		46,7	
		7809,3		38,5		7891,6		49,6	
2870	4 kg/20s 3 warstwy	7803,3	7809,9	45,5	43,3	7899,0	7897,4	49,4	50,3
		7845,4		46,0		7856,0		47,4	
		7781,0		38,4		7937,2		54,0	
2870	4 kg/20s 3 warstwy	7789,4	7810,9	40,8	42,1	7932,2	7905,0	50,3	49,3
		7834,0		40,0		7894,4		46,6	
		7809,2		45,5		7888,5		51,0	

Załącznik nr 27 – Recepta RCC C30/37Ł

	BK2.10.20.PR01.06		Zastępuje: R09-F03_s
	Wydanie	2	
	Obowiązuje od	26.01.2021	
Recepta laboratoryjna			
Zakład	WBT Inowrocław		
Opis betonu	C30/37 V0 XC1 Dmax16mm Cl0,2	kod: 01/07/2019/BB	

Data wydruku 11.07.2019

1. Wyjściowe dane projektowe

Normy powołania:	PN-EN 206+A1:2016-12: Beton. "Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność"

Wymagane parametry mieszanki betonowej i betonu stwardniałego

klasa wytrzymałości na ściskanie	C30/37	Stopień mrozoodporności	
klasa konsystencji	V0	Stopień wodoszczelności	
klasy ekspozycji:	XC1	Nasiłkowość	
klasa zawartości jonów chlorkowych	Cl0,2		
Maksymalny wymiar ziarn kruszywa	16 mm		
Rozwój wytrzymałości			
Gęstość objętościowa			

Zastosowane składniki

	Rodzaj składnika	Zgodność z normą	Pochodzenie
CEM	CEM II/A-V 42,5 R	EN 197-1:2011	Kujawy
DOD MIN		PN-EN 450-1:2012	
Kruszywo	Piasek 0/2	PN-EN 12620+A1:2010	Łojewo
	Żwir 2/8	PN-EN 12620+A1:2010	Łojewo
	Żwir 8/16	PN-EN 12620+A1:2010	Łojewo
	Domieszki chemiczne	PN-EN 934-2+A1:2012	Chryso
	Dodatki do betonu (inne)		
	Woda zarobowa	PN-EN 1008:2004	

2. Analiza sitowa zastosowanych kruszyw

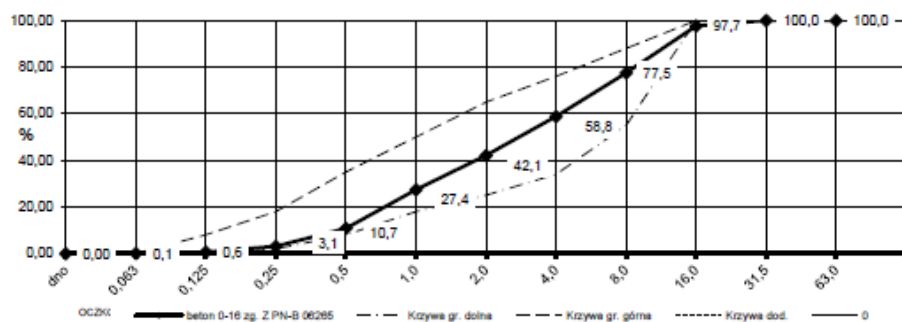
Kruszywo		Przechodzi przez sito [%]									
Frakcja	gęstość	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Żwir 2/8 Łojewo	2,62	100,0	100,0	98,9	67,8	26,2	8,2	2,6	0,5	0,2	0,0
Żwir 8/16 Łojewo	2,63	100,0	92,4	26,4	3,8	2,0	1,0	0,6	0,3	0,2	0,0
	2,96	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	2,6	2,6	2,6	2,6
Piasek 0/2 Łojewo	2,65	100,0	100,0	100,0	99,7	98,6	75,0	29,9	8,7	1,6	0,2

3. Krzywe graniczne zg. z PN-B-06265:2018-10

	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Dolna granica uziarnienia	100,0	100,0	55,0	34,0	25,0	18,0	8,0	2,0		
Górna granica uziarnienia	100,0	100,0	88,0	76,0	65,0	50,0	35,0	18,0	8,0	

4. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej

Stroi



5. Analiza objętościowa

	Składnik	Ilość	Gęstość objętościowa	Objętość
Cement	CEM II/A-V 42,5 R	kg 320	kg/dm ³ 2,94	dm ³ 109
		dm ³	kg/dm ³ 1,00	dm ³
Dodatki mineralne		kg	kg/dm ³ 2,10	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
Kruszywo		kg 1952	kg/dm ³ 2,63	dm ³ 741
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
Dodatki inne	Woda efektywna	kg 95	kg/dm ³ 1,00	dm ³ 95
	A10	kg 4,80	kg/dm ³ 1,00	dm ³ 5
		kg	kg/dm ³ 1,05	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,01	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
Domieszki	Zawartość powietrza	% 5,0	-	1,00 dm ³ 50
	Razem:	kg 2371	kg/dm ³ 2,37	dm ³ 1000

6. Recepta laboratoryjna

Ilość składników w 1 m ³ mieszanki betonowej					
	Składnik	Pochodzenie	Ilość		
Cement	CEM II/A-V 42,5 R	Kujawy	kg	320	
Dodatki mineralne					
Kruszywo	Piasek 0/2	Łojewo	kg	629	
	Żwir 2/8	Łojewo	kg	738	
	Żwir 8/16	Łojewo	kg	585	
Dodatki INNE					
Woda	Woda efektywna		kg	95	
	Woda całkowita		kg	111	
Domieszki	A10	1,50% m.c.	Chryso	kg	4,80

7. Dane uzupełniające

L.p.	Badana cecha		j.m.	Wynik	Wymagania	
1	W/C	Uwzględnić wodę w domieszkach? ☒	-	0,31	-----	
	W/S dla k= 0,40		0,31	-----		
2	Punkt piaskowy mieszanki mineralnej		%	42,1		
3	Zawartość zaprawy		dm ³ /m ³	521		
4	Objętość zaczynu		dm ³ /m ³	209		
5	Zawartość cząstek < 0,25 mm		kg/m ³	380	-----	
6	Zawartość cząstek < 0,125 mm		kg/m ³	332	-----	
7	Konsystencja mieszanki betonowej - opad stożka [mm] po		10'	-----		
			90'	130	100 - 150	
8	Zawartość powietrza [%] w mieszance betonowej po		10'	-----		
			90'	-----	-----	
9	Nasiąkliwość betonu badana po : (zgodnie z wewnętrzną procedurą badawczą)		%	-----	-----	
10	Mrozoodporność betonu badana po : -----		stopień F	-----	-----	
11	Wodoszczelność betonu badana po : 56 dniach dojrzewania		stopień W	-----	-----	
12	Mrozoodporność w soli odladzającej po : -----		-	-----	-----	
13	Wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie		mm	-----	-----	
14	Zawartość mikroporów A300		%	-----	-----	
15	Wytrzymałość betonu	na ściskanie	2 dni	-----	-----	
			7 dni	MPa	-----	-----
			28 dni	> 34,0	f _{cm} ≥ 41,0	
		na rozciąganie przy zginaniu	7 dni	MPa	-----	-----
			28 dni		-----	-----
			na rozciąganie przy rozłupywaniu		7 dni	-----
		28 dni	-----	-----		
16	Rozwój wytrzymałości - R2 / R28 ☐		-	-----		
17	Inne					

8. Uwagi

W przypadku zmiany charakterystyki surowców oraz warunków produkcji producent zastrzega sobie prawo do korekty recepty. Czas od pierwszego kontaktu cementu z wodą do wbudowania powinien wynosić maksymalnie 90 minut.

Receptę sporządził:	Uwagi

Załącznik nr 28 – Recepta RCC C30/37R

	BK2.10.20.PR01.06		Zastępuje: R09-F03_s
	Wydanie	2	
	Obowiązuje od	26.01.2021	
Recepta laboratoryjna			
Zakład	-		
Opis betonu	C230/37 V0 XC1 Dmax16mm C10,2	kod: 01/07/2019/BB	
Data wydruku	-		

1. Wyjściowe dane projektowe

Normy powołania: PN-EN 206+A1:2016-12: Beton. "Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność"

Wymagane parametry mieszanki betonowej i betonu stwardniałego

Klasa wytrzymałości na ściskanie	C30/37	Stopień mrozoodporności	
Klasa konsystencji	V0	Stopień wodoszczelności	
Klasa ekspozycji:	XC1	Nasiąkliwość	
Klasa zawartości jonów chlorkowych	Cl0,2		
Maksymalny wymiar ziarn kruszywa	16 mm		
Rozwój wytrzymałości			
Gęstość objętościowa			

Zastosowane składniki

	Rodzaj składnika	Zgodność z normą	Pochodzenie
CEM	CEM II/A-V 42,5 R	EN 197-1:2011	Kujawy
DOD MIN		PN-EN 450-1:2012	
Kruszywo	Piasek 0/2	PN-EN 12620+A1:2010	Sępólno Wielkie
	Żwir 2/8	PN-EN 12620+A1:2010	Sępólno Wielkie
	Żwir 8/16	PN-EN 12620+A1:2010	Sępólno Wielkie
	Recykling 2/16		Recykling betonowy
	Domieszki chemiczne	PN-EN 934-2+A1:2012	SIKA
	Dodatki do betonu (inne)		
	Woda zarobowa	PN-EN 1008:2004	

2. Analiza sitowa zastosowanych kruszyw

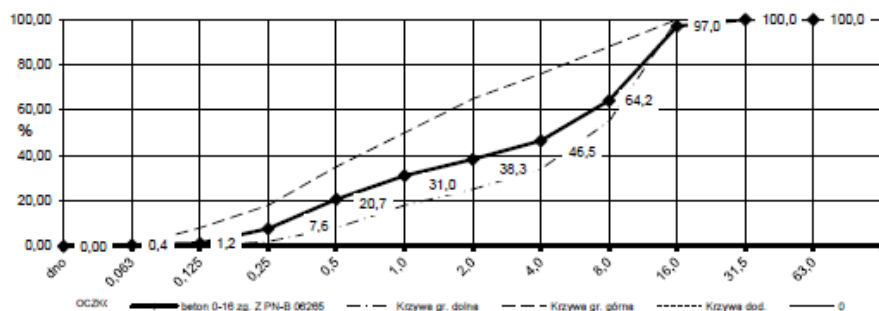
Kruszywo			Przechodzi przez sito [%]									
Frakcja		gęstość	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Żwir 2/8	Sępólno Wielkie	2,62	100,0	100,0	92,9	27,9	4,2	1,5	1,0	0,9	0,7	0,6
Żwir 8/16	Sępólno Wielkie	2,63	100,0	92,6	8,7	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3
recykling 2/1	Recykling betonowy	2,96	100,0	92,4	19,4	3,9	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Piasek 0/2	Sępólno Wielkie	2,65	100,0	100,0	100,0	99,9	92,9	76,3	50,7	18,3	2,4	0,5

3. Krzywe graniczne zg. z PN-B-06265:2018-10

	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Dolna granica uziarnienia	100,0	100,0	55,0	34,0	25,0	18,0	8,0	2,0		
Górna granica uziarnienia	100,0	100,0	88,0	76,0	65,0	50,0	35,0	18,0	8,0	

4. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej

Strona 2 z 3



5. Analiza objętościowa

	Składnik	Ilość	Gęstość objętościowa	Objętość
Cementy	CEM II/A-V 42,5 R	kg 320	kg/dm ³ 2,94	dm ³ 109
		dm ³	kg/dm ³ 1,00	dm ³
Dodatki mineralne		kg	kg/dm ³ 2,10	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
Kruszywo		kg 1917	kg/dm ³ 2,70	dm ³ 711
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
Dodatki inne	Woda efektywna	kg 127	kg/dm ³ 1,00	dm ³ 127
	LPSA 945	kg 3,20	kg/dm ³ 1,00	dm ³ 3
		kg	kg/dm ³ 1,05	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,01	dm ³
		kg	kg/dm ³ 1,00	dm ³
Domieszki	Zawartość powietrza	% 5,0	-	1,00 dm ³ 50
	Razem:	kg 2367	kg/dm ³ 2,37	dm ³ 1000

6. Recepta laboratoryjna

Ilość składników w 1 m ³ mieszanki betonowej					
	Składnik	Pochodzenie	Ilość		
Cementy	CEM II/A-V 42,5 R	Kujawy	kg	320	
Dodatki mineralne					
Kruszywo	Piasek 0/2	Sępólno Wielkie	kg	754	
	Żwir 2/8	Sępólno Wielkie	kg	373	
	Żwir 8/16	Sępólno Wielkie	kg	374	
	Recykling 2/16	Recykling betonowy	kg	421	
Dodatki INNE					
Woda	Woda efektywna		kg	127	
	Woda całkowita		kg	138	
Domieszki	LPSA 945	1,00% m.c. SIKA	kg	3,20	

7. Dane uzupełniające

L.p.	Badana cecha		j.m.	Wynik	Wymagania
1	W/C	Uwzględnić wodę w domieszkach? ☒	-	0,40	-----
	W/S dla k= 0,40			0,40	-----
2	Punkt piaskowy mieszanki mineralnej		%	38,3	-----
3	Zawartość zaprawy		dm ³ /m ³	511	-----
4	Objętość zaczynu		dm ³ /m ³	239	-----
5	Zawartość cząstek < 0,25 mm		kg/m ³	466	-----
6	Zawartość cząstek < 0,125 mm		kg/m ³	344	-----
7	Konsystencja mieszanki betonowej - opad stożka [mm] po		10'	-----	100 - 150
			90'	130	
8	Zawartość powietrza [%] w mieszanke betonowej po		10'	-----	-----
			90'	-----	
9	Nasiąkliwość betonu badana po : (zgodnie z wewnętrzną procedurą badawczą)		%	-----	-----
10	Mrozoodporność betonu badana po : -----		stopień F	-----	-----
11	Wodoszczelność betonu badana po : 56 dniach dojrzewania		stopień W	-----	-----
12	Mrozoodporność w soli odladzającej po : -----		-	-----	-----
13	Wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie		mm	-----	-----
14	Zawartość mikroporów A300		%	-----	-----
15	Wytrzymałość betonu	na ściskanie	2 dni	MPa	-----
			7 dni		-----
			28 dni		> 34,0 f _{cm} ≥ 41,0
		na rozciąganie przy zginaniu	7 dni	MPa	-----
			28 dni		-----
			7 dni		-----
na rozciąganie przy rozłupywaniu	28 dni	-----	-----		
	-----	-----	-----		
16	Rozwój wytrzymałości - R2 / R28 ☐		-	-----	-----
17	Inne		-----	-----	-----

8. Uwagi

W przypadku zmiany charakterystyki surowców oraz warunków produkcji producent zastrzega sobie prawo do korekty recepty. Czas od pierwszego kontaktu cementu z wodą do wbudowania powinien wynosić maksymalnie 90 minut.

Receptę sporządził:	Uwagi
---------------------	-------

Załącznik nr 29 – Recepta RCC C8/10P

	Lafarge	Białawy 14.11.2019 r.
	Receptura laboratoryjna wg PN-EN 206:2014	Laboratorium CBB Kujawy
Projektowany beton	C8/10	
Inwestycja	RCC	
Normy	PN-EN 206:2014: Beton. Część 1. "Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność"	
	PN-88/B-06260: "Beton Zwykły"	

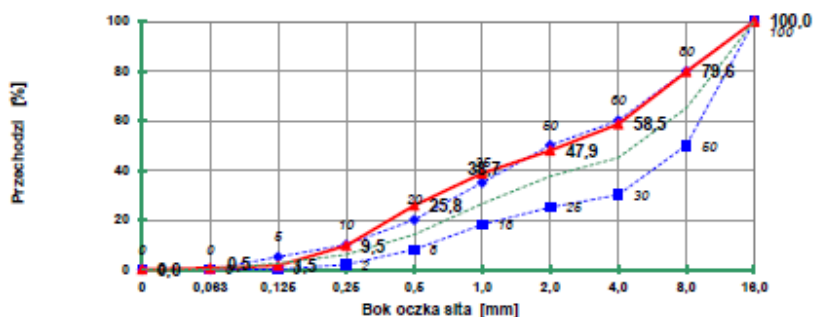
1. Dane projektowe mieszanki betonowej:

Klasa wytrzymałości na ściskanie	C8/10
Klasa konsystencji Ve-Be	-
Założona ilość powietrza [%]	4,0
Klasy ekspozycji	-
Maksymalny wymiar ziarn kruszywa [mm]	16

2. Receptura- skład suchy na 1m³ betonu:

Ilość składników na 1 m ³ mieszanki betonowej			Udział objętościowy %
Producent	Składniki	Ilość [kg/m ³]	
Lafarge	CEM II A-V 42,5R	180	
Lafarge	0	0	
Janikowo	Popiół lotny V	0	
MW	0	0	
Sępólno Wlk.	0-2 mm	1032	50
Sępólno Wlk.	2-8 mm	619	30
Sępólno Wlk.	8-16 mm	413	20
WODA	Woda wodociągowa	138	
0	0	0,00	0,00%
0	0	0,00	0,00%
Ciężar objętościowy mieszanki betonowej		2382,2	

3. Krzywa przesiewu:



4. Właściwości mieszanki betonowej:

Lp.	Badana cecha	Jednostka	Wartość
1	W/C	—	0,77
2	W/(C+P)	—	0,77
3	Punkt piskowy	%	47,9
4	Objętość zaprawy	dm ³	569
5	Objętość zaczynu	dm ³	196
6	Zawartość cząstek < 0,25 mm	kg/m ³	376
7	Zawartość cząstek < 0,125 mm	kg/m ³	211
8	Konsystencja mieszanki betonowej [mm]	10'	0
		60'	0
		10'	4,0
9	Zawartość powietrza [%]	60'	-

5. Właściwości stwardniałego betonu:

Lp.	Badana cecha	Jednostka	Wartość
1	Wytrzymałość betonu na ściskanie	2 dni	-
		7 dni	11,1
		28 dni	16,7
		56 dni	-
2	Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozciąganiu	16 dni	-
		28 dni	-
3	Nasiąkliwość	%	-
4	Wodoszczelność	Stopień W	-
5	Mrozoodporność zwykła	Stopień F	-
6	Mrozoodporność w soli odłóżkowej		-

6. Uwagi:

Skład mieszanki betonowej zaprojektowany w oparciu o wykonaną analizę siłową kruszywa. Recepturę należy zweryfikować na węzle podczas normalnych warunków produkcyjnych. Dozowanie domieszki chemicznej może ulec zmianie w zależności od panujących warunków atmosferycznych oraz czasu transportu mieszanki betonowej. W przypadku zmiany charakterystyki surowców, producent zastrzega sobie prawo do korekty receptury. Czas od pierwszego kontaktu cementu z wodą do wbudowania powinien wynosić max 90 min. Warunkiem niezbędnym do osiągnięcia projektowanych parametrów, jest właściwe prowadzenie procesu pielęgnacji wg PN-EN 13670.

Recepturę opracował:

Załącznik nr 30 – Recepta C12/15P

	Lafarge	
	Receptura laboratoryjna wg PN-EN 206:2014	Laboratorium CBB Kujawy
Projektowany beton	C12/15	
Inwestycja	RCC	
Normy	PN-EN 206:2014: Beton. Część 1. "Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność"	
	PN-88/B-06250: "Beton Zwykły"	

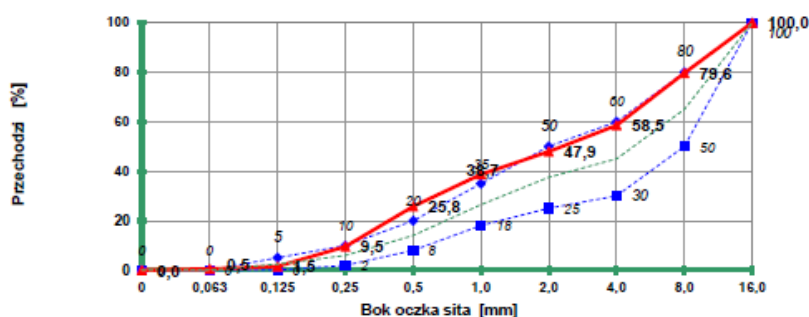
1. Dane projektowe mieszanki betonowej:

Klasa wytrzymałości na ściskanie	C12/15
Klasa konsystencji Ve-Be	-
Założona ilość powietrza [%]	4,0
Klasy ekspozycji	-
Maksymalny wymiar ziarn kruszywa [mm]	16

2. Receptura- skład suchy na 1m³ betonu:

Ilość składników na 1 m ³ mieszanki betonowej			Udział objętościowy %
Producent	Składniki	Ilość [kg/m ³]	
Lafarge	CEM II A-V 42,5R	200	
Lafarge	0	0	
Janikowo	Popiół lotny V	0	
MW	0	0	
Sępólno Wlk.	0-2 mm	1018	50
Sępólno Wlk.	2-8 mm	611	30
Sępólno Wlk.	8-16 mm	407	20
WODA	Woda wodociągowa	142	
0	0	0,00	0,00%
0	0	0,00	0,00%
Ciężar objętościowy mieszanki betonowej		2378,5	

3. Krzywa przesiewu:



4. Właściwości mieszanki betonowej:

Lp.	Badana cecha	Jednostka	Wartość
1	W/C	—	0,71
2	W/(C+P)	—	0,71
3	Punkt piaskowy	%	47,9
4	Objętość zaprawy	dm ³	575
5	Objętość zaczynu	dm ³	207
6	Zawartość cząstek < 0,25 mm	kg/m ³	394
7	Zawartość cząstek < 0,125 mm	kg/m ³	231
8	Konsystencja mieszanki betonowej [mm]	10'	0
		60'	0
9	Zawartość powietrza [%]	10'	4,0
		60'	-

5. Właściwości stwardniałego betonu:

Lp.	Badana cecha	Jednostka	Wartość
1	Wytrzymałość betonu na ściskanie	2 dni	-
		7 dni	13,3
		28 dni	20,5
		56 dni	-
2	Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu	16 dni	-
		28 dni	-
3	Nasiąkliwość	%	-
4	Wodoszczelność	Stopień W	-
5	Mrozoodporność zwykła	Stopień F	-
6	Mrozoodporność w soli odładzającej		-

6. Uwagi:

Skład mieszanki betonowej zaprojektowany w oparciu o wykonaną analizę sitową kruszywa. Recepturę należy zweryfikować na węźle podczas normalnych warunków produkcyjnych. Dozowanie domieszki chemicznej może ulec zmianie w zależności od panujących warunków atmosferycznych oraz czasu transportu mieszanki betonowej. W przypadku zmiany charakterystyki surowców, producent zastrzega sobie prawo do korekty receptury. Czas od pierwszego kontaktu cementu z wodą do wbudowania powinien wynosić max 90 min. Warunkiem niezbędnym do osiągnięcia projektowanych parametrów, jest właściwe prowadzenie procesu pielęgnacji wg PN-EN 13670.

Recepturę opracował:

Załącznik nr 31 – Recepta RCC C30/37Z

	Betoniarnia Lafarge Zielona Góra	
	Receptura laboratoryjna wg PN-EN 206:2014	Laboratorium CBB Kujawy
Projektowany beton	C30/37, V0, XC4, XD2, XF3, XA1	
Inwestycja	RCC bez zagęszczania Cementownia Kujawy	
Normy	PN-EN 206:2014: Beton. Część 1. "Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność"	
	PN-88/B-06250: "Beton Zwykły"	

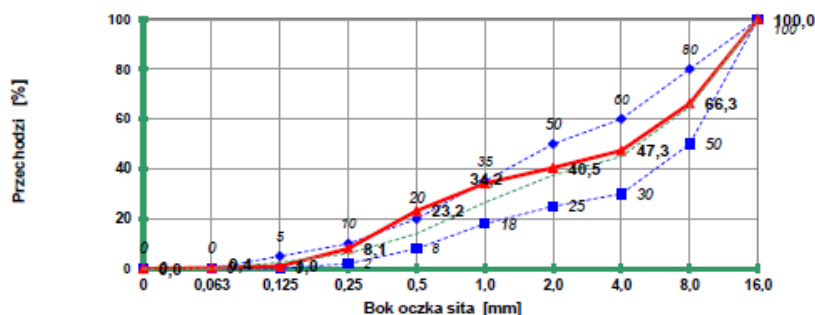
1. Dane projektowe mieszanki betonowej:

Klasa wytrzymałości na ściskanie	C30/37
Klasa konsystencji Ve-Be	15 s
Założona ilość powietrza [%]	4,0
Klasy ekspozycji	-
Maksymalny wymiar ziarn kruszywa [mm]	16

2. Receptura- skład suchy na 1m³ betonu:

Ilość składników na 1 m ³ mieszanki betonowej			Udział objętościowy %
Producent	Składniki	Ilość [kg/m ³]	
Lafarge	CEM I 42,5	315	
Gorzupia	0-2 mm	882	40
Lubień	2-8 mm	551	25
Lubień	8-16 mm	772	35
WODA	Woda wodociągowa	95	
SIKA	LPS A94	4,73	1,50%
0	0	0,00	0,00%
Ciężar objętościowy mieszanki betonowej		2619,5	

3. Krzywa przesiewu:



4. Właściwości mieszanki betonowej:

Lp.	Badana cecha	Jednostka	Wartość
1	W/C	—	0,30
2	W/(C+P)	—	0,30
3	Punkt piaskowy	%	40,5
4	Objętość zaprawy	dm ³	514
5	Objętość zaczynu	dm ³	201
6	Zawartość cząstek < 0,25 mm	kg/m ³	493
7	Zawartość cząstek < 0,125 mm	kg/m ³	338
8	Konsystencja mieszanki betonowej [mm]	10'	0
		60'	0
9	Zawartość powietrza [%]	10'	4,0
		60'	-

5. Właściwości stwardniałego betonu:

Lp.	Badana cecha	Jednostka	Wartość
1	Wytrzymałość betonu na ściskanie	2 dni	-
		7 dni	43
		28 dni	50,3
		56 dni	-
2	Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu	16 dni	-
		28 dni	-
3	Nasiąkliwość	%	-
4	Wodoszczelność	Stopień W	-
5	Mrozoodporność zwykła	Stopień F	-
6	Mrozoodporność w soli odładzającej		-

6. Uwagi:

Skład mieszanki betonowej zaprojektowany w oparciu o wykonaną analizę sitową kruszywa. Recepturę należy zweryfikować na węźle podczas normalnych warunków produkcyjnych. Dozowanie domieszki chemicznej może ulec zmianie w zależności od panujących warunków atmosferycznych oraz czasu transportu mieszanki betonowej. W przypadku zmiany charakterystyki surowców, producent zastrzega sobie prawo do korekty receptury. Czas od pierwszego kontaktu cementu z wodą do wbudowania powinien wynosić max 90 min. Warunkiem niezbędnym do osiągnięcia projektowanych parametrów, jest właściwe prowadzenie procesu pielęgnacji wg PN-EN 13670.

Recepturę opracował: