

POLITECHNIKA POZNAŃSKA



mgr inż. Andrzej Karłowski

ROZPRAWA DOKTORSKA

**HIERARCHICZNY SYSTEM PODEJMOWANIA DECYZJI
PRZY BETONOWANIU W OBNIŻONEJ TEMPERATURZE
PODEJŚCIE ELASTYCZNE**

Praca doktorska wykonana w Zakładzie Inżynierii Produkcji Budowlanej

Instytutu Budownictwa

Politechniki Poznańskiej

pod kierunkiem: dr hab. inż. Jerzy Pastawski, prof. PP

Poznań, 2023



Spis treści

Rozdział 1. Wstęp.....	4
1.1. Wprowadzenie	4
1.2. Istota problemu menadżerskiego	4
1.3. Badania Własne	8
1.4. Proponowane rozwiązania	10
Rozdział 2. Przegląd literatury.....	13
2.1. Wprowadzenie	13
2.2. Specyficzne warunki betonowania w okresie obniżonej temperatury	13
2.3. Podstawowy mechanizm destrukcji mrozowej betonu.....	15
2.4. Podstawowe zasady betonowania w obniżonej temperaturze	19
2.5. Nowe tendencje w technologii betonowania w obniżonej temperaturze	35
2.6. Nowe tendencje w dziedzinie zarządzania procesami budowlanymi	35
2.7. Podsumowanie.....	36
2.9. Zarządzanie procesami budowlanymi -problemy wewnętrzne	39
2.11. Nowe tendencje w zarządzaniu procesami budowlanymi.....	53
2.12. Podsumowanie rozdziału	64
Rozdział 3. Cel, tezy i przedmiot rozprawy	67
3.1. Cel rozprawy.....	67
3.2. Tezy rozprawy	67
3.3. Przedmiot rozprawy.....	67
3.4. Zakres rozprawy	68
Rozdział 4. Niezbędne elementy oraz uwarunkowania systemu doradczego.....	70
4.2. Monitoring w czasie rzeczywistym narzędzie niezbędne w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu.	79
4.3. Termodynamika tworzenia struktury betonu.....	81
Rozdział 5. Opis proponowanego systemu doradczego	84
5.1. Proponowany system doradczy.....	84
5.2. Idea systemu	85
5.3. Opis poziomu I – przygotowanie harmonogramu ogólnego	86
5.4. Podsumowanie etapu I	88
5.5. Opis poziomu II.....	89
5.6. Podsumowanie poziomu II	90
5.7. Opis poziomu III.....	90



5.8. Podsumowanie poziomu III	91
5.9. Algorytm – etapowanie podejmowania decyzji.....	92
5.10. Istota wieloetapowego podejmowania decyzji.....	93
Rozdział 6. System Doradczy COLCON.....	94
6.1.Przegląd współczesnych technik i urządzeń pomiarowych.	95
6.2. Cel i zakres badań własnych	96
6.3. Opis zastosowanego sprzętu pomiarowego wykorzystywanego w systemie ColCon.	97
6.4. Rozwój technik pomiarowych – rozbudowa systemu w przyszłości	105
6.5. Zastosowane oprogramowanie	105
6.6. Przykład badań	120
Rozdział 7. Wnioski.....	127
7.1. Wnioski ogólne	127
7.2.Wnioski szczegółowe	127
7.3.Kierunki dalszych badań okresu realizacji	128
Bibliografia.....	129
Załączniki	137
Dokumentacja fotograficzna	137
Zestawienie wyników badań terenowych i laboratoryjnych.....	143



Rozdział 1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Warunki klimatyczne jakie panują w Polsce powodują iż przez znaczną część roku trzeba się liczyć z średnimi temperaturami dobowymi poniżej +10°C, co według warunków normowych oznacza wykonywanie prac w warunkach występowania obniżonej temperatur.

Będąc zawodowo związany z branżą budowlaną od ok 15 lat czynnie uczestniczyłem w przygotowaniu w realizacji inwestycji przez sprawowanie funkcji: projektanta, kierownika czy inspektora nadzoru inwestorskiego. Bezpośrednie uczestnictwo i zaangażowanie w procesy inwestycyjne spowodowało, że zauważyłem iż w obecnym czasie istotnymi elementami są jakość wykonanych prac, możliwość zapewnienia ciągłości zatrudnienia i przede wszystkim przy krótkich okresach realizacji możliwości wykonywania robót betonowych i żelbetowych przez cały rok bez względu na warunki atmosferyczne.

Natomiast wymagania inwestorów związane z możliwie krótkoterminową realizacją inwestycji związanej z zainwestowanym kapitałem - szybkim zwrotem zaangażowanych środków stawia przed wykonawcą obecnie wygórowane wymagania związane z realizacją inwestycji często przy niekorzystnych warunkach atmosferycznych.

1.2. Istota problemu menadżerskiego

Wykonywanie robót w okresie obniżonej temperatury nastrocza wiele problemów organizacyjnych przede wszystkim zmiany technologii wykonania robót związanych z wyposażeniem w odpowiednie materiały, sprzęt budowlany, zabezpieczenie pracowników.

Główne ograniczenia jakie należy uwzględnić to zapewnienie odpowiedniej temperatury koniecznej do prawidłowego przebiegu procesu technologicznego oraz ochrona przed opadami atmosferycznymi. Dodatkowo istotnym elementem jest zapewnienie pracownikom odpowiednich warunków pracy i spełnienie przepisów dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia.

Sprostanie tym dodatkowym wymaganiom powoduje, że prowadzenie robót budowlanych w warunkach obniżonej temperatury zawsze wiąże się z istotnym wzrostem nakładów finansowych przy jednoczesnym zaostreniu rygorów dotyczących jakości robót.

W związku z powyższym konieczność prowadzenia robót w okresie obniżonej temperatury powinna być poddana wnikliwej analizie ekonomicznej. Wskazane jest ograniczanie do niezbędnego minimum



wykonywanie robót ziemnych, a przede wszystkim wznoszenia konstrukcji budynków w technologii monolitycznej.

Problem prowadzenia robót w warunkach obniżonej temperatury dobowej się wraz z nadejściem okresu jesienno-zimowego, zimowo-wiosennego który w naszych warunkach klimatycznych występuje od 1 października do 30 kwietnia.

Za warunki obniżonej temperatury zgodnie z wytycznymi ITB określa się czas w którym średnia temperatura dobową spada poniżej $+10^{\circ}\text{C}$. Natomiast większym problemem jest sytuacja kiedy w dniu rozpoczęcia robót monolitycznych warunki były sprzyjające a nagle w ciągu doby dochodzi do znacznego obniżenia temperatury poniżej $<0^{\circ}\text{C}$.

Ze względu na zakres pracy analizę wpływu obniżonej temperatury zawężono do procesów związanych z wykonywaniem robót monolitycznych w obniżonej temperaturze.

W trakcie wieloletniej praktyki przy realizacji robót betonowych stwierdzić należy, iż wielu inwestorów i wykonawców nie jest świadomych ryzyka, jakie niesie ze sobą prowadzenie robót monolitycznych w warunkach obniżonej temperatury.

Wykonywanie robót monolitycznych w warunkach obniżonej temperatury ma ujemny wpływ na dynamikę twardnienia betonu - niska temperatura spowalnia przebieg procesu hydratacji cementu, wydłuża jego czas wiązania, co powoduje opóźnienie procesu narastania wytrzymałości, przy niskich temperaturach może nastąpić całkowite zatrzymanie procesu hydratacji o ile nie wystąpi obniżenie temperatury powodujące jego zamrożenie.

Istotnym elementem jest znaczne obniżenie temperatury we wczesnej fazie wiązania-dojrzwania betonu, gdyż może to doprowadzić do uszkodzenia powstającej w trakcie dojrzwania mikrostruktury betonu -rozrywanie wiązań - przez zamarzającą wodę prowadzi to do obniżenia wytrzymałości i trwałości betonu a w wielu przypadkach do znacznej degradacji, co wiąże się z rozbiórką elementu i jego ponownym wykonaniem.

Wyróżnić należy cztery okresy wczesnego dojrzwania betonu:

- przed rozpoczęciem wiązania
- między początkiem i końcem wiązania
- od końca wiązania do uzyskania wytrzymałości tzw. krystalicznej
- powyżej wytrzymałości krystalicznej



Największe straty wytrzymałości betonu wywołane jego zamarznięciem zachodzą wtedy, gdy występuje ono w okresie między rozpoczęciem wiązania a uzyskaniem wytrzymałości "krytycznej". W przypadku gdy wytrzymałość betonu będzie zbyt niska, aby przenieść naprężenia wynikające z ciśnienia lodu rozszerzającego się przy zamarzaniu, występują uszkodzenia struktury, co związane jest z obniżeniem końcowej wytrzymałości betonu i pogorszeniem jego jakości. Straty wytrzymałości mogą dochodzić nawet do 80%, zwłaszcza jeśli zamrożenie było wielokrotne. Beton po osiągnięciu wytrzymałości „krytycznej” - odporności mrozowej, tj. $0,2R_{28}$ czyli około 5 MPa, jest odporny na uszkodzenia spowodowane działaniem niskiej temperatury.

Aby zapewnić skuteczną ochronę przed niską temperaturą konieczne jest wcześniejsze przygotowanie odpowiedniej technologii realizacji procesu betonowania w obniżonej temperaturze nie oznacza to jednak że zastosowanie odpowiednich i dodatkowych środków umożliwi wykonanie tych robót bez względu na zakres obniżonej temperatur.

Przy temperaturze otoczenia poniżej -15°C prac związanych z układaniem mieszanki betonowej nie powinno się wykonywać. Natomiast często bywa tak iż temperatura jest wyższa niż określone w normie -15°C i odniesienie do aktualnej na dzień podejmowania decyzji temperatury bez analizy prognozy może doprowadzić do podjęcia nie właściwej decyzji związanej z betonowaniem.

Zasady wykonywania robót monolitycznych w warunkach obniżonej temperaturze zawarte są w instrukcji ITB nr 282 (Wytyczne wykonywania robót budowlano-montażowych w okresie obniżonej temperatur).

Czas w jakim beton może zamarznąć jest zależny od wielu czynników między innymi:

- temperatury otoczenia w trakcie układania mieszanki betonowej;
- temperatury mieszanki betonowej w chwili jej wbudowania;

W związku z powyższym w okresie obniżonej temperatury zaleca się stosowanie odpowiednich technologii poprzez:

- dobór odpowiedniej mieszanki betonowej poprzez stosowanie cementów o wyższej zawartości klinkieru np CEM I i CEM II;
- stosowanie domieszek w celu zmniejszenia ilości wody która może zamarznąć;

- stosowanie domieszek przeciw mrozowym zwiększających stężenie soli obniżających temperaturze zamarzania wody;
- podgrzewanie kruszyw i wody zarobowej;
- napowietrzanie mieszanki betonowej;

Badania związane z doбором odpowiednich technologii zabezpieczenia mieszanki betonowej przed niekorzystnym wpływem oddziaływania obniżonej temperatury przeprowadzono wielokrotnie zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i na budowie, co wykazało iż powyższe rozwiązania sprawdzają się w określonych przewidywanych warunkach. Problem pojawia się wtedy, gdy nagle następuje znaczne obniżenie temperatury otoczenia poniżej spodziewanej czy też prognozowanej wartości i założone parametry zabezpieczenia mieszanki betonowej okazują się niewystarczające.

W swojej praktyce spotkałem się z przypadkiem wykonania stropu nad parterem w budynku mieszkalnym jednorodzinny w warunkach obniżonej temperatury (temperatura w nocy spadła poniżej -9°C) oraz z posadzką betonową wykonywaną w temperaturze znacznie powyżej 5°C i w tym przypadku w nocy również wystąpiło znaczne obniżenie temperatury -7°C w obu przypadkach trzeba było dokonać rozbiórki i wykonać te elementy na nowo. Nie było możliwości naprawy gdyż wykonane elementy nie miały odpowiedniej wytrzymałości (wymaganej w projekcie), wystąpiły znaczne złuszczenia koszty wykonania tych elementów ostatecznie wynosiły ok 300% w stosunku do wartości zakładanej.

W wyniku przemrożenia betonu mogą pojawić się mikropęknięcia a także pojawić się łuszczenie, co oznaczać może konieczność wyburzenia danego elementu, ze względu na brak osiągnięcia wymaganych parametrów (np. wytrzymałości na ściskanie lub obniżonej trwałości elementu konstrukcji oraz odpowiednich walorów użytkowych np. w przypadku nawierzchni betonowych i posadzek.



Rysunek 1.1. uszkodzenie powierzchni stropu



Rysunek 1.2. uszkodzenie posadzki przemysłowej

Powyższe rysunki (rys.1.1 i rys. 1.2.) przedstawiają typowe uszkodzenia stropu i posadzki w wyniku nagłego obniżenia temperatury otoczenia we wczesnej fazie dojrzewania mieszanki betonowej.

Przyczyny takiego stanu rzeczy, które można wskazać na podstawie posiadanej wiedzy i mojego doświadczenia to:

- brak odpowiedniej wiedzy wykonawcy i inwestora,
- ryzyko związane z dużą dynamiką zmian,
- tradycyjne podejście do zarządzania procesami budowlanymi,
- niska jakość robót budowlanych brak odpowiedniej kadry,

1.3. Badania Własne

Problem betonowania w obniżonej temperaturze okazał się być bardzo interesujący i postanowiłem to zgłębić. Na podstawie analizy literatury oraz praktyki budowlanej uznano wtedy, iż istotnym elementem jest analiza zmian temperatury w mieszance betonowej oraz w otoczeniu w jakim przebiega proces dojrzewania.

W roku 2006 zakupiono pierwszy rejestrator dzięki któremu można było analizować przebieg zmian temperatury we wczesnej fazie dojrzewania betonu z wykorzystaniem czujników przewodowych PT100.

Przedmiotowy rejestrator wraz z zestawem czujników wykorzystywany był wielokrotnie w trakcie badań laboratoryjnych oraz na budowie.

Kolejnym etapem było wyposażenie rejestratora w moduł GSM oraz zakup drugiego rejestratora z wbudowanym modułem GSM. Umożliwiło to prowadzenie badań zarówno na budowie jak i w laboratorium oraz odczytywanie danych - analizowanie wyniki w czasie rzeczywistym z dowolnego



miejsca z zasięgiem danych komórkowych lub z dostępem do internetu poza laboratorium i placem budowy.

Po wieloletniej analizie przebiegu zmian temperatury mieszanki o różnych parametrach okazało się, iż istotnym zagadnieniem jest nie tylko prognoza ale sprawdzalność prognozy pogody. Gdyż w przypadku wyboru odpowiedniej opcji zabezpieczania mieszanki betonowej dla prognozowanych warunków pogodowych przy niekorzystnej zmianie - pogorszeniu pogody (znaczne obniżenie temperatury otoczenia względem prognozowanej temperatury). Może się okazać, iż informacje są błędne, może to spowodować uszkodzenia mieszanki betonowej. Jeżeli się okaże iż nie udało się wyeliminować uszkodzeń spowodowanych działaniem mrozu występujących przy znacznych gwałtownych obniżeniach temperatury wykonywany element nie będzie miał zakładanej wytrzymałości i trzeba będzie dokonać rozbiórki i wykonać go na nowo co wielokrotnie zwiększy koszt realizacji przedmiotowego elementu i dodatkowo wykonawca będzie musiał ponieść kary za opóźnienia lub nieterminowe zakończenie całego przedsięwzięcia.

W kolejnym etapie zakupiono stację pogodową z modułem internetowym dzięki któremu można było zbierać lokalne parametry czynników pogodowych oraz weryfikować zgodność prognozy pogody.

Lokalna stacja pogodowa pozwala określić współczynniki korekcyjne względem prognozowanej pogody dla danego obszaru a konkretną lokalizacją - terenu budowy.

W późniejszym czasie park sprzętowy wzbogacono o autonomiczne czujniki bezprzewodowe współpracujące przez protokół BT (bluetooth) z rejestratorem GSM.

Odpowiednie zaplecze sprzętowe oraz praca przy realizacji inwestycji budowlanych związanych z wykonywaniem- nadzorowaniem elementów betonowych i żelbetowych pozwoliła na wykonywanie badań w warunkach rzeczywistych na budowie.

Natomiast w laboratorium Politechniki Poznańskiej wykonywane były badania w warunkach laboratoryjnych w komorze klimatycznej i komorze chłodniczej.

W okresie niespełna 15 lat wykonano dziesiątki pomiarów i rejestracji zmian temperatury we wczesnej fazie wiązania betonu. Badania realizowano na budowie oraz w warunkach laboratoryjnych, co pozwoliło na stworzenie bazy danych opartych na różnorodnych przypadkach. Ze względu na objętość tylko część tych wyników została umieszczona w rozprawie w formie załączników w postaci tablic pomiarowych, wykresów oraz parametrów charakterystycznych badanej mieszanki betonowej.



1.4. Proponowane rozwiązania

Zagadnienie betonowania w obniżonej temperaturze oraz niska jakość robót budowlanych jest dość powszechna i generuje poważne dalsze konsekwencje w postaci:

- przekroczenia budżetu
- przekroczenia terminów realizacji

oraz dodatkowo inne problemy, takie jak:

- konieczność rozbiórki i ponownego wykonania (ang. rework)
- utrata reputacji na rynku
- spory pomiędzy uczestnikami przedsięwzięcia (powoływanie ekspertów itp.).

Logicznym działaniem w celu zagwarantowania prawidłowego przebiegu procesów jest przede wszystkim racjonalne planowanie, gwarantujące odpowiednią synchronizację poszczególnych procesów realizowanych przez różnych wykonawców. Już na tym etapie widoczne są problemy wynikające z konieczności realizacji procesów w warunkach zmiennego otoczenia. Nawet relatywnie krótki horyzont planowania nie gwarantuje możliwości realnego przewidywania warunków, w których proces będzie przebiegał. Dodatkowo w przypadku robót betonowych należy wziąć pod uwagę zmieniające się cechy mieszanki betonowej i betonu w czasie. Ma to znaczenie w procesie dostawy mieszanki betonowej. Ryzyko niekorzystnej zmiany jej cech (np. konsystencja czy temperatura mieszanki betonowej) przed dostarczeniem na budowę, jak i w późniejszym procesie dojrzewania (często trudno jest zapewnić odizolowanie betonu w dojrzewającym elemencie betonowym od otoczenia). Głównymi czynnikami tych zmian właściwości są czas i temperatura.

Analizując różne możliwości zarządzania produkcją budowlaną i typową produkcją fabryczną, podkreślić należy wysoki poziom ryzyka i niepewności, dużą zmienność i złożoność charakterystyczną dla produkcji budowlanej.

W celu ograniczenia wpływu tych niekorzystnych oddziaływań podejmowane są różne działania, z których wymienić należy:

- usprawnienie planowania (np. Last Planner®),
- zastosowanie rozwiązań zmierzających do upodobnienia budownictwa do produkcji fabrycznej (uprzemysłowienie budownictwa w postaci prefabrykacji czy systemu budownictwa monolitycznego),



- zastosowanie systemów zarządzania jakością (łączonych często także z BHP i zarządzaniem środowiskiem), które prowadzą do opracowania biblioteki dobrych praktyk – procedur postępowania przy realizacji procesów budowlanych),
- monitorowanie wybranych parametrów procesów (np. temperatura),
- outsourcingu opartego na zarządzaniu ryzykiem i powierzeniu często wielu procesów zewnętrznym organizacjom (podwykonawcom).

Na bazie doświadczeń własnych i licznych przykładów z literatury (omawianej szerzej w następnym rozdziale) stwierdzić można, że powyższe działania przynieść mogą ograniczone efekty, gdyż nie ograniczają ryzyka wynikającego z konieczności podejmowania decyzji technologicznych z pewnym wyprzedzeniem w stosunku do momentu realizacji. Szczególnym przypadkiem są tu procesy związane z zastosowaniem mieszanki betonowej i realizacją ich w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu. Ideę redukcji ryzyka dzięki zastosowaniu etapowego podejmowania decyzji przy zastosowaniu podejścia elastycznego. Koncepcja trójpoziomego systemu doradczego do wspomagania decyzji technologicznych przy betonowaniu jest rozwiązaniem własnym opracowanym na podstawie doświadczeń na budowie jako kierownik, inspektora czy też menadżera przedsięwzięć budowlanych.

Motywacją do podjęcia przedstawionej tematyki jest wieloletnia praktyczna działalność w dziedzinie budownictwa i obserwacja problemów związanych z prawidłowym przebiegiem procesu dojrzewania mieszanki betonowej. Kluczową przyczyną problemów w zarządzaniu procesami budowlanymi jest deficyt informacji w momencie podejmowania decyzji, i podejmowanie decyzji przy akceptacji znacznego ryzyka wynikającego z akceptacji tej luki informacji.

Jedną z wielu przesłanek były zaobserwowane w uszkodzenia elementów betonowych wykonywanych w okresie obniżonej temperatury które wymagały rozbiórki i ponownego wykonania.

W pamięci mam problem wcześniej przytoczonych przykładów: uszkodzenia płyty szczelnej na stacji paliw czy uszkodzenie stropu betonowanego w warunkach zagrożenia spadkiem temperatury. w obu przypadkach do uszkodzeń doszło w weekend. Wykonawca i pracownicy wierzyli, że domieszki umożliwiają betonowanie w temperaturze do -15°C . Następnie kiedy już było jasne, że nastąpi znaczne obniżenie temperatury poniżej -15°C – wykonawca wraz z pracownikami przyjechał na budowę w celu zabezpieczenia wykonanych elementów i przykrył je folią budowlaną. Efekt był taki iż to okrycie powierzchni betonowej nie zabezpieczyło dojrzewającej mieszanki betonowej a dodatkowo na całym stropie było widać odciski gumowców pracowników układających tą folię. Po kilku dniach beton miał



wytrzymałość tylko 4-6 MPa i wszystko wskazywało na uszkodzenia struktury betonu w początkowym etapie dojrzewania.

W związku z powyższym uznano iż istotnym problem we wczesnej fazie dojrzewania betonu jest dobór odpowiedniej mieszanki oraz terminu rozpoczęcia i wykonania prac z uwzględnieniem prognozy pogody i etapowaniem poszczególnych decyzji .



Rozdział 2. Przegląd literatury

2.1. Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale przedstawiono kluczowe problemy występujące przy betonowaniu w sytuacji zagrożenia nagłym spadkiem temperatury na tle poglądów wielu naukowców, którzy podjęli badania w dziedzinie betonowania w obniżonej temperaturze oraz w świetle obowiązujących zaleceń, instrukcji i norm. W pierwszej części omówiono specyficzne warunki betonowania w okresie obniżonej temperatury – definiując warunki podane w różnych instrukcjach i normach. Następnie opisano mechanizm ewentualnej destrukcji mrozowej. Kolejnym omawianym zagadnieniem są zasady betonowania w obniżonej temperaturze. Następnie omówiono innowacyjne trendy technologiczne w omawianej dziedzinie. Wskazano także podstawowe problemy w zarządzaniu procesami budowlanymi wraz z aktualnymi rozwiązaniami. Rozdział zakończono podsumowaniem.

2.2. Specyficzne warunki betonowania w okresie obniżonej temperatury

Warunki zimowe (lub zgodnie z Instrukcją ITB nr 282, której aktualna wersja z roku 2011 będzie modyfikowana w najbliższym czasie) – warunki obniżonej temperatury – stanowią zagrożenie jakości procesu uzasadniające przyjęcie odpowiednich procedur specjalnych dotyczących betonowania w tych warunkach. Obecnie instrukcja na wstępie (ITB 282 2011:7) definiuje jako okres obniżonej temperatury, jako okres, w którym średnia temperatura dobowa powietrza podczas robót ziemnych wynosi poniżej -1°C , a podczas innych robót budowlanych – poniżej $+5^{\circ}\text{C}$. Później – przy okazji omawiania robót betonowych (rozdział 5), jako obniżoną temperaturę przyjmuje się temperaturę otoczenia wynoszącą $+10^{\circ}\text{C}$. Zasady wykonywania betonów w obniżonej temperaturze obowiązują, gdy co najmniej w 3 kolejnych dobach średnia temperatura otoczenia jest mniejsza niż $+10^{\circ}\text{C}$ (ITB 282 2011:67). Średnią dobową temperaturę powietrza na poziomie $+5^{\circ}\text{C}$ omawiana instrukcja zaleca traktować jako wartość graniczną, poniżej której ułożoną mieszankę betonową należy chronić przed utratą ciepła. Nawiązuje to do wskazanych dwóch poziomów temperatury w poprzedniej wersji Instrukcji ITB nr 282 z roku 1995 (ITB 282 1995):

- warunków obniżonej temperatury – średnia dobowa poniżej $+10^{\circ}\text{C}$,
- warunków zimowych – średnia dobowa temperatura powietrza poniżej $+5^{\circ}\text{C}$.

Ta ostatnia wartość nawiązuje także do wytycznych zawartych w normach w innych krajach, np.:



- USA – (ACI 306R 2016) – warunki obniżonej temperatury (*cold weather concreting*) występują, gdy temperatura powietrza spadła lub przewiduje się jej spadek poniżej 40°F (4°C) w okresie ochronnym. Okres ten jest określony jako przedział czasu niezbędny w celu ochrony betonu przed niekorzystnym oddziaływaniem niskiej temperatury,

- Kanada – (CSA A23.1/A 23.2) – warunki obniżonej temperatury (*cold weather concreting conditions*), kiedy temperatura powietrza wynosi +5°C lub kiedy istnieje prawdopodobieństwo, że spadnie ona poniżej +5°C w ciągu 24 godzin od ułożenia mieszanki betonowej,

- Afryka Południowa - SANS 10100-2:2014 – Concreting in cold weather (7.2.1.4.1) – beton nie powinien być układany, jeżeli temperatura spada i temperatura otoczenia wynosi poniżej +7°C lub , gdy podczas wzrostu temperatury wynosi poniżej 3°C. Kiedy temperatura podczas układania jest niższa niż 5°C, temperatura betonu nie powinna być niższa niż 10 °C. W tym celu dozwolone jest ogrzewanie wody lub/i kruszywa. Podgrzaną wodę i kruszywo należy najpierw wymieszać, a cement dodać dopiero wtedy, gdy temperatura mieszanki będzie niższa niż 30°C. Temperatura układanego betonu nie może spaść poniżej 5 °C, dopóki beton nie osiągnie wytrzymałości co najmniej 5 MPa.

Jak widać z tego krótkiego przeglądu warunki obniżonej temperatury definiowane są w podobny sposób – temperatura średnia dobowa (obliczana jako średnia z pomiarów o godz. 7 i 19 oraz temperatury minimalnej i maksymalnej dobowej – wg zarządzenia dyrektora IMGW z dnia 06.09.1995). Warto dodać, że poprzednia definicja średniej temperatury dobowej (Instrukcja ITB z roku 1995) opierała się na pomiarach trzech wartości: o godz. 7, 14 i 21, przy czym ostatnia wartość była uwzględniana ze współczynnikiem 2. Zagadnienie zmian zasad obliczeń średniej temperatury dobowej staje się coraz bardziej aktualne w związku z postępującą automatyzacją pomiarów (Bonacci et al., 2013) .

Przyjęcie temperatury średniej dobowej powyżej 0°C ma swoje uzasadnienie w amplitudzie dobowej, która powinna zapewnić zabezpieczenie betonu przed oddziaływaniem mrozu.

Kluczowym problemem z punktu widzenia betonowania jest zagrożenie nagłym spadkiem temperatury, zwłaszcza podczas dojrzewania betonu. W niekorzystnych warunkach może to oznaczać trwałe uszkodzenie struktury dojrzewającego betonu i obniżenie parametrów wytrzymałościowych do poziomu poniżej wymagań jakościowych. W rezultacie prowadzić to może do konieczności wyburzenia przedmiotowego elementu i wykonania go ponownie. Przyjęto, że uzyskanie odporności mrozowej w oparciu o wytrzymałość na ściskanie (Instrukcja ITB 282/2011) na poziomie:

- 5 MPa dla cementów portlandzkich CEM I,



- 8 MPa dla cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II
- około 10 MPa dla cementów hutniczych CEM III.

Ponieważ osiągnięcie tej wytrzymałości krytycznej oznacza odporność na zamrożenie (jednak nie na działanie cyklicznego zamrażania/rozmarzania) istotnym jest uzyskanie jej w relatywnie krótkim okresie (najlepiej kilkunastu godzin – w przypadku typowych przymrozków pojawiają się one zwykle nad ranem dnia następnego), co może być utrudnione ze względu na niską temperaturę otoczenia. Niezwykle istotnym jest zatem odpracowanie procedur postępowania umożliwiających osiągnięcie odporności mrozowej w celu ograniczenia ryzyka destrukcji mrozowej.

2.3. Podstawowy mechanizm destrukcji mrozowej betonu

Betonowanie w warunkach obniżonej temperatury stanowi wyzwanie technologiczne szczególnie w przypadku zagrożenia nagłym spadkiem temperatury. Realizacja robót betonowych powinna być prowadzona zgodnie z zasadami podanymi w PN-EN 13670, a jego produkcja powinna spełniać wymagania norm PN-EN 206-1 oraz PN-B-06265 (ITB 282/2011).

Skutki zamrożenia betonu zależą od okresu, w którym nastąpi jego zamrożenie. Z tego punktu widzenia można wyróżnić 4 okresy dojrzewania betonu (ITB 282/2011):

- okres A – przed początkiem wiązania
- okres B – po rozpoczęciu wiązania, ale przed jego końcem
- okres C – po zakończeniu wiązania, ale przed osiągnięciem odporności mrozowej (*frost resistance*)
- okres D – po osiągnięciu tzw. odporności mrozowej – wytrzymałości krytycznej (zamrożenie betonu po uzyskaniu pełnej odporności).

Za szczególnie niebezpieczne uznać należy zamrożenie betonu tuż przed zakończeniem wiązania lub zaraz potem (ITB 282/2011). W tym krytycznym momencie stopień szkodliwości zamrażania (rozumiany jako strata wytrzymałości na ścisnienie w stosunku do wytrzymałości, jaką można osiągnąć przy prawidłowym przebiegu procesu dojrzewania wynosi może do 80% (przy jednokrotnym zamrożeniu) lub do 100% (przy wielokrotnym zamrożeniu (Edmeandes i Day 1992), co ilustruje rys. 2.1.



Rysunek 1 Wpływ zamarznięcia betonu w okresie dojrzewania na końcową wytrzymałość

Punkt 1. czas początku wiązania

Punkt 2. Czas końca wiązania

Punkt 3 czas uzyskania przez beton odporności na zamarzenie

(Neville, 2012) porównuje oddziaływanie mrozu na beton do oddziaływania mrozu na grunty spoiste. Jeżeli beton nie związał, a może zamarznąć, to działanie mrozu będzie podobne do działania ujemnej temperatury na grunt nasycony wodą – ulega pęcznieniu – w rezultacie całkowita objętość betonu wzrasta. Poza tym, z uwagi na brak wody niezbędnej do reakcji chemicznych, dalsze wiązanie betonu ulega opóźnieniu. Neville zwraca dalej uwagę, że jeżeli zamarzenie betonu nastąpiło bezpośrednio po ułożeniu, to wiązanie nie nastąpi jeszcze, a więc nie utworzy się jeszcze struktura betonu, która będzie mogła być zniszczona przez tworzenie się lodu. W okresie obniżenia temperatury poniżej punktu zamarzania proces wiązania nie zachodzi. Po rozmrożeniu Neville zaleca ponowne zawibrowanie, co zapewni poprawne wiązanie i twardnienie. W przeciwnym wypadku (brak rewibracji) należy liczyć się, że beton będzie zawierał dużą ilość porów i w konsekwencji wytrzymałość betonu będzie bardzo niska. Jeżeli beton zamarznie po związaniu betonu, jednak przed osiągnięciem odpowiednio wysokiej wytrzymałości na ściskanie, to pęcznienie wynikające z tworzenia się lodu powoduje zniszczenie struktury i nieodwracalną stratę wytrzymałości betonu. Odporność betonu charakteryzującego się odpowiednio wysoką wytrzymałością na ściskanie na zniszczenie podczas oddziaływania mrozu wynika nie tylko z większej wytrzymałości na ciśnienie lodu, ale także z faktu, że duża część wody zarobowej trafi do małych porów żelowych i nie będzie zamarzać (Neville, 2012).

(Jóźwiak, Ireneusz; Kliszczewicz, Ryszard; Zybura, 2006) podkreśla znaczenie przemieszczania się fazy gazowej i ciekłej w betonie, przyjmując na potrzeby analizy niszczącego działania mrozu dwa rodzaje

przepływów: dyfuzję pary wodnej i przepływ kapilarny wody. Woda w betonie znajduje się w układzie połączonych porów o zróżnicowanym kształcie i różnej budowie. Jóźwiak podkreśla, że nie łączna porowatość (objętość wolnych przestrzeni), ale rozkład porów w betonie przy uwzględnieniu ich zróżnicowanych rozmiarów ma decydujące znaczenie dla trwałości betonu (przy uwzględnieniu jego przepuszczalności). Klasyfikację porów podano w tablicy 2.1.

Tabela 2.1 Klasyfikacja porów (Brandt 2003)

Lp.	Klasyfikacja	Rozmiary	Metody badania	Przyczyny powstania	Znaczenie
1	Duże pory	>500µm	Mikroskopia optyczna	Sztuczne napowietrzanie albo niedostateczne zagęszczanie	Zmniejszają wytrzymałość
2	Pory wprowadzone (środek napowietrzający)	(50-1250) µm Zwykle <500µm	Mikroskopia optyczna	Sztuczne napowietrzanie	Nieco zmniejszona wytrzymałość, podwyższona odporność na cykliczne zamrażanie/odmrażanie
3	Makropory	>50 nm	Porozymetria rtęciowa	Pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą w zaczynie	Decydują o przepuszczalności i trwałości
4	Mezopory	(2,5÷50) nm	Porozymetria rtęciowa, adsorbpcja-desorpcja gazów	Pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą w zaczynie, mniejsze pory rozmieszczone w C-S-H	Zjawiska kapilarne powodują naprężenia podczas wysychania betonu
5	Mikropory - pory żelowe	<2,5 nm	adsorbpcja-desorpcja gazów	Rozmieszczone w C-S-H	Zjawiska kapilarne mogą występować podczas nawilżania i wysychania

UWAGA: od poziomu 3 – występują pory kapilarne

Za twórcę pierwszej teorii destrukcji mrozowej uznać można (Powers, 1945), który zauważył, że główną przyczyną zniszczenia betonu jest narastające ciśnienie hydrauliczne, które rośnie podczas tworzenia się lodu, kiedy woda jest usuwana z porów betonu. Hipoteza ta nosi nazwę hipotezy ciśnienia hydraulicznego (*hydraulic pressure theory*).

Kolejna hipoteza mechanizmu zamkniętego pojemnika (*closed container theory*) została również zaprezentowana przez (POWERS, 1958). Bazuje ona na znanym powszechnie fakcie, że objętość lodu jest około 9,3% większa od objętości wody. Przy odpowiednio wysokim poziomie saturacji – powyżej 91,7%, jak podają zgodnie (Chatterji, 2003; Rosenqvist et al., 2015) oraz (Łagoda & Gajda, 2021), w temperaturze – 1°C (Józwiak-Niedźwiedzka, 2006)), ciśnienie osiągnie ok. 10 MPa, co doprowadzi do uszkodzenia struktury o niewielkiej wytrzymałości na rozciąganie.

Jednakże nie wszystkie obserwacje zmian objętościowych dadzą się wyjaśnić przy użyciu omawianych wyżej teorii (a zwłaszcza teorią ciśnienia hydraulicznego) (Rosenquist i in. 2015):

- nasycone próbki nienapowietrzonej zaprawy cementowej nadal się rozszerzały, pomimo że zatrzymania spadku temperatury i utrzymywania jej na stałym poziomie,
- zaobserwowano, że próbki napowietrzonej zaprawy cementowej skurczyły się bardziej niż to można wyjaśnić skurczem termicznym.

Kolejna teoria – teoria ciśnienia osmotycznego – została zaproponowana przez Helmuth'a i Powers'a (Powers & Helmuth, 1953). Zgodnie tą teorią (*osmotic micro ice body growth*) zamarzanie zaczyna się w większych porach – kapilarach, a przy stopniowym obniżaniu temperatury ciśnienie wzrasta w mniejszych porach. Dla danej temperatury w porach kapilarnych ustala się pewna równowaga pomiędzy ilością wody i lodu. Jak podaje Józwiak (2006), po przejściu przemiany fazowej pewnej ilości wody w lód, stężenie pozostałego roztworu wzrasta i osiąga taką wartość, że dalsze obniżenie temperatury musi nastąpić w celu zapewnienia postępu zmiany wody w lód. Nazwa omawianej teorii wynika z różnic w stężeniu roztworu w małych i większych porach – roztwór dążąc do wyrównania stężeń dyfunduje z mniejszych do większych porów (o większej koncentracji roztworu) (Wawrzeńczyk, i, et al., n.d.; Wawrzeńczyk, Molendowska, et al., n.d.).

Z pozostałych, dostępnych w literaturze teorii (Łagoda i Gajda, Józwiak 2006, Rosenquist i in. 2015), na uwagę zasługuje hipoteza (Fagerlund, 1977) , oparta na krytycznym stopniu nasycenia. Fagerlund badając próbki tego samego betonu, lecz o różnym stopniu zawilgocenia określił krytyczny jego poziom. Dla betonów zwykłych zakres krytycznego stopnia nasycenia wynosi od 0,75 do 0,90 (Fagerlund, 1971, 1977; Levitt, 1977).



Podane na podstawie powyższego przeglądu podstawowe teorie destrukcji mrozowej stanowią podstawę zrozumienia tego mechanizmu. Jak widać samo uwzględnienie problemu zwiększania objętości wody pod wpływem przemiany fazowej cieczy w lód nie wystarczą – chodzi przede wszystkim o uwzględnienie zróżnicowania oddziaływania mrozu na wodę znajdującą się w porach o różnej średnicy. Stanowi to podstawę zabezpieczenia betonu przed destrukcyjnym działaniem mrozu poprzez jego napowietrzanie.

2.4. Podstawowe zasady betonowania w obniżonej temperaturze

Ogólna analiza literatury przedmiotu rozprawy pozwala na stwierdzenie zastosowania dwóch zasadniczych podejść przy ustalaniu zasad prowadzenia robót betonowych w obniżonej temperaturze:

- prowadzenie robót przy założeniu jak najszybszego uzyskania wytrzymałości mrozowej (zakładamy utrzymanie warunków dojrzewania w temperaturze dodatniej i zapewnienie relatywnie wysokiego tempa dojrzewania betonu),
- zapewnienie możliwości dojrzewania betonu w temperaturze obniżonej (poniżej +5°C) bazujące na wykorzystaniu systemu modyfikacji betonu ukierunkowane na obniżenie temperatury zamarzania wody w betonie (Cold Weather Admixture System –(L. A. Barna et al., 2011)).

Drugie z wymienionych podejść preferowane może być w sytuacji, gdy podłoże stanowi wieczna zmarzlina (Krylov & Raton London New York, 2020),(Alzaza et al., 2022) co jest często spotykane w północnej części Rosji, Norwegii, Finlandii czy Kanady. Naturalnie te wyjątkowe sytuacje wymuszają zerwanie z tradycyjnymi metodami i poszukiwanie możliwości specjalnych (np. pozostawienie świeżego betonu do zamarznięcia i oczekiwanie na ocieplenie).

Typowym podejściem jest natomiast dążenie do osiągnięcia wytrzymałości mrozowej poprzez stosowanie osłon i/lub nagrzew, jednak należy zdawać sobie sprawę, że w niektórych sytuacjach stosowanie osłon może być utrudnione (np. silny wiatr – (Yoneyama et al., 2021)).

Omawiając postępowanie przy betonowaniu w obniżonej temperaturze można wskazać 5 głównych etapów tego postępowania:



1. Przygotowanie do robót betonowych na placu budowy.

Należy przygotować plan działania przed nadejściem okresu obniżonej temperatury (np. przygotować sprzęt grzejny, materiały izolacyjne, osłony) – stąd zalecenia w poprzedniej wersji instrukcji ITB nr 282 o pierwszym progu temperatury +10°C. Projektując mieszankę betonową należy rozważyć zastosowanie różnych dodatków i domieszek – np. domieszkę napowietrzającą oraz różne opcje dodatkowe (np. podgrzewanie składników mieszanki betonowej).

Wyczyścić powierzchnie i zbrojenie ze śniegu, lodu i szronu.

Rejestrować codzienne warunki pracy (wg instrukcji ITB 282 o godz. 7, 13 i 19, na zakończenie zmiany, a innych zjawisk meteorologicznych – w okresach między pomiarami temperatury i w czasie gwałtownej ich zmiany.

2. Produkcja mieszanki betonowej.
3. Transport mieszanki betonowej.
4. Układanie mieszanki betonowej.
5. Zabezpieczenie betonu (wraz z odpowiednią pielęgnacją) dające gwarancję osiągnięcia odporności mrozowej (określanej z reguły poprzez zadaną wytrzymałość betonu na ściskanie) – zakończenie specjalnej procedury.

Projekt organizacji robót w obniżonej temperaturze

Naturalnie poszczególne etapy mogą przebiegać w różny sposób, jednak poprzedzone muszą być przygotowaniem budowy do realizacji robót w obniżonej temperaturze. Podstawowym dokumentem przygotowania budowy do prowadzenia robót budowlanych w warunkach obniżonej temperatury jest projekt organizacji robót. Przed przystąpieniem do jego wykonania należy ustalić na podstawie analizy danych klimatycznych przewidywane okresy występowania warunków obniżonej temperatury na terenie planowanych robót. Projekt organizacji robót budowlanych wykonywanych w okresie obniżonej temperatury powinien zawierać (ITB 282 2011):

- ogólny plan zagospodarowania terenu z naniesionym rozlokowaniem mediów, placów składowych, magazynów, obiektów socjalno-bytowych oraz administracyjnych



- opis robót wraz z uzasadnieniem techniczno-ekonomicznym przyjętych sposobów ich realizacji
- harmonogram wykonania robót budowlanych,
- rysunki i opis sposobów przystosowania infrastruktury budowy (mediów budowlanych, placów składowych, magazynów) oraz elementów konstrukcji, zarówno istniejących, jak i przewidywanych do wykonania,
- instrukcje prowadzenia robót budowlanych,
- wzór dziennika pomiarów temperatury i stanu pogody, stanowiącego załącznik do dziennika budowy
- harmonogram dostaw materiałów budowlanych, maszyn i urządzeń związanych z robotami budowlanymi wykonywanymi w obniżonej temperaturze, konieczny do zachowania wymaganej ciągłości i jakości robót,
- wykaz środków zapobiegawczych w przypadku występowania zagrożeń podczas robót budowlanych,
- rodzaje usług przewidzianych do wykonania przez jednostki obce oraz terminy zakończenia tych prac,
- zestawienie dodatkowych kosztów poniesionych z uwagi na prowadzenie robót budowlanych w obniżonej temperaturze.

Naturalnie odpowiednie przepisy dotyczą zapewnienia bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników.

Generalnie można wskazać przykłady ograniczenia działania w zakresie robót betonowych w warunkach obniżonej temperatury (np. wyłączenie robót betonowych w okresie grudzień-marzec z harmonogramu), co ma swoje uzasadnienie w podwyższonych kosztach, ryzyku braku jakości oraz zwiększaniu ryzyka wypadkowego.

Produkcja mieszanki betonowej w okresie obniżonej temperatury

W poniższym opisie sposobu produkcji mieszanki betonowej zawarto najważniejsze zalecenia dotyczące materiałów stosowanych do produkcji mieszanki betonowej.

Materiały:

Cement



Można stosować cementy spełniające wymagania normy (PN-EN 197-1) przy uwzględnieniu następujących uwag (ITB 282 2011):

- w warunkach obniżonej temperatury wskazane jest stosowanie cementów typu CEM I i CEMII/A 32,5R i klas wyższych, a poniżej 0oC – cementów portlandzkich typu CEMI 42,5R, 52,5N i 52,5R,
- cement hutniczy typu CEM III może być stosowany do wszystkich konstrukcji, jeżeli średnia temperatura dobowa otoczenia wynosi minimum +5°C,
- konstrukcje masywne mogą być wykonywane z cementów typu CEM III w temperaturze do – 15°C, jeżeli przeprowadzona zostanie weryfikacja receptury dla warunków zimowych.

Poza podwyższeniem dynamiki narastania wytrzymałości oraz wydzielania ciepła hydratacji uzyskanej ze względu na zastosowanie cementów o wysokiej wytrzymałości wczesnej podobne korzystne efekty można uzyskać poprzez zwiększenie ilości cementu o 10÷15% i zmniejszenie wartości stosunku w/c.

Zalecenia te nie dotyczą konstrukcji masywnych.

W warunkach obniżonej temperatury cement zaleca się przechowywać w zamkniętych, szczelnych zbiornikach lub magazynach w temperaturze nie niższej niż +8°C. Istotny jest także okres przechowywania cementów:

- do 30 dni – cementy o wysokiej wytrzymałości wczesnej,
- do 45 dni dla cementów CEM I 42,5 N - normalnej wytrzymałości wczesnej,
- do 90 dni – cementy innego rodzaju.

Dodatki typu II

Nie zalecane jest stosowanie dodatków do mieszanek betonowych – mają one najczęściej właściwości opóźniające wiązanie i/lub twardnienie oraz spowalniają wydzielanie ciepła hydratacji (ITB 282 2011), np. mielony żużel wielkopiecowy (PN-EN 15167-1 2007). Przedmiotowa instrukcja dopuszcza stosowanie w warunkach obniżonej temperatury pyłu krzemionkowego (PN-EN 13263-1 2010).

Domieszki do betonów

Przedmiotowa instrukcja (ITB 282 2011) w warunkach obniżonej temperatury wskazuje do stosowania następujące domieszki (PN-EN 934-2):



- przyspieszające wiązanie,
- przyspieszające twardnienie,
- plastyfikatory i superplastyfikatory (używane w celu zmniejszenia ilości wody zarobowej)
- domieszki kompleksowe (wykazujące więcej niż jedno działanie podstawowe).

Przedmiotowa instrukcja wskazuje na korzystne dodatkowe działanie domieszek lekko napowietrzających, co dodatkowo zabezpiecza młody beton przed niekorzystnym działaniem mrozu.

Wskazano dwie kluczowe grupy domieszek sklasyfikowane ze względu zastosowane składniki domieszek stosowanych w warunkach obniżonej temperatury:

- domieszki zawierające wyłącznie sole nieorganiczne – azotan(V) wapnia lub tiocyjanian sodu,
- domieszki będące kompozycją wymienionych wyżej związków chemicznych z substancjami organicznymi wykazującymi działanie uplastyczniające lub upłynniające.

Wskazano także substancje, które powodują, że domieszki na ich bazie nie są stosowane:

- ze względu na silne oddziaływanie toksyczne – azotan(III) sodu (NaNO_2)
- ze względu na konieczność stosowania ich w kombinacji z domieszkami opóźniającymi - węglan sodu (Na_2CO_3) i węglan potasu (K_2CO_3).

Istotną (wcześniej wspomnianą metodą umożliwiającą betonowanie w obniżonej temperaturze) jest obniżenie temperatury zamarzania wody w mieszance betonowej. W przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2011) stwierdzono, że nie należy przeceniać możliwości tego działania – możliwe do uzyskania są zmiany od $-3,5^\circ\text{C}$ do -4°C . Dalsze obniżanie tej temperatury wymaga zastosowania substancji wcześniej podanych jako nie wskazane do stosowania ze względu na właściwości toksyczne lub graniczenia technologiczne. Wskazano także wyniki badań (Bajorek 2009), które wykazały znacznie mniejsze możliwości ograniczenia temperatury zamarzania wody – w granicach od $-0,7$ do $-0,8^\circ\text{C}$. Podobnie (z dystansem) do tych możliwości podchodzi (Neville 2012), wskazując, że akceptacja tego rodzaju domieszek pozostaje jeszcze w sferze dyskusji.

W przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2011) wskazano wyraźnie, że zastosowanie modyfikacji betonu przy zastosowaniu domieszek nie może wiązać się z zaniechaniem stosowania innych zabiegów umożliwiających ochronę młodego betonu przed zamarzaniem. Podkreślono (ITB 282 2011:77), że: „nie można zrezygnować z całkowitej ochrony, nawet jeżeli w instrukcji producenta podano inaczej”.

Biorąc pod uwagę znane powszechnie zróżnicowanie efektów stosowania domieszek z różnymi rodzajami cementów logicznym wydaje się przeprowadzenie badań sprawdzających z zastosowaniem właściwych materiałów danej temperaturze.



Woda

Woda stosowana do przygotowania mieszanki betonowej powinna spełniać wymagania normy PN-EN 1008. W okresie obniżonej temperatury ważne jest zapewnienie odpowiedniej ilości wody zarobowej o zadanej temperaturze, co może mieć istotne znaczenie z punktu widzenia powtarzalności efektów modyfikacji mieszanki dostarczanej sukcesywnie na budowę (np. zmiany konsystencji w trakcie transportu). Nie należy dodawać wody o temperaturze powyżej 40°C bezpośrednio do cementu (ITB 282 2011:78).

Mieszanka betonowa – produkcja

Mieszanka betonowa powinna być produkowana zgodnie z normą PN-EN 206-1 w wytwórniach betonu zapewniających temperaturę w pomieszczeniach ogrzewanych nie niższą niż 10°C.

Projektowanie mieszanki betonowej

W warunkach obniżonej temperatury niezwykle istotnym jest zapewnienie szybkiego dojrzewania betonu – stosunek wytrzymałości badanej po 2 dniach do wytrzymałości po 28 dniach powinien być większy/równy 0,5.

Z kolei stosunek wodno-cementowy odgrywa w warunkach obniżonej temperatury niewzkle istotne znaczenie – nie powinien przekraczać 0,5. Ograniczenie to wynika z konieczności (ITB 282 2011):

- maksymalnego obniżenia ilości wody zarobowej,
- uniknięcia *bleedingu* - samoczynnego wydzielania się wody z mieszanki betonowej i segregacji kruszywa),
- przyspieszenia wiązania i twardnienia betonu.

Mieszanie składników

W przypadku, gdy temperatura składników nie przekracza 40°C, kolejność podawania składników powinna być następująca: kruszywo, piasek, cement i woda zarobowa z domieszkami w postaci roztworów wodnych o stężeniu określonym w recepturze.

Temperatura mieszanki betonowej w węźle betoniarskim



Temperatura mieszanki betonowej przy załadunku betonowozu (lub innego środka transportu) powinna uwzględniać straty ciepła powstające podczas mieszania, transportu mieszanki betonowej na budowę, transportu mieszanki betonowej na budowie (transport poziomy i pionowy) oraz podczas układania mieszanki betonowej. Należy również uwzględnić spadek temperatury mieszanki układanej w zimnym deskowaniu z uwzględnieniem zbrojenia i innych warstw (np. ocieplenie).

Do określenia minimalnej temperatury mieszanki betonowej można skorzystać z rekomendacji ACI 306R podanych w tabelicy 2.2. - wartości podaje instrukcja ITB.

Tabela 2.2. Rekomendowana minimalna temperatura mieszanki betonowej wg ITB 282 2011 na podstawie ACI 306R

	Minimalny wymiar elementu [mm]			
Temp. powietrza [°C]	< 300	300 ÷ 900	900 ÷ 1800	ponad 1800
	Minimalna temperatura mieszanki betonowej			
Powyżej -1	16	13	10	7
- 18 ÷ -1	18	16	13	10
Poniżej -18	21	18	16	13

Należy podkreślić, że ACI 306R podaje również minimalną temperaturę po ułożeniu mieszanki (wynosi ona dla poszczególnych przedziałów z tabeli 2.2 odpowiednio: 13 °C, 10 °C, 7 °C i 5 °C).

Poza minimalną temperatura mieszanki należy także zwrócić uwagę na wartość maksymalną, która zależy od rodzaju użytego cementu (ITB 282 2011) oraz odległości transportowej i nie powinna przekraczać wartości podanych w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Maksymalna temperatura mieszanki betonowej (ITB 282 2011)

Rodzaj cementu	Maksymalna temperatura mieszanki betonowej [°C]
CEM I, CEM II/A 42,5	30
CEM I, CEM II/A 32,5	40
CEM II/B, CEM 32,5	45

Oczywiście celem jest osiągnięcie odpowiedniej temperatury mieszanki dostarczonej na budowę, która będzie jeszcze poddana dalszemu wychłodzeniu podczas jej transportu na miejsce wbudowania i układania. Należy liczyć się z ujemnym wpływem wysokiej temperatury mieszanki betonowej na późniejsze cechy trwałościowe betonu.

W celu kalkulacji temperatury mieszanki betonowej można użyć równania bilansu cieplnego lub wyznaczyć ją z tablicy 2.4.

Podane w tablicy 2.4. wartości należy traktować jako wartości szacunkowe. W przypadku, gdy w kruszywie znajduje się zamrożona woda należy uwzględnić w bilansie termicznym ciepło właściwe lodu oraz ciepło przemiany fazowej lodu w wodę.

Tabela 2.4. Temperatura mieszanki betonowej w zależności od temperatury kruszywa i wody

Temperatura kruszywa [°C]	Temperatura wody [°C]								
	5	10	20	30	40	50	60	70	80
5	5	6	9	11	14	16	19	22	24
10	8	9	12	15	17	20	22	25	27
15	11	13	15	18	21	23	26	28	31
20	15	16	19	21	24	26	29	31	34
30	21	23	25	28	30	33	35	38	40

Należy zwrócić uwagę, że nagrzewanie kruszywa (np. w silosach) wymaga czasu – należy przewidzieć taką operację z odpowiednim wyprzedzeniem.

2.4.3. Wykonywanie robót betonowych

Przystąpienie do wykonywania robót betonowych powinno być poprzedzone zapewnieniem (PN-EN 13760):

- kompletnego projektu wykonywanej konstrukcji wraz ze specyfikacją wykonawczą,
- kierownictwa przedsięwzięcia dysponującego odpowiednimi kompetencjami do jego realizacji zgodnie z dokumentacją projektową i wymaganiami określonymi w umowie, instrukcjach i normach, itp.



- kierownictwa budowy odpowiedzialnego za organizację robót, zachowanie zasad bezpiecznego i właściwego użytkowania maszyn, zgodna z wymaganiami jakości materiałów, wykonanie robót zgodnie z dokumentacją projektową oraz bezpieczne jego użytkowanie do odbioru robót budowlanych (Bajorek 2012).

Spośród 3 klas wykonania – tabl. 2.5. (i związanego z tym poziomu zarządzania jakością) zawartych w PN-EN 13670 przedmiotowa instrukcja (ITB 282 2011) zaleca przy betonowaniu w warunkach obniżonej temperatury poziom 3 – najwyższy. Jednocześnie zaznaczono, że wybór klasy wykonania powinien być dostosowany do rangi budowy.

Tabela 2.5. Zarządzanie jakością – kontrola wykonania – rodzaj i dokumentacja kontroli (PN-EN 13760:2011)

Przedmiot	Klasa wykonania 1	Klasa wykonania 2	Klasa wykonania 3
Rodzaj kontroli	Kontrola wizualna i pomiary wybiórcze	Kontrola wizualna elementów i regularne pomiary głównych elementów	Kontrola wizualna. Szczegółowa kontrola wszystkich robót, istotnych dla nośności i trwałości konstrukcji
Strona odpowiedzialna za przeprowadzenie kontroli	Samokontrola	Samokontrola. Kontrola zgodnie z procedurami wykonawcy. Możliwe dodatkowe wymagania zgodnie ze specyfikacją wykonawczą	Samokontrola. Kontrola zgodnie z procedurami wykonawcy. Dodatkowe wymagania zgodnie ze specyfikacją wykonawczą
Zakres	Wszystkie roboty	Oprócz samokontroli powinny być przeprowadzane regularne kontrole robót	Oprócz samokontroli powinny być przeprowadzane regularne kontrole robót
Raport z kontroli	Niewymagany	Wymagany	Wymagany
Powykonawcze rysunki geometrii	Niewymagane	Zgodnie ze specyfikacją wykonawczą	Zgodnie ze specyfikacją wykonawczą



Specyfika wykonywania robót betonowych w okresie obniżonej temperatury wymaga poza spełnieniem typowych wymagań wynikających z dokumentacji projektowej oraz przedmiotowych norm (a w szczególności PN-EN 13670) określenia szczególnych metod organizacji produkcji w tych niesprzyjających warunkach.

Zgodnie z przedmiotową instrukcją (ITB 282 2011) należy określić:

- wymaganą wytrzymałość betonu na ściskanie w momencie zaprzestania ochrony,
- długość możliwego okresu dojrzewania betonu – zgodnie z przyjętymi założeniami projektowymi i terminami wykonania robót,
- metodę ochrony cieplno-wilgotnościowej betonu (z uwzględnieniem zastosowania modyfikacji domieszkami)
- miejsce produkcji mieszanki betonowej i rodzaj zamawianego betonu,
- właściwości betonu lub recepturę (w zależności od rodzaju zamawianego betonu),
- temperaturę mieszanki betonowej po jej dostarczeniu (z uwzględnieniem przy jej kalkulacji spadku temperatury w trakcie układania)
- rodzaj izolacji, deskowania, środków antyadhezyjnych, itp. – dostosowane do przedmiotowej konstrukcji,
- sposobu monitorowania stanu betonu,
- sposób i kryteria rozformowania betonu.

Producent wraz z dostawcą betonu powinni podać:

- możliwości modyfikacji receptury betonu projektowanego w zakresie: stosunku w/c, konsystencji, ilości i rodzaju stosowanych cementów, kruszyw oraz domieszek i dodatków,
- temperaturę mieszanki betonowej na wężle (z uwzględnieniem spadku temperatury na późniejszych etapach),
- rodzaj środków transportu, czas niezbędny do transportu oraz sposób ocieplenia środków transportu.

Istotnym zagadnieniem jest rozpatrzenie możliwości produkcji mieszanki betonowej na budowie, co ograniczyć może zdecydowanie problemy związane z niekorzystnymi warunkami otoczenia (np. czas ekspozycji mieszanki betonowej w warunkach obniżonej temperatury), jednak kluczowe jest uwzględnienie związanych z tym kosztów oraz możliwości produkcji mieszanki betonowej o określonych parametrach.



Przedmiotowa instrukcja (ITB 282 2011) wskazuje następujące przedziały temperatury, dla których należy określić wymagania dotyczące realizacji robót betonowych:

- do +5°C (granica dopuszczalnej pielęgnacji betonu bez ochrony cieplnej)
- do – 1°C
- poniżej -1°C do – 10°C
- poniżej -10°C do -15°C.

Ostatni przedział przedmiotowa instrukcja definiuje jako warunki zimowe, w których problemy technologiczne zaczynają odgrywać główną rolę. W związku z tym w temperaturze poniżej -10°C betonowanie powinno być wykonywane wyjątkowo, a w temperaturze poniżej – 15°C nie powinno się wykonywać betonowania na wolnym powietrzu.

Biorąc pod uwagę możliwość zaistnienia znacznych spadków temperatury w okresie nocnym (przymrozki) przedmiotowa instrukcja zaleca betonowanie w ciągu dnia.

W zakresie metod zabezpieczeń pozwalających na uzyskanie przez beton odpowiedniej odporności na zamarzanie na etapie projektowania i produkcji betonu przedmiotowa instrukcja podaje:

- modyfikację składu betonu i mieszanki betonowej:
 - (zwiększenie ilości cementu lub zmianę cementu na cement o wyższej klasie wytrzymałości i wysokiej wytrzymałości wczesnej - oznaczane literą R)
 - modyfikacja składu mieszanki betonowej przy zastosowaniu domieszek i dodatków (dobrych odpowiednio do rodzaju cementu i rodzaju konstrukcji – betonowa, żelbetowa, sprężona, cienkościenna, itp.)
- podgrzewanie składników mieszanki betonowej do temperatury zapewniającej odpowiednią temperaturę mieszanki po ułożeniu w konstrukcji.

Na etapie realizacji na budowie w powyższym celu można zastosować:

- osłanianie elementów lub całej konstrukcji materiałami ciepłochronnymi/wodoszczelnymi, aby mieszanka betonowa ułożona w deskowaniu zachowała korzystne warunki dojrzewania,
- ogrzewanie młodego betonu w deskowaniu za pomocą pary, ciepłego powietrza lub prądu elektrycznego,
- wykonywanie robót betonowych w pomieszczeniach zamkniętych ogrzewanych lub w ciepłakach (stałych lub przesuwnych) o temperaturze powietrza wewnątrz nie niższej niż +10°C.



Powyższe metody mogą być stosowane rozdzielnie lub łączone w zależności od rodzaju wykonywanej konstrukcji (przede wszystkim od jej masywności), warunków atmosferycznych oraz czasu, w jakim beton powinien osiągnąć wymagane parametry wytrzymałościowe.

Przygotowanie budowy do wykonywania robót betonowych

Przy realizacji robót betonowych niezwykle ważne jest zapewnienie wiarygodnej prognozy meteorologicznej. Podkreślenia wymaga sytuacja konieczności podjęcie decyzji o podgrzewaniu kruszywa w węźle betoniarskim na kilka dni przed planowanym betonowaniem. W obecnej sytuacji zaburzeń klimatycznych należy liczyć się z dużym ryzykiem zaistnienia nagłych zmian i możliwością wystąpienia ekstremalnych wartości czynników pogodowych. Podkreślić należy w tej sytuacji z jednej strony dostęp do prognoz z wielu źródeł, a z drugiej strony trudności w ich interpretacji ze względu na duże niezgodności (Burgeno & Joslyn, 2020; Løhre et al., 2019). Wyjściem jest podejmowanie decyzji na podstawie prognoz bardziej spójnych, co zwykle oznacza skrócenie horyzontu prognozy.

Przedmiotowa instrukcja wskazuje następujący zakres decyzji podejmowanych na podstawie prognoz meteorologicznych (ITB 282 2011):

- przygotowanie środków ochrony materiałów oraz maszyn i urządzeń (np. transportowych),
- przygotowanie odpowiednich materiałów izolacyjnych oraz urządzeń grzewczych w celu zapewnienia ciągłości betonowania konstrukcji,
- przygotowania materiałów i konstrukcji w celu zabezpieczenia wykonanych konstrukcji przed wystąpieniem szkód mrozowych,
- planowanie i realizacja harmonogramu prac betonowych.

Niezbędna informacja meteorologiczna powinna uwzględniać:

- temperaturę (wskazano 3 terminy pomiaru temperatury: o godzinie 7, 13 i 19)
- prędkość wiatru i okresy jego trwania
- rodzaj opadów atmosferycznych i ich intensywność,
- mgły i inne zjawiska atmosferyczne.

Informacje te powinny być ewidencjonowane w dzienniku pomiarów, a ich prawidłowość – kontrolowana przez kierownika budowy. Korzystne jest także gromadzenie informacji o temperaturze minimalnej i maksymalnej dobowej – można korzystać w tym celu z pomocy IMGW PIB.

Przygotowanie podłoża, deskowania i zbrojenia



Kluczowym jest zapewnienie niezbędnej temperatury wszystkich powierzchni, które będą mieć kontakt z mieszanką betonową (PN-EN 13670). W przedmiotowej instrukcji sugerowana jest temperatura wyższa od temperatury zamarzania mieszanki betonowej, jednak nie przekraczała wartości minimalnej temperatury mieszanki betonowej podanej w tablicy 2.2. o więcej niż kilka stopni.

W przypadku zamarzniętego podłoża – należy je rozmrozić (i ewentualnie zagęścić). W przypadku zalegania na pokrywy śnieżnej i/lub lodu na zbrojeniu i deskowaniach – należy je usunąć bez stosowania otwartego płomienia oraz ciepłego powietrza zmieszanego ze spalinami. Przedmiotowa instrukcja zaleca stosowanie łopat, mioteł i ciepłego czystego powietrza pod ciśnieniem.

Materiały pomocnicze

Środki antyadhezyjne powinny zapewniać możliwość zastosowania w obniżonej temperaturze (odpowiednia temperatura płynięcia środków na bazie olejów). Nie zaleca się stosowania preparatów emulsyjnych (na bazie wody) oraz wosków (trudności w zastosowaniu w obniżonej temperaturze). Środki te powinny spełniać wymagania PN-B-19305.

Transport i układanie mieszanki betonowej

Planując transport mieszanki betonowej o podwyższonej temperaturze należy brać pod uwagę następujące czynniki:

- okres, jaki upłynie od chwili zarobienia mieszanki do chwili rozpoczęcia wiązania (ze względu przyspieszenie procesów)
- rodzaj środków transportu i możliwy sposób ich ocieplenia (z uwzględnieniem czasu transportu)
- wpływ warunków atmosferycznych (z uwzględnieniem temperatury otoczenia) na szybkość obniżania temperatury mieszanki betonowej
- zmianę temperatury mieszanki betonowej na skutek zetknięcia ze zbrojeniem i deskowaniem.

Przedmiotowa instrukcja podaje wzory umożliwiające szacowanie spadku temperatury mieszanki przy transporcie. Przykładowo dla betonu z obracającym się bębniem przybliżony spadek temperatury wynosi (ITB 282 2011:94):

$$\Delta T = 0,25 (t_r - t_a),$$

gdzie:



ΔT – spadek temperatury przy czasie dostawy w ciągu 1 h,

t_r – temperatura betonu wymagana w miejscu dostawy [°C]

t_a – temperatura powietrza podczas transportu [°C]

Spadek temperatury mieszanki betonowej na terenie budowy można szacować na podstawie

Układanie mieszanki betonowej

Kluczowe znaczenie ma temperatura układanej mieszanki betonowej, która jest określona w PN-EN 206-1 – w momencie dostarczenia na budowę i podczas jej układania nie powinna być ona niższa niż +5°C. W przypadku, gdy temperatura otaczającego powietrza jest niższa niż +5°C przedmiotowa instrukcja zaleca korzystanie z zaleceń ACI (ACI 306R), przy czym w zależności od wymiaru najmniejszego przekroju betonowanego elementu (analogicznie do danych z Tablicy 2.2.) minimalna temperatura układanej mieszanki betonowej wynosi: 13°C (dla wymiaru poniżej 0,3 m), 10°C (0,3÷0,9 m), 7°C (0,9÷1,8 m) i 5°C (powyżej 1,8 m).

Przedmiotowa instrukcja zwraca uwagę na fakt, że podwyższona temperatura (wyższa od zalecanej) nie zwiększa proporcjonalnie długości okresu ochrony przed zamarzaniem ze względu na znaczne straty ciepła wynikające ze zwiększonej różnicy temperatury. Naturalnie należy uwzględnić straty ciepła w procesie transportu i układania mieszanki betonowej, jednak temperatura mieszanki nie powinna być wyższa od zalecanej przez ACI 306R o więcej niż 10°C.

Należy podkreślić, że w przypadku temperatury otoczenia do +5°C wystarczająca jest temperatura mieszanki +5°C.

Zapewnienie jakości mieszanki betonowej

Przy dostawie mieszanki betonowej należy dokumentować parametry mieszanki betonowej przez sprawdzenie klasy zamówionej mieszanki z dokumentem dostawy oraz wykonać niezbędne pomiary temperatury oraz konsystencji.

W celu wykonania podstawowych pomiarów niezbędna jest organizacja laboratorium polowego do wykonania pomiarów wraz z udokumentowaniem w dzienniku betonowania otrzymanych wyników pomiarów.



W celu dokładnej weryfikacji mieszanki betonowej należy z każdego zarobu-betonowozu pobrać min 3 próbki. Pobrane próbki należy opisać i przechowywać w warunkach zbliżonych do warunków dojrzewającej mieszanki betonowej w wykonywanym elemencie.

Pielęgnacja betonu w warunkach zimowych

Kluczowymi elementami przy wyborze metody pielęgnacji w obniżonej temperaturze są:

- tempo przyrostu wytrzymałości dla danej mieszanki betonowej
- zabezpieczenie termiczne wykonywanego elementu przez zastosowanie izolacji termicznej
- kształt elementu -wpływ powierzchni zewnętrznych elementu na oddziaływanie obniżonej temperatury

Monitoring temperatury betonu

Zależność temperatury betonu od temperatury otoczenia jest oczywista, jednak trudno – pomimo różnych tablic i wzorów ją ustalić bez bazowania na pomiarach w miejscu realizacji. Zaleca się zatem monitoring nie tylko temperatury otaczającego powietrza oraz mieszanki betonowej, ale także temperatury dojrzewającego betonu. Należy przy tym uwzględnić fakt, że najbardziej narażone na niekorzystne warunki dojrzewania są naroża i krawędzie betonowanego elementu, na co wskazuje przedmiotowa instrukcja (ITB 282 2011). Zaleca ona umieszczenie czujników temperatury przy jego powierzchni, jednak wskazano, że wystarczającą dokładność osiągnąć można poprzez umieszczenie termometrów na powierzchni betonu (pod czasowymi pokrywami z efektywnego materiału izolacyjnego aż do momentu ustalenia się wskazania temperatury).

Rozdeskowanie konstrukcji betonowych

Z punktu widzenia kryterium ekonomicznego rozdeskowanie konstrukcji betonowej powinno być wykonywane jak najszybciej (oczywiście z założeniem o minimalizacji ryzyka uszkodzenia konstrukcji i dojrzewającego betonu. Przedmiotowa instrukcja zaleca, aby okres ten określić opierając się na doświadczeniu (bazując na wynikach badań laboratoryjnych, gdyż zależny jest on od wielu czynników - poza typowymi, jak rodzaj i ilość cementu czy temperatura należy wziąć pod uwagę np. umiejętności pracowników (ITB 282 2011:123)).

Przed przystąpieniem do rozdeskowania należy sprawdzić wytrzymałość przedmiotowego betonu na podstawie badania próbek przechowywanych w takich samych warunkach, jak dojrzewał beton w konstrukcji lub określić ją na podstawie monitoringu temperatury. Wskazano na metodę amerykańską wg ASTM C1064-86 bazującą na wskaźniku dojrzałości (ITB 282 2011:121) Wcześniej w przedmiotowej



instrukcji podano także metody nieniszczące: (sklerometryczną – PN-EN 12504-2 i ultradźwiękową PN-EN 12504-4) (ITB 282 2011:120).

Po rozformowaniu należy osłonić beton materiałem izolacyjnym (lub chronić w zamkniętej przestrzeni ogrzewanej) w celu zapewnienia prawidłowych warunków dojrzewania do czasu wyrównania temperatury (powolne schłodzenie).

Długość okresu ochrony

Wymagany czas trwania okresu ochrony betonu zależy od przyjętej klasy pielęgnacji. Zależy ona od oczekiwanego procentu wytrzymałości 28-dniowej w chwili zakończenia ochrony, temperatury powierzchni betonu utrzymywanej (i mierzonej) w okresie ochrony współczynnika rozwoju wytrzymałości r (r to stosunek wytrzymałości na ściskanie betonu 2-dniowej i 28-dniowej określonej w warunkach laboratoryjnych). Zgodnie z PN-EN 13670 wyróżnia się cztery klasy pielęgnacji betonu (tablica 2.6.).

Tabela 2.6. Klasy pielęgnacji betonu wg PN-EN 13670 (Bajorek 2012)

	Klasa pielęgnacji 1	Klasa pielęgnacji 2	Klasa pielęgnacji 3	Klasa pielęgnacji 4
Czas [godziny]	12 ^{a)}	Nie stosuje się	Nie stosuje się	Nie stosuje się
Procent wymaganej wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie po 28 dniach	Nie stosuje się	35%	50%	70%
^{a)} pod warunkiem, że wiązanie nie trwa dłużej niż 5 godzin, a temperatura powierzchni betonu jest równa +5°C lub wyższa				

Oczekiwany procent wytrzymałości 28-dniowej należy w myśl przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2011) ustalić zgodnie ze specyfikacją i harmonogramem robót oraz uwzględniając sposób użytkowania (obciążenia) elementu bezpośrednio po zakończeniu okresu ochrony.

Klasa 1 przyjmowana jest w przypadku, gdy brak jest obciążenia i brak ekspozycji, co odpowiada – wg przedmiotowej instrukcji (ITB 282 2011) np. fundamentom czy części podziemnej konstrukcji, które nie podlegają wczesnemu obciążeniu, a podczas eksploatacji nie będą podlegały ekspozycji na zamrażanie



i rozmrażanie. Niezbędna jest tylko ochrona przed zamarznięciem we wczesnym okresie. Natomiast zalecanie jest zastosowanie pielęgnacji w klasie 2.

W klasie 2 wymagany przyrost wytrzymałości przyjęty na poziomie 35% 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie w przypadku elementu konstrukcji oraz możliwości pielęgnacji betonu w temperaturze +5°C w stosunku do 5 MPa, jako wielkości wymaganej z punktu widzenia odporności na jednorazowe działanie mrozu dla klasy 1 może wpływać na przyjęcie klasy 1 (zwłaszcza, że w klasie 2 wskazano jako przykłady konstrukcji masywne nabrzeża i tamy, których powierzchnie są wyeksponowane na oddziaływanie mrozu i czynników atmosferycznych).

2.5. Nowe tendencje w technologii betonowania w obniżonej temperaturze

Innowacje w przedmiotowej dziedzinie wiedzy dotyczą przede wszystkim:

- Możliwości przekroczenia bariery technologicznej w postaci niskiej temperatury otoczenia (z jednej strony system domieszek do stosowania w niskiej temperaturze - *cold weather admixture system* (Tomita et al., 2020) – stosowany głównie w celu możliwości betonowania w temperaturze uznanej za niedopuszczalną, a z drugiej – zastosowanie materiałów zmiennofazowych – *phase change materials* (Liu et al., 2020), które dają możliwość utrzymania sprzyjających warunków dojrzewania pomimo spadku temperatury otoczenia,
- Zastosowanie nano-materiałów (Elkady et al., 2019), które dzięki swojej ultra drobnej strukturze mogą polepszyć właściwości betonu (także mogą przyspieszyć kinetykę hydratacji cementu), uszczelnić międzyfazową strefę przejściową między zaczynem cementowym a kruszywem oraz zastąpić częściowo cement w mieszance betonowej,
- Nowych metod pielęgnacji w postaci: izolowanego od strony zewnętrznej deskowania systemowego (Won i in. 2016), wykorzystanie arkuszy grzewczych wykorzystujących reakcję egzotermiczną między wapnem palonym (CaO) a wodą (Choi et al., 2017; Nitheanandan et al., 2017)
- Monitoringu temperatury (przewodowego i bezprzewodowego) w betonie dojrzewającym betonie w celu śledzenia procesu jego dojrzewania w zmiennych warunkach (L. Barna et al., 2019; L. A. Barna et al., 2011; Rushing et al., 2017),

2.6. Nowe tendencje w dziedzinie zarządzania procesami budowlanymi

Z punktu widzenia zarządzania procesami budowlanymi bardziej ogólnym sensie wskazać można następujące tendencje:

- Robotyzacja i automatyzacja produkcji mająca na celu ograniczenie zaangażowania pracowników (nie tylko ze względu na możliwości popękania błędów, ale także ze względu na



obniżenie wydajności w niekorzystnych warunkach atmosferycznych) – szczególnie ma to znaczenie w warunkach obniżonej temperatury w celu ograniczenie pracochłonności przy zbieraniu, transmisji i analizie danych dotyczących betonowanego elementu i jego otoczenia

- Prefabrykacja, a zwłaszcza budownictwo modułowe jako możliwość drastycznego ograniczenia utrudnień wynikających z konieczności realizacji procesów budowlanych w niekorzystnych warunkach klimatycznych (naturalnie całkowite wykluczenie procesów betonowania na budowie jest niemożliwe – np. betonowanie płyty fundamentowej itp.)
- Agile Management oparte na strategiach, taktykach i opcjach elastyczności jako odpowiedź na konieczność działania w turbulencie zmiennym środowisku (przykładowo decyzje o temperaturze nagrzewu kruszywa należy podejmować z 1-2 dniowym wyprzedzeniem, podczas gdy aktualnie trudno jest uzyskać wiarygodną prognozę meteorologiczną na okres dłuższy niż 24 – uzasadnia to wprowadzenie opcji elastyczności opartych zarówno na odporności (elastyczność pasywna) – np. PCM, domieszki, jak i adaptacyjności (podgrzewane deskowania, nagrzew pod osłonami itp.).

Na podkreślenie zasługuje przejście do Project Management 2.0 (Kerzner, 2015) z tradycyjnego zarządzania (nazwanego Project Management 1.0), gdzie:

- Celem jest bieżące podejmowanie decyzji na podstawie monitoringu procesów i otoczenia w czasie rzeczywistym i przewidywanych zmian (scenariusze oparte na prognozach) w celu osiągnięcia wartości dla klienta – w przeciwieństwie do tradycyjnego podejścia opartego na dążeniu do eliminacji odchyłeń od stałego planu
- Pracownicy są motywowani wewnętrznie – można polega na ich samokontroli
- Aktywność jest oparta na małych zespołach
- Komunikacja jest równoległa, a nie – hierarchiczna i jednostronna
- Planowanie jest zdecentralizowane
- Metodologia project management jest elastyczna (otwarta na zmiany wynikające z konieczności działania w turbulencie zmiennym otoczeniu).

Z punktu widzenia koncepcji proponowanego systemu zarządzania betonowaniem w obniżonej temperaturze niezwykle istotne jest wprowadzenie idei Industry 4.0, która daje szereg elementów przewagi w porównaniu z Industry 3.0 (K. (World E. F. Schwab, 2016; K. Schwab, 2015):

2.7. Podsumowanie

Betonowanie w warunkach obniżonej temperatury wymaga specjalnego przygotowania budowy, zapewnienia specjalnych warunków produkcji i transportu mieszanki betonowej, układania



jej oraz późniejszej pielęgnacji. W zakresie zapewnienia jakości kluczową rolę odgrywają aktualne warunki atmosferyczne oraz prognoza na najbliższe 24-48 h. Zasadniczy problem polega zatem na tym, że biorąc pod uwagę możliwości zmiany sytuacji meteorologicznej po podjęciu decyzji dotyczącej składu mieszanki i metod pielęgnacji istotnym jest możliwe skorygowanie wcześniejszej decyzji (elastyczność w postaci adaptacji) lub podjęcie decyzji o zapewnieniu szerokiego zakresu tolerancji warunków (odporność – elastyczność bierna), że przewidywana zmiana warunków dojrzewania nie wpłynie negatywnie na oczekiwane rezultaty.

Istotne znaczenie ma przede wszystkim definicja warunków obniżonej temperatury. W poniższej tabeli 2.7. zestawiono omówione wcześniej definicje i zasady obowiązujące przy betonowaniu w obniżonej temperaturze i warunkach zimowych na podstawie instrukcji i norm obowiązujących w różnych krajach.

Tabela 2.7. Definicje i zasady obowiązujące przy betonowaniu w obniżonej temperaturze

Aspekt	Canadian Standards Association A23.1/A23.2	South African National Standard 10100.1	Instrukcja ITB 282/2011	American Concrete Institute ACI 306R (2016)
Warunki zimowe/obniżonej temperatury – definicja	5°C	7°C przy spadku, 3°C przy wzroście temperatury	Temperatura 10°C, poniżej 5°C – wartość krytyczna	4°C
Materiały	Ograniczenia wsp. w/c i minimalnej wytrzymałości w zależności od klasy ekspozycji	Minimalna temperaturamiessz anki betonowej +10°C	Ograniczenie w/c do 0,5 Wskazanie zastosowanie cementów o wyższej klasie wytrzymałości i wysokiej wytrzymałości wczesnej (R)	Niskie w/c
Wymagana wytrzymałość krytyczna	3,5 MPa	5 MPa	5,0 MPa CEM I 8 MPa CEM II 10 MPa CEM III	3,5 MPa, 24,5 MPa – dla wielokrotnego
Metoda zabezpieczenia/ograniczenia	Ostony z nagrzewem, izolacja, przykrycia	Zachowanie ciepła -Ograniczenie realizacji robót w niesprzyjających warunkach	Metoda zachowania ciepła (preferowana), nagrzew, domieszki, zwiększenie ilości cementu, redukcja w/c	Ostony z nagrzewem, wewnętrzny nagrzew, przykrycia



Analizując dane dotyczące definicji warunków obniżonej temperatury warto podkreślić przyjęty ogólnie poziom $+5^{\circ}\text{C}$. Temperatura ta jest jednocześnie temperaturą graniczną dla zastosowania cementów CEM III. Korzystne wydają się stwierdzenia zawarte w normie SANS 10100.1, która zakłada zakaz betonowania, jeżeli temperatura jest niższa od 7°C przy tendencji do spadku temperatury. Przyjęcie takiej zasady wyeliminowałoby typowe ryzyko wynikające z zastosowania cementów CEM III, gdy późniejszy spadek temperatury stwarza realne ryzyko uszkodzenia ze względu na niższe tempo przyrostu wytrzymałości (znany przypadek uszkodzenia płyty postojowej na stacji paliwowej - układanie w listopadzie w warunkach sprzyjających (ponad $+5^{\circ}\text{C}$) i późniejszy szybki spadek temperatury (przymrozek).

Biorąc pod uwagę zwiększone koszty wynikające z podjęcia decyzji o betonowaniu w obniżonej temperaturze oraz zwiększone ryzyko braku jakości ze względu na możliwość zaistnienia błędów ludzkich (brak przeszkolenia, nieuwaga, błędy odczytów, brak kontroli), problemów wynikających ze zmienności otoczenia oraz występowania ekstremalnych warunków pogodowych trudnych do przewidzenia jedną z możliwych decyzji jest wstrzymanie robót w okresie obniżonej temperatury.

W przypadku podjęcia ryzyka i betonowania w tych niesprzyjających warunkach można rozpatrywać kilka opcji technologicznych, które mogą być zastosowane na zasadniczych dwóch etapach:

- a. Projektowania i produkcji mieszanki betonowej oraz jej transportu:
 - Stosowanie domieszek chemicznych
 - Zastosowanie większej ilości cementu/cementu szybkosprawnego – o wysokiej wytrzymałości wczesnej np. klasy 42,5R lub wyższej przy jednoczesnym zwiększeniu ilości cementu o 10-15% i zmniejszeniu stosunku w/c,
 - Podgrzewanie składników mieszanki betonowej w celu zapewnienia odpowiedniej temperatury mieszanki po ułożeniu
- b. Układania mieszanki betonowej i odpowiedniej pielęgnacji
 - Metody zachowania ciepła mieszanki betonowej (z opcją osłanianie elementów lub całej konstrukcji)
 - Metody dostarczania ciepła do betonu
 - Wykonywanie robót betonowych w pomieszczeniach zamkniętych ogrzewanych lub ciepłakach (stałych lub przesuwnych) o temperaturze wewnątrz nie niższej niż $+10^{\circ}\text{C}$.

Naturalnie możliwe są kombinacje tych metod, przy czym – pomimo wyraźnej tendencji do stosowania domieszek chemicznych (i niezaprzeczalnego postępu w tej dziedzinie) – w myśl obowiązującego



podejścia nadal preferowane jest osiągnięcie odporności mrozowej przez beton dojrzewający w temperaturze dodatniej. Wskazują na to rozwiązania innowacyjne (dodatkowa izolacja deskowań, wkładki grzewcze w deskowaniach, zastosowanie PCM, podgrzewane deskowania itp.). Wydaje się celowe stworzenie systemu, który będzie uwzględniał synergiczne efekty zastosowania różnych opcji technologicznych przy założeniu możliwości skorygowania pierwotnie podjętej decyzji na podstawie monitoringu procesu i otoczenia oraz wiarygodnej prognozy meteorologicznej (systematycznie aktualizowanej).

Zasadniczy problem polega zatem na tym, że podejmując roboty betonowe w okresie jesienno-zimowym i wiosennym (przy czym aktualna przy układaniu temperatura otoczenia jest sprzyjająca - powyżej +5°C), temperatura mieszanki betonowej spełnia wymogi przedmiotowej instrukcji – wynosi +5°C (co jest temperaturą graniczną dla dojrzewania mieszanki betonowej bez konieczności ochrony cieplnej). Biorąc pod uwagę rosnącą dynamikę zmian sytuacji pogodowej (trudności w prognozowaniu) oraz zwiększającą się tendencję do wstępowania ekstremalnych wartości czynników pogodowych tradycyjne rozwiązanie oparte na tradycyjnym jednorazowym podejmowaniu decyzji i założeniu o utrzymaniu sprzyjających warunków dojrzewania mogą generować znaczne ryzyko pogodowe.

2.9. Zarządzanie procesami budowlanymi -problemy wewnętrzne

Trudności w sterowaniu procesami budowlanymi wynikają z ogólnie przyjętych metod zarządzania procesami budowlanymi opartymi o modele sieciowe i harmonogramy – wszystkie te elementy są uproszczone do sytuacji deterministycznej. Takie podejście nie uwzględnia wahań wydajności procesów – człowiek jako zawodny element systemu oraz konieczności podejmowania decyzji - planowania przy ograniczonej ilości i jakości informacji do warunków w przyszłości (np. prognoza pogody).

Analizując przyczyny problemów występujących przy zarządzaniu procesami budowlanymi należy przede wszystkim omówić problemy wewnętrzne branży budowlanej. Poza typowymi problemami budownictwa jako branży, takimi jak (Goryński & Majzner, 1981; Rytel, 2009; Werner, 2008, 2012):

- uzależnienie od wielu czynników otoczenia,
- sezonowości (i wynikające wahań wydajności procesów produkcyjnych)
- fluktuacji kadr
- długotrwałości cyklu produkcji,
- unikatowego charakteru produktu,



- konserwatyizmu technologicznego (trudności w przyswajaniu innowacji)
- wrażliwości na wahania rynkowe (budownictwo jako jedna z pierwszych branż gospodarki podlega kryzysowi w gospodarce)
- losowy charakter cyklu wykonania – nierytmiczna produkcja,

należy także wziąć pod uwagę różnorodność produkcji budowlanej (od prefabrykowanego modułowego garażu jako pojedynczego przedsięwzięcia po budowę portu lotniczego uwzględniającego opcje rozbudowy).

Szeroko rozumiejąc produkcję budowlaną można wskazać produkcję cementu czy kostki brukowej, jako przykład produkcji ciągłej lub masowej i zakończyć na pojedynczym obiekcie budowlanym o unikalnej charakterystyce (np. most Św. Rocha na Warcie w Poznaniu).

Rozpatrując zarządzanie procesami budowlanymi dla różnych obiektów, w różnych warunkach zewnętrznych należy rozpatrywać odpowiednie metody zarządzania nimi biorąc pod uwagę, iż typowe metody zarządzania stosowane w budownictwie powstały wiele lat temu (harmonogramy – ok. 100 lat, modele sieciowe – ok. 50 lat) i – być może – mogą być wspomagane metodami wynikającymi z postępu technologicznego na początku XXI wieku.

Analizując możliwości zastosowania Lean Management w budownictwie (G. Ballard & Howell, 1998; Glenn Ballard & Howell, 2003; Glenn Ballard & Tommelein, 2012, 2021; Rivas-Hermann et al., 2015) wskazują na cztery zasadnicze cechy produkcji budowlanej:

- indywidualny charakter produktu
- produkcja na placu budowy
- wykonawca jako organizacja tymczasowa o skomplikowanej wielopoziomowej strukturze
- powiązanie produktu z gruntem (nieruchomość produktu).

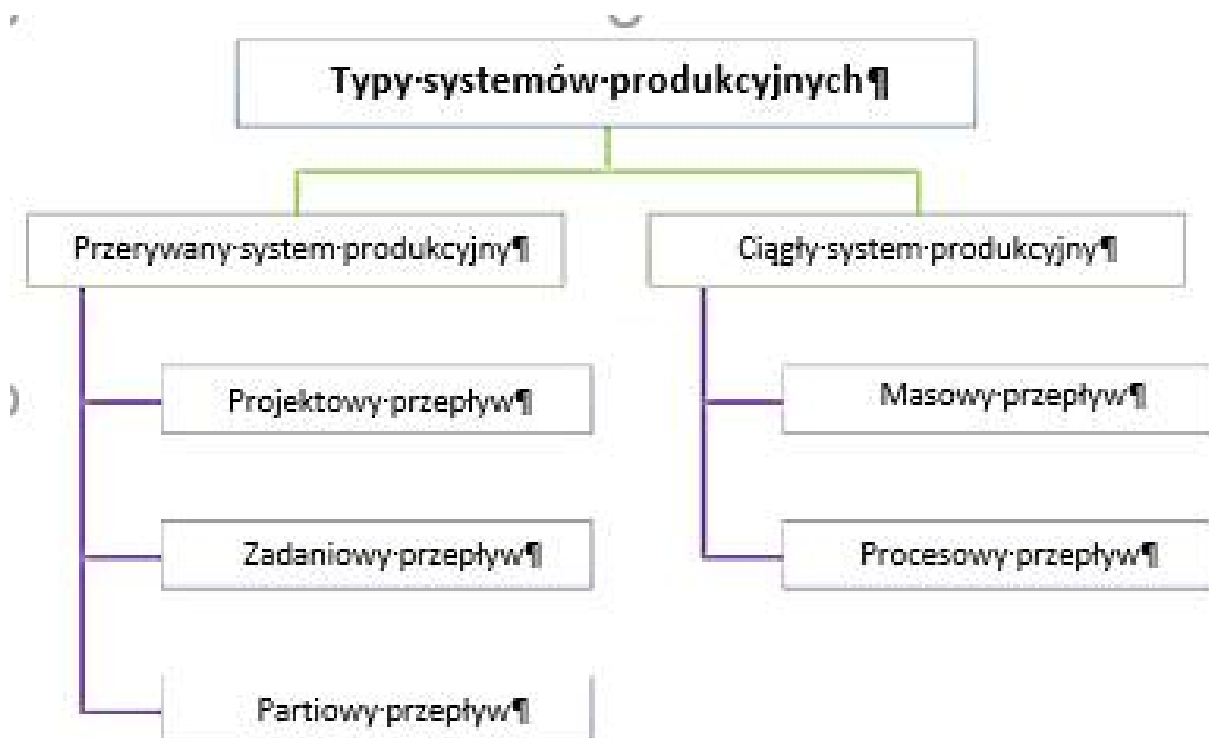
Werner (Werner, 2008) wskazuje na pięć elementów wyróżniających produkcję budowlaną o innych dziedzin produkcji przemysłowej:

- zmienność przedmiotu zarządzania (zróżnicowany charakter przedsięwzięć)
- zmienność podmiotów uczestniczących w procesie (inwestor, projektant, wykonawca)
- niepowtarzalność lokalizacji i wpływu otoczenia

- szeroki zasięg różnych problemów decyzyjnych, rozwiązywanych przez kierujących przedsiębiorstwami (zarządzający przedsiębiorstwem – project manager)
- konieczność względnie szybkiego podejmowania decyzji o znacznym stopniu ryzyka.

Ostatnia z wymienionych cech wydaje się szczególnie istotna ze względu na konieczność dostosowania do – często – turbulentnie zmiennego otoczenia.

Korzystając z ogólnej typologii procesów produkcyjnych można sklasyfikować typową działalność budowlaną jako przerywaną działalność produkcyjną – rys. 2.1.



Rysunek 2.1 Ogólna typologia procesów produkcyjnych

W zakresie typowych metod produkcji w zależności od poziomu zróżnicowania produktów i wielkości produkcji (rys. 2.2) typowe procesy produkcyjne w budownictwie można określić w grupie pierwszej, dotyczącej produkcji jednostkowej lub produkcji małoseryjnej.



Rysunek 2.2. Klasyfikacja systemów produkcyjnych wg Woodward'a

[Source: Daft, R.L. 2007 Understanding The Theory and Design of Organizations, International Student edition, Thomson South-Western p. 400]

Powyższy rysunek należałoby uzupełnić o dodatkowe elementy takie jak:

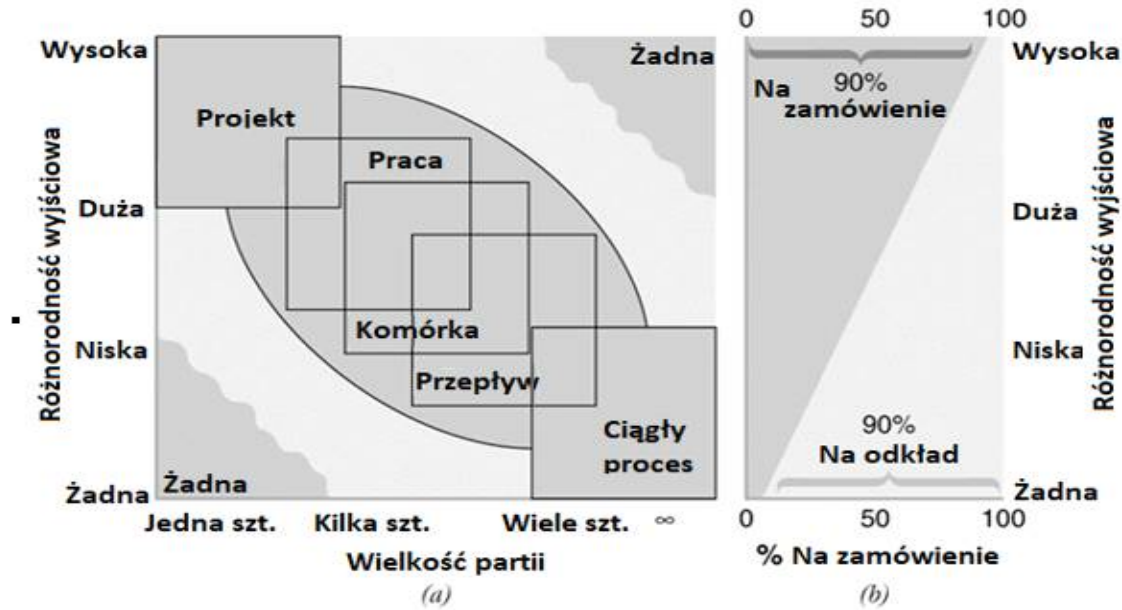
- brak informacji niezbędnych do podjęcia decyzji
- podejmowanie decyzji przy akceptacji luki informacyjnej

Analizując bardziej szczegółowo metody produkcji w zależności od poziomu zróżnicowania produktów oraz wielkości produkcji typowe procesy budowlane można sklasyfikować w kategorii „project” – rys.

2.3.

Produkcja / różnorodność produktów	Ciągła	Bardzo-wysoka	Średnia	Niska	Bardzo-niska
Brak	Ciągła Cement				
Niska		Masowa Kamienie		Zbyt-wysoki-koszt	
Średnia			Seryjna Prefabrykaty		
Wysoka	Zbyt-wysoki-nakład			Nisko-ilościowa Nietypowe-prefabrykaty	
Bardzo-wysoka					

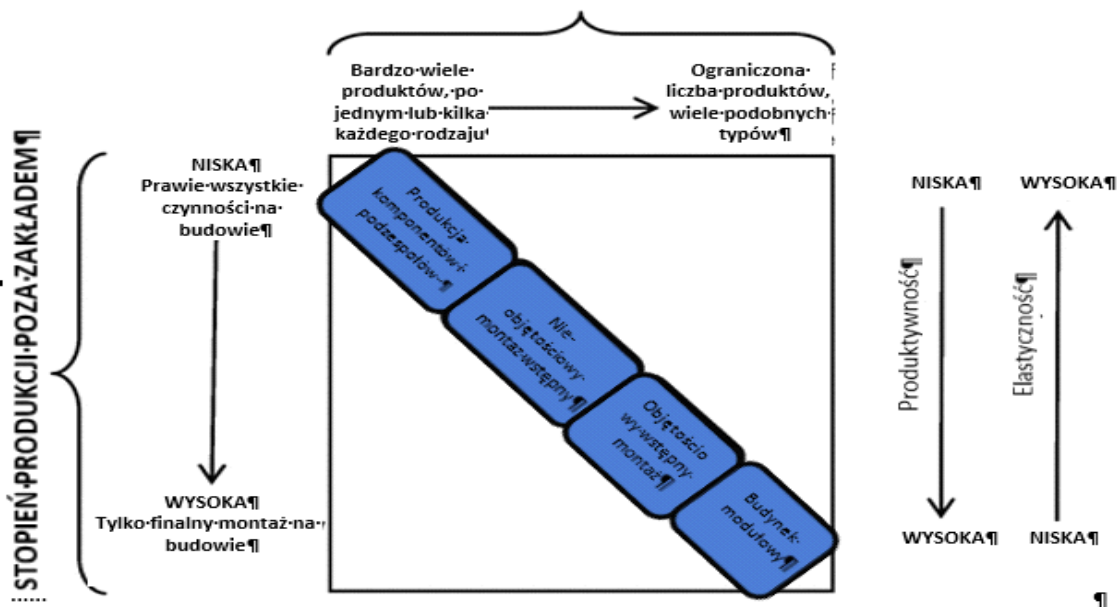
Rysunek 2.3. Typowe metody produkcji w zależności od poziomu zróżnicowania produktów i wielkości produkcji



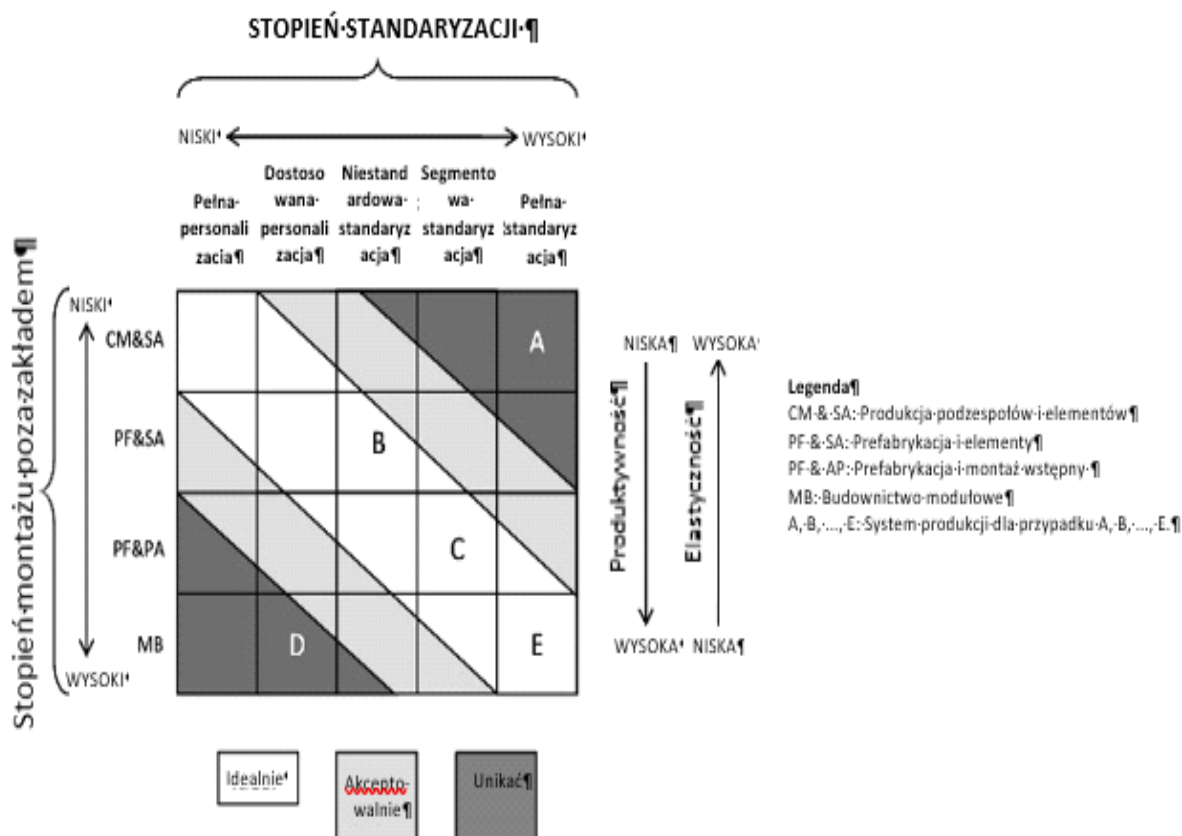
Rysunek 2.4. Wpływ metod produkcyjnych na zarządzanie zapasami

Specjaliści zaangażowani w zarządzanie procesami produkcyjnymi w budownictwie proponują klasyfikacje

STOPIEŃ STANDARYZACJI PRODUKTU I JEGO ILOŚĆ



Rysunek 2.5. Klasyfikacja systemów produkcyjnych w budownictwie w zależności od stopnia standaryzacji produktu i wielkości produkcji oraz stopnia produkcji poza placem budowy



Rysunek 2.6. Klasyfikacja systemów produkcyjnych wraz z sugerowanym obszarem wykorzystania [Jonsson and Rudberg 2015]

Sugerowany obszar wykorzystania różnych metod produkcyjnych w budownictwie wskazuje, że dla procesów realizowanych na budowie (oznaczenie CM&SA) liczyć się należy z niską wydajnością, natomiast należy wprowadzić wysoką elastyczność. w tym przypadku zastosowanie typowych metod zarządzania procesami produkcyjnymi (harmonogramy, PERT i metody sieciowe) może napotkać na trudności związane z koniecznością działania w dynamicznie zmiennym otoczeniu, gdzie należy się liczyć z propagacją zmienności i zakłóceń (Zegarra & Alarcón, 2017, 2023). Zagadnienie trudności w sterowaniu procesami budowlanymi w zmiennym otoczeniu nabiera szczególnego znaczenia w odniesieniu do procesu betonowania. w tym wypadku konieczność podjęcia decyzji dotyczącej składu betonu, technologii jego układania i pielęgnacji w warunkach braku kompletnej informacji na temat warunków układania i dojrzewania wskazuje na konieczność wspomaganie specjalnymi procedurami (monitoring procesów w toku i otoczenia).

Natomiast w przypadku procesów realizowanych z wykorzystaniem prefabrykacji i budownictwa modułowego (oznaczenie MB) tego typu zagrożenia nie są istotne ze względu na niską wrażliwość na



zmienne otoczenie. w tym wypadku trzeba uwzględnić ograniczone możliwości dostosowania do indywidualnych wymagań klienta.

Podkreślić należy, że pomimo wzrastającego parytetu robót opartych na prefabrykacji i budownictwie modułowym, zawsze pozostanie część robót wymagających zaangażowania na budowie w warunkach ryzyka i niepewności. Stąd działania zmierzające do zapewnienia większej niezawodności tych procesów właśnie dotyczą procesów betonowania (Memarian & Mitropoulos, 2014, 2015),.

Jak stwierdził Thomas [2006] formułując podstawowe zasady zarządzania zasobami ludzkimi przy realizacji procesów produkcyjnych na budowie, do podstawowych przyczyn strat wydajności zaliczyć należy:

- niewłaściwe zarządzanie zasobami robocizny
- konieczność ponownego wykonania (nie spełnienie wymagań jakościowych)
- wpływ czynników pogodowych.

Należy podkreślić istotny wciąż wpływ pracowników na wydajność procesów budowlanych (część procesów bazuje nadal na umiejętnościach rzemieślniczych pracowników, a zastosowanie automatyki i robotyki znacznie odbiega od wielu pozostałych działów produkcji).

Podsumowując niniejszy rozdział można wysunąć następujące wnioski.

- Procesy produkcyjne w budownictwie znacznie różnią się od procesów produkcyjnych w typowym przemyśle wytwórczym
- Typową tendencją jest dążenie do upodobnienia procesów budowlanych do produkcji przemysłowej mające na celu osiągnięcie większej niezawodności produkcji
- Można wskazać dwie możliwości działania w tych warunkach: wprowadzenie elastyczności w przypadku procesów realizowanych na budowie (wadą jest niska wydajność) oraz wprowadzenie prefabrykacji i budownictwa modułowe.
- Pomimo wzrastającego udziału prefabrykacji w budownictwie zawsze konieczny będzie udział procesów realizowanych na budowie, których planowany przebieg utrudniony jest przez specyficzne negatywne cechy procesów budowlanych takich, jak:

- indywidualny charakter produktu

- produkcja na placu budowy



- wykonawca jako organizacja tymczasowa o skomplikowanej wielopoziomowej strukturze
- powiązanie produktu z gruntem (nieruchomość produktu).

Należy podkreślić istotny wpływ pracowników zaangażowanych w procesy produkcyjne, które nadal w wielu przypadkach mają charakter rzemieślniczy.

Często nie dysponujemy wystarczającymi informacjami, aby określić wydajność planowanych procesów, podczas gdy warunki mogą ulec diametralnej zmianie (nagły ulewny deszcz przy betonowaniu dużej powierzchni (np. droga startowa, plac postojowy) lub nagły spadek temperatury w pierwszej fazie dojrzewania betonu w konstrukcji). w skrajnych warunkach tego typu zmiany mogą generować konieczność wyburzenia i ponownego wykonania fragmentu lub całości konstrukcji (near Black Swan problem).

Poza uzależnieniem od warunków pogodowych na bieżącą wydajność procesów budowlanych wpływają:

- niskie (nieodpowiednie) kwalifikacje pracowników (niska bariera wejścia)
- wahania wydajności pracowników i maszyn
- terminowość i kompletność dostaw
- konieczność wykonania robót poprawkowych

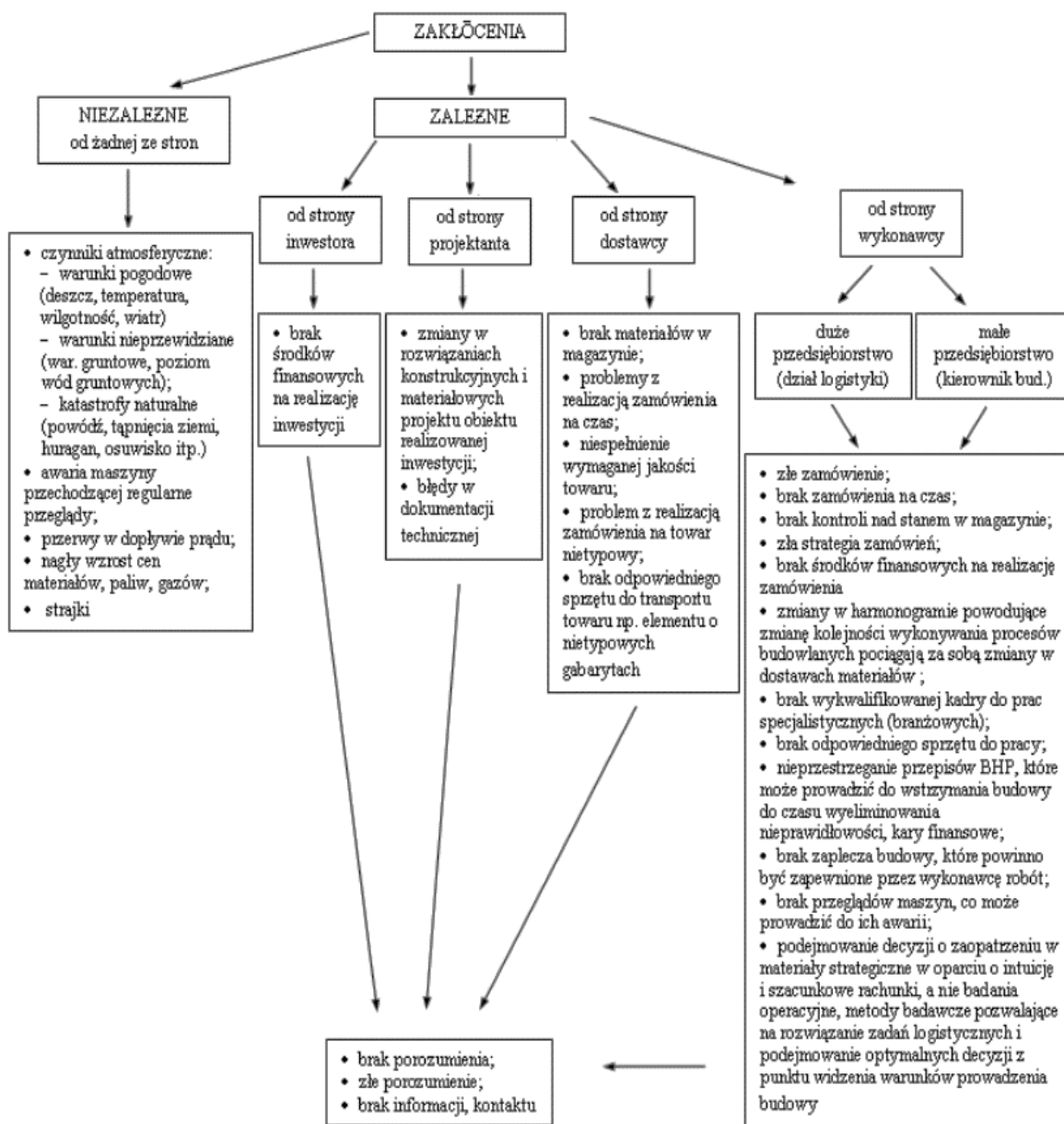
Procesy budowlane realizowane w warunkach zmiennego otoczenia (wewnętrznego i zewnętrznego) są trudne do sterowania. Szczególnym przypadkiem jest proces betonowania, który znacznie się komplikuje ze względu na proces transformacji z mieszanki betonowej w beton o określonych właściwościach, które zmieniają się w czasie i zależą od warunków otoczenia (np. temperatura, wilgotność).

Podsumowując rozważania dotyczące możliwości zarządzania procesami można stwierdzić, że istotnym elementem wpływającym na problemy sterowania procesami produkcyjnymi w budownictwie jest człowiek jako ich realizator.

2.10. Problemy zewnętrzne.

Realizacja w większości w zmiennym otoczeniu – sezonowość produkcji budowlanej – dla wielu procesów – wpływ czynników pogodowych/klimatycznych – wiodąca rola pogody jako dominującego zakłócenia zewnętrznego (po wpływie czynnika ludzkiego jako czynnika wewnętrznego)

Problematyka zakłóceń ma podstawowe znaczenie z punktu widzenia trudności ze sterowaniem procesami budowlanymi. Ze względu na pokaźną liczbę przyczyn trudno jest przeciwdziałać im jednocześnie. Istotnym pytaniem jest uwzględnienie kluczowych przyczyn. Poniższa klasyfikacja przedstawiona na rysunku 2.7. wskazuje dwie zasadnicze grupy zakłóceń: zakłócenia zależne i niezależne. Jest to podział szczególnie istotny ze względu na możliwość wpływu na wydarzenia związane z zakłóceniami. Przykładowo generalny wykonawca zatrudniający nieznanego podwykonawcę lub dostawcę musi liczyć się z problemami jakie mogą się pojawić w trakcie pierwszej współpracy (warto zasięgnąć opinii na jego temat).



Rysunek 2.7. Schemat zakłóceń



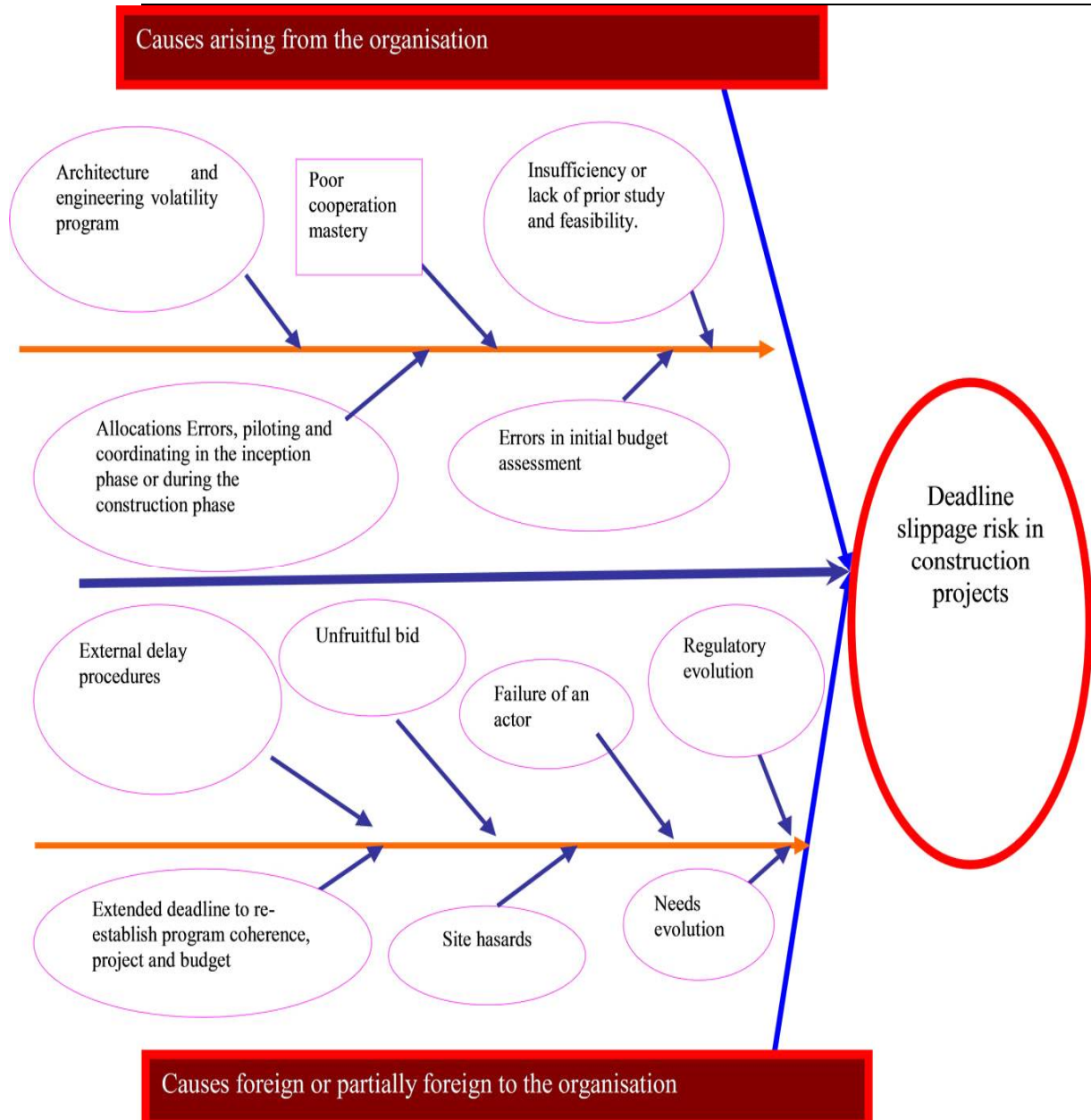
Jak słusznie zauważają (Keane & Caletka, 2009) ryzyko towarzyszy każdemu przedsięwzięciu budowlanemu i dlatego należy liczyć się z zakłóceniami podczas ich realizacji. Wydaje się natomiast logiczne, że – korzystając z doświadczenia przy realizacji podobnych przedsięwzięć w podobnych warunkach można przewidzieć różne przyczyny zakłóceń i starać się im zapobiegać (weryfikacja i sprawdzenie dokumentacji projektowej często obciążonej wieloma błędami) lub ograniczyć wpływ zakłóceń, na które wpłynąć nie można lub wpływ ten jest znacznie ograniczony (np. pogoda).

Typowa analiza przyczyn zakłóceń opiera się na klasyfikacji uwzględniającej następujące możliwości:

- Usprawiedliwione bądź nieusprawiedliwione,
- Krytyczne lub niekrytyczne,
- Równoczesne lub nierównoczesne,
- Możliwe do skompensowania lub niemożliwe do skompensowania.

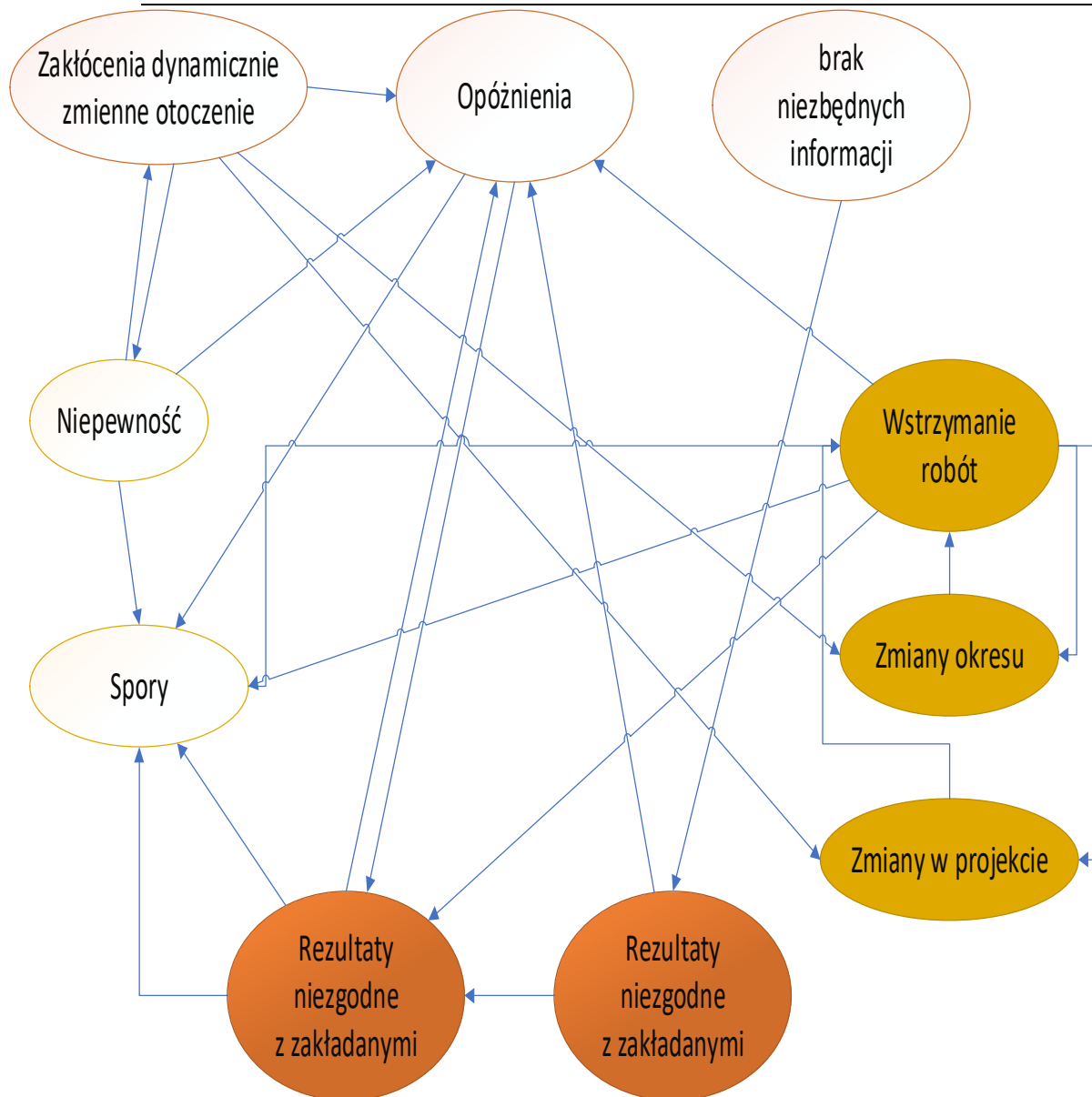
Do tego podziału warto włączyć wcześniej wspomniany podział na zakłócenia zależne od uczestników (lub organizacji, np. generalnego wykonawcy) oraz zakłócenie niezależne.

Taka analiza może przybrać formę diagramu Ishikawy o dwóch podstawowych liniach analizy przedstawiona na rys. 2.8.



Rysunek 2.8. Analiza przyczyn opóźnień procesów budowlanych zależnych i niezależnych (lub tylko częściowo zależnych od organizacji {Chalai i Tikolat 2012})

Analiza przyczyn zakłóceń na podstawie informacji pochodzących z różnych krajów (Lo et al., 2006) prowadzi do wniosku, że przyczyny opóźnień w różnych krajach związane są z ich specyfiką (klimat, przepisy lokalne, fazą cyklu koniunkturalnego, itp.) – tablica 2.1. Jest to zgodne z poglądami (Lo et al., 2006). Logicznym jest także uwzględnienie specyfiki branży – np. roboty budowlane lub inżynierskie (Kumaraswamy & Chan, 1998).



Rysunek 2.9. Schemat zakłóceń w realizacji procesów budowlanych

Tablica 2.8. Główne przyczyny opóźnień w budownictwie

Autorzy badań	Kraj	Główne przyczyny opóźnień
Arditi i in. (1985)	Turcja	Ograniczenia zasobów Problemy finansowe Braki organizacyjne Opóźnienia prac projektowych Częste zmiany zakresu zamówienia Znaczące roboty dodatkowe
Baldwin i in. (1971)	USA	Niekorzystne warunki pogodowe Ograniczenia siły roboczej System zlecenia robót
Semple i in. (1994)	Kanada	Wzrost zakresu robót Niekorzystne warunki pogodowe Ograniczony dostęp do frontu robót
Siemaszko i Jakubczyk-Gańczyńska (2014)	Polska	Błędy w dokumentacji projektowej Złe warunki atmosferyczne Słaba organizacja pracy
Głuszak i Leśniak (2015)	Polska	Błędy i niezgodności w dokumentacji projektowej Małe doświadczenie pracowników Niesprzyjające warunki pogodowe
Challal i Thionat (2012)	Maroko	Błędy w szacowaniu budżetu Zmiany w dokumentacji Zagrożenia na placu budowy

Analizując różne przyczyny zakłóceń z uwzględnieniem opisanych wyżej klasyfikacji można stwierdzić, że w naszym klimacie warunki pogodowe odgrywają znaczącą rolę, nie tylko ze względu na częstość występowania zmian. Uwzględnić należy poza tym, że są one generalnie niezależne od wykonawcy (prognozy pogody są dość trafne przy 24-godzinnym horyzoncie planowania, jednak przy jego zwiększaniu sprawdzalność prognoz znacznie spada). Poza tym mają one często charakter krytyczny:

- np. przemarznięcie wierzchniej warstwy płyty szczelnej na stacji paliw (Paślawski & Karłowski, 2016), skutkujące koniecznością oczekiwania na sprzyjające warunki pogodowe (kary za przekroczenia terminu zakończenia inwestycji) oraz rozbiórki i ponownego wykonania,



- zalanie przez wody rzeki Wiśły deskowań ze zbrojeniem przygotowanych do betonowania (Drzewiecka & Paślawski, 2011) – oczekiwanie na zmianę poziomu wody, konieczność ponownego wykonania deskowań i ułożenie zbrojenia
- zalanie przez gromadzące się wody opadowe wykopów podczas wykonywania instalacji wodociągowej (Drzewiecka & Paślawski, 2011) – wstrzymanie robót, zagrożenie z punktu widzenia BHP, zmiana technologii (wprowadzenie igłofiltrów itp.),
- uszkodzenie elementów elewacji szklanej wysokiego budynku podczas montażu w przypadku nagłego porywu wiatru (Paślawski, 2009),
- uszkodzenia powierzchni drogi startowej bezpośrednio po zakończeniu wykończania powierzchni przez nagły ulewny deszcz (Karłowski & Paślawski, 2008; Paślawski, 2008) .

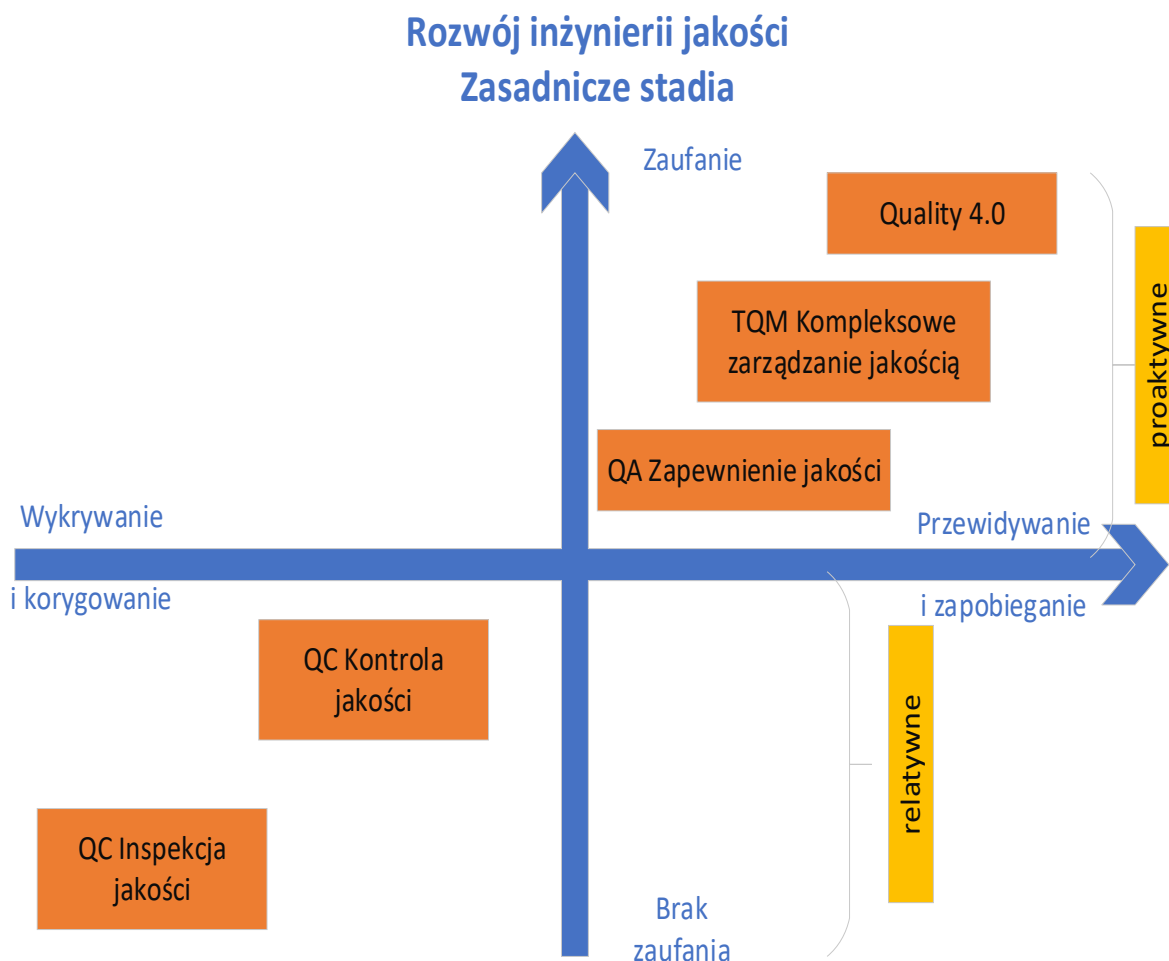
Opisane przypadki ilustrują istotny wpływ warunków pogodowych na realizację robót budowlanych przebiegających na placu budowy.

Należy podkreślić szczególne znaczenie zagrożenia poprawnego przebiegu betonowania w przypadku nagłego zaistnienia niekorzystnych warunków pogodowych (np. nagły spadek temperatury lub nagłe intensywne opady). Może to prowadzić do konieczności rozbiórki uszkodzonego elementu i jego ponownego wykonania.

2.11. Nowe tendencje w zarządzaniu procesami budowlanymi

Wraz z rozwojem technologii procesów rozwijane są również metody i systemy zarządzania procesami takie jak (Industry 4.0, Made in China 2025, BIM, Project Management 2.0) – Technologie te są między innymi oparte o wiele rodzajów czujników z bezprzewodowym systemem przesyłania informacji. Większość tych systemów bez przerwy ewoluuje dzięki nowym rozwiązaniom (innowacjom).

Opisane wyżej problemy przy realizacji procesów budowlanych wskazują wyraźnie na potrzebę ich rozwiązania – np. poprzez wprowadzenie nowych rozwiązań w ich zarządzaniu. Tego typu inicjatywy obejmują zarówno nowe koncepcje zarządzania (Industry 4.0, Made in China 2025, BIM czy Project Management 2.0), jak i rozwiązania wynikające z dążenia do rozwiązywania problemów na bazie mniej radykalnych zmian (monitoring procesów i otoczenia w toku). Wszystkie powyższe elementy mają na celu podniesienie jakości produktu finalnego.

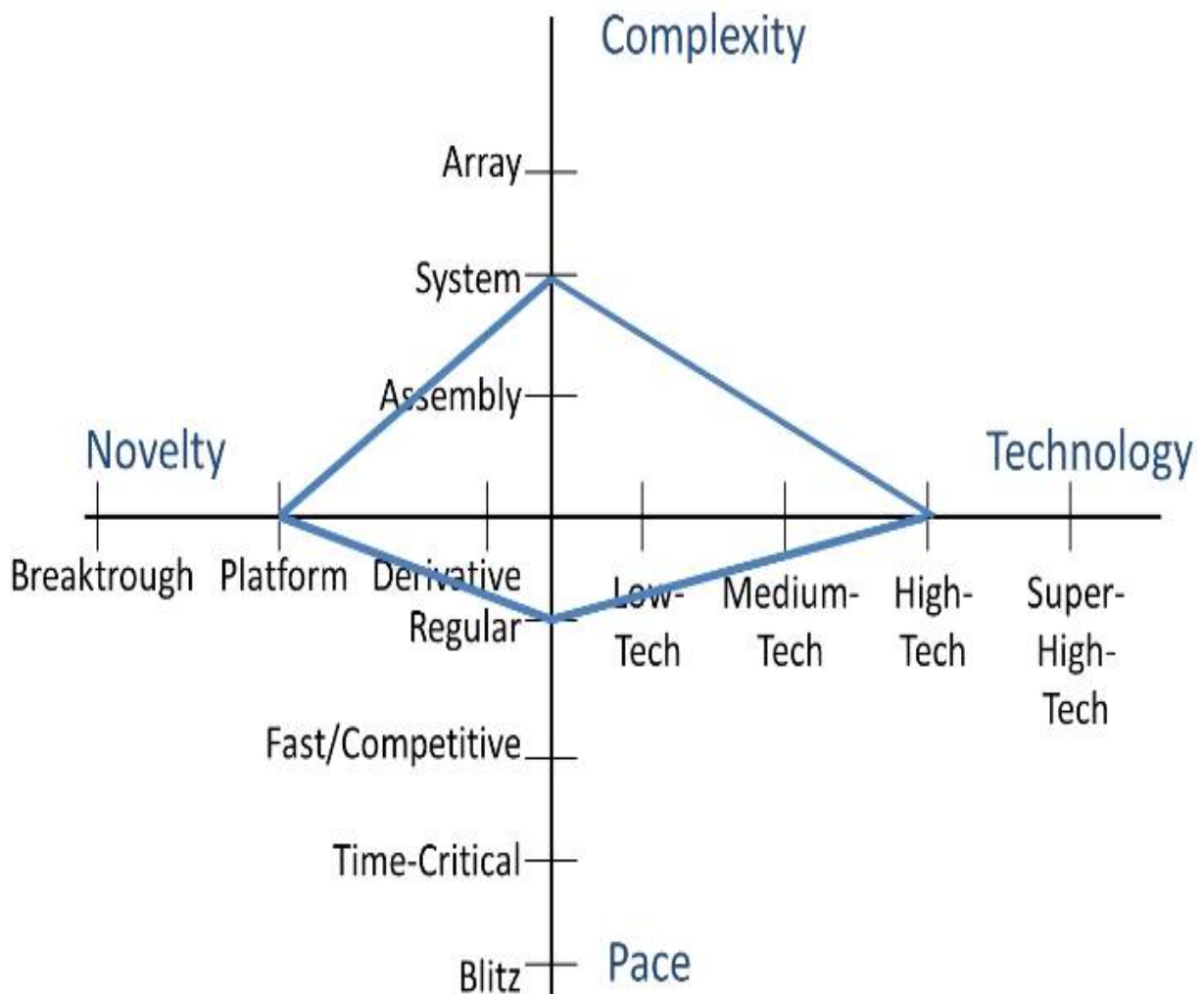


Rysunek 2.10. Przedstawia rozwój inżynierii jakości

Project Management 2.0

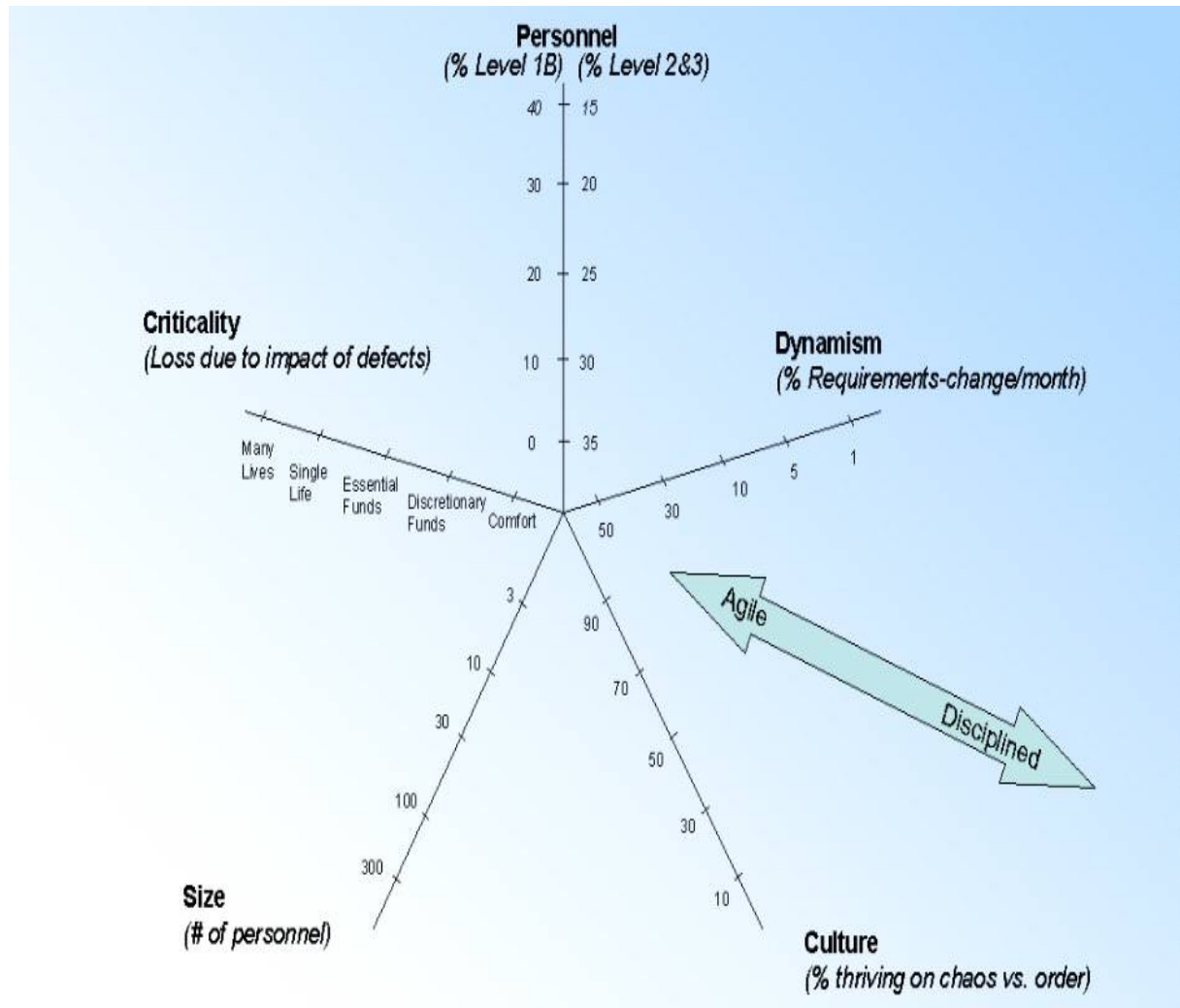
Potrzeba nowego podejścia w dziedzinie zarządzania przedsiębiorstwami wynika (Kerzner, 2015) konieczności działania w warunkach zmiennego otoczenia. Jest to konsekwencja szybkich zmian politycznych, w zakresie finansów, technologii czy zmian klimatycznych. Przykłady nieefektywności tradycyjnego podejścia do planowania i realizacji wskazują na konieczność opracowania nowej koncepcji umożliwiającej działanie w turbulentnie zmiennym otoczeniu.

Koncepcja diamentu opracowana przez Dvir'a i Shenhara jako podstawa podziału na przedsiębiorstwa zarządzane wg tradycyjnego zarządzania przedsiębiorstwami i Project Management 2.0 jest zaprezentowana na rysunku 2.11.



Rysunek 2.11. Koncepcja diamentu wg Dvir'a i Shenhara ułatwiająca decyzję odnośnie zastosowania podejścia tradycyjnego lub PM 2.0

Bogatszą koncepcję opracowali (Boehm, 2004) rys. 2.12.



Rysunek 2.12. Diagram wpływów wewnętrznych i zewnętrznych

Jest ona oparta na pięciu elementach:

- personalny skład zespołu – wysoki poziom kwalifikacji i samokontrola jest elementem umożliwiającym wprowadzenie project management 2.0 (przewaga elastycznego/zwinnego zarządzania),
- dynamika zmian (w skali zmian w miesiącu) – wydaje się również, że przy przekroczeniu pewnego poziomu zmian uzasadnione jest wprowadzenie elastyczności w zarządzaniu,
- kultura organizacji – należy określić czy elementem komfortu i wzmocnienia jest wiele stopni swobody (które mogą prowadzić do chaosu) czy też bazuje ono na ramowych zasadach i procedurach (porządek),



- wielkość organizacji/przedsięwzięcia wyrażony przez liczbę pracowników niezbędnych do jego realizacji – jak wynika z wykresu PM 2.0 preferuje małe zespoły (Levitt, 2011) mówi o zespołach 10 osobowych także w przypadku ogólnej liczby zatrudnionych na poziomie 1000),
- krytyczność związana ze stratami wynikającymi z ilości błędów.

Analizując możliwości wprowadzenia zarówno PM 2.0, jak i zarządzanie tradycyjne można zestawić charakterystykę porównawczą tradycyjnego i nowego podejścia PM 2.0 w formie tabelarycznego zestawienia - Tablica 2.2 (Boehm, 2004; Kerzner, 2015; Levitt, 2011)

Tablica 2.10. Porównanie tradycyjnego podejścia i Project Management 2.0

Opis	Project Management 1.0	Project Management 2.0
Podstawowe cele	Zarządzanie przedsięwzięciem jako śledzenie i eliminacja odchyłeń od stałego planu, który został określony przed rozpoczęciem	Sprawne monitorowanie, integrowanie i analizowanie informacji w czasie rzeczywistym i przewidując zmiany w trakcie w celu osiągnięcia wartości dla klienta
Pracownicy	Pracownicy kontrolowani na poszczególnych szczeblach zarządzania	Wysokiej klasy specjaliści motywowani zewnątrznie, można polegać na ich samokontroli
Zespoły	Duże	Małe
Komunikacja	Hierarchiczna i jednostronna	Równoległa
Planowanie	Zcentralizowane	Zdecentralizowane
Wymagania	Jasno określone wymagania	Ewolucja i elastyczność wymagań
Metodologia PM	Sztywna	Elastyczna
Przywódtwo	Styl autorytarny	Styl partycypacyjny (współpraca)
Dostęp do informacji	Lokalny i ograniczony	Nieograniczony globalny dostęp
Kultura	Oparta o ramowe zasady i procedury (porządek)	Bazująca na wielu stopniach swobody (możliwy chaos)



- a także oddziaływań klimatycznych czy sejsmicznych,
- z reguły zespół realizujący nie jest zaangażowany w wykonanie głównego planu – nie czuje się zaangażowany w osiągnięcie określonych tam celów,
- okresowe raporty stanu są z reguły zbyt optymistyczne,
- w warunkach sztywnego wyznaczania celów ograniczona jest kreatywność,
- powstaje luka komunikacyjna pomiędzy menedżerami wysokiego szczebla i zespołami realizującymi.

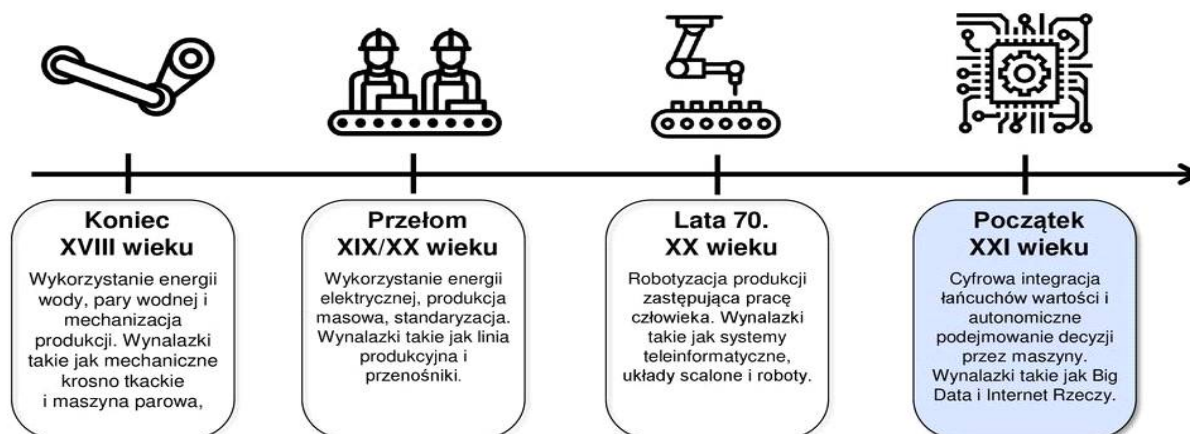
Pomimo krytyki zawartej w powyższych przesłankach należy także docenić zalety tradycyjnego podejścia, zwłaszcza w przypadku przedsięwzięć o wysokim poziomie ryzyka (elektrownie atomowe, zakłady chemiczne itp.), gdzie ryzyko skażenia promieniotwórczego, eksplozji chemicznej czy skażenia żywności uzasadnia rygorystyczne przestrzeganie planu, kontroli zasad i procedur. Wydaje się także, że w przypadku projektów niezbyt skomplikowanych i ograniczonym wpływie otoczenia także należy rekomendować do stosowania podejście tradycyjne.

Można ogólnie stwierdzić, że brak jest jednej uniwersalnej metody zarządzania przedsięwzięciami – należy uwzględniać zalety zarówno elastycznego podejścia, jak i dyscypliny. Możliwe jest wykorzystanie częściowo podejścia tradycyjnego (np. budowa hali sportowej), a wykorzystanie podejścia PM 2.0 zastosować przy budowie i wdrażaniu sterowania systemu zarządzania obiektem.

Natomiast w obu metodach bardzo przydatny może być system monitoringu procesów w toku i otoczenia.

Industry 4.0

W metodzie Industry 4.0 podstawowym założeniem jest wprowadzenie rewolucyjnych zmian w dziedzinie produkcji (na miarę poprzednich innowacyjnych przemian identyfikowanych jako industry 1.0, 2.0 i 3.0 bazujących na parze, elektryczności i komputerach).



Rysunek 2.13. Idea Industry 4.0 na tle trzech zrealizowanych już etapów rewolucji przemysłowej

Tabela 2.11 Zestawienie etapów rozwoju poszczególnych przemian identyfikowanych jako industry 1.0, 2.0, 3.0, 4.0

Opis	Industry 1.0	Industry 2.0	Industry 3.0	Industry 4.0
Kluczowy element	Maszyny parowe	Energia elektryczna	Technika komputerowa	Systemy cyber-techniczne
Korzyści	Transformacja z rzemieślniczych metod produkcji do produkcji przemysłowej	Produkcja masowa na linii produkcyjnej		
Etapy rozwoju	Wprowadzenie urządzeń do maszynowej produkcji napędzanych parą wodną	Wprowadzenie podziału pracy i masowej produkcji z wykorzystaniem energii elektrycznej	Użycie systemów elektronicznych i informatycznych w celu dalszej automatyzacji produkcji	Zastosowanie systemów cyber-fizycznych w celu stworzenia bardziej efektywnych połączeń między osobami, osobami a urządzeniami i między urządzeniami
Kraj pierwszej implementacji	Wielka Brytania	USA		Niemcy

Zasadniczymi elementami przemiany między Industry 3.0 a 4.0, według (Schwab, 2016)s są :

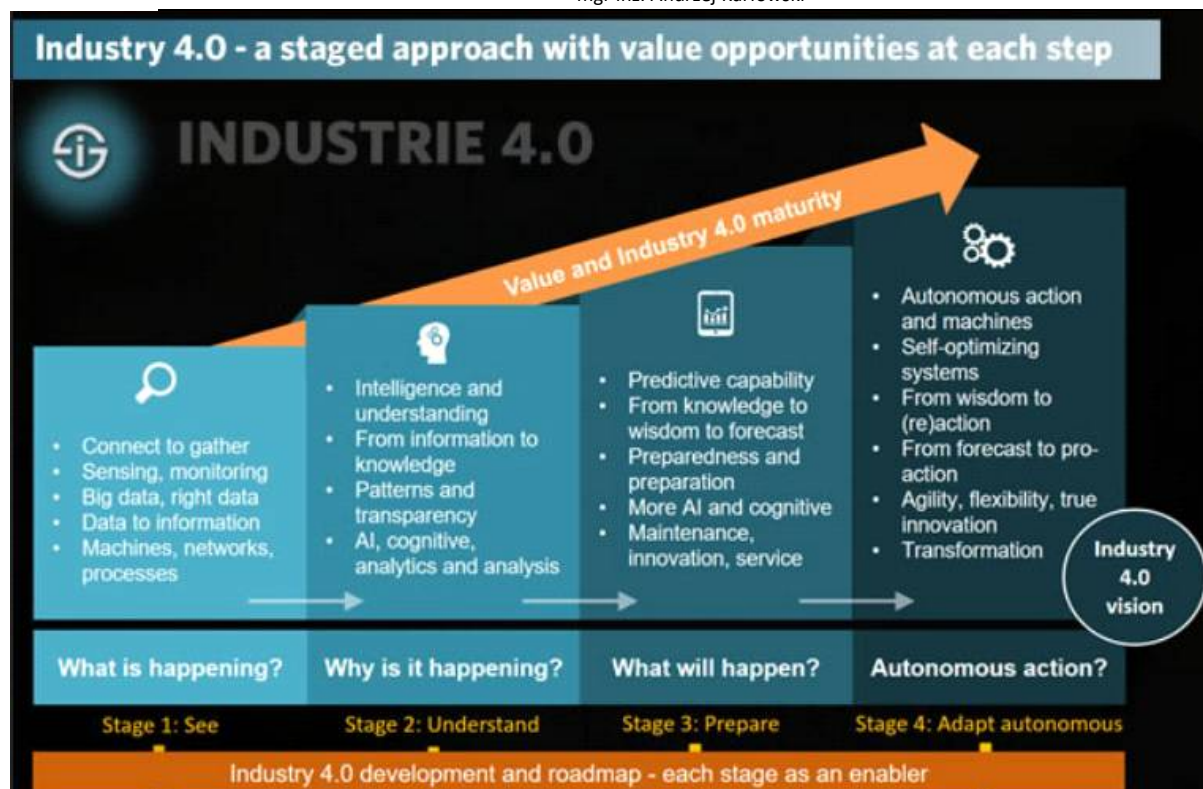


- powszechny dostęp do Internetu,
- diametralne obniżenie kosztów przechowywania danych,
- powszechne stosowanie mobilnych urządzeń,
- inteligentne czujniki,
- odnawialne źródła energii,
- sztuczna inteligencja oparta o uczenie maszynowe.

Kluczowe znaczenie dla rozwoju w ramach idei Industry 4.0 mają systemy cyber-fizyczne, których wprowadzenie opiera się na następujących sześciu zasadach projektowania (six design principles) (Hermann et al., 2015):

- interoperacyjność dająca możliwość komunikowania się ze sobą pracowników między sobą, pracowników z elementami infrastruktury produkcyjnej oraz elementów tej infrastruktury między sobą;
- wizualizacja – możliwość tworzenia modelu analizowanego systemu w rzeczywistości wirtualnej;
- decentralizacja – wykorzystująca możliwości elementów systemu produkcyjnego do autonomicznego działania;
- działanie w czasie rzeczywistym – dane są zbierane, przesyłane i analizowane na bieżąco, co pozwala na szybką analizę i podjęcie odpowiednich działań;
- Orientacja na usługi – możliwość udostępniania i wykorzystywania usług systemów cyber-fizycznych a także pracowników innym uczestnikom procesów (także poza daną organizacją)
- Modularność dająca możliwość elastycznej adaptacji do zmieniających się warunków.

Podstawowymi elementami koncepcji Industry 4.0 w odniesieniu do przedsiębiorstw są:



Rys.2.12. Stopniowe wdrażanie Industry 4.0

Kolejne etapy wdrażania idei Industry 4.0 obejmują (rys. 2.12):

- Połączenie wzajemne (czujniki, monitoring, BIG DATA, dokładne dane (right data)) oparte na sieci czujników i wzajemnej informacji o procesach i maszynach w nie zaangażowanych. Zasadniczym procesem jest zebranie informacji o aktualnej sytuacji i odpowiedź na pytanie: co się dzieje?
- Wykorzystanie narzędzi sztucznej inteligencji (zbieranie informacji i jej analiza w celu gromadzenia wiedzy i tworzenia wzorców postępowania) – zrozumienie przyczyn obserwowanych sytuacji – odpowiedź na pytanie: dlaczego tak się dzieje?
- Wykorzystanie posiadanych i gromadzonych informacji do przewidywania i przygotowania na zaistnienie przyszłych sytuacji. Podstawowym celem jest przygotowanie do przewidywanych zmian i odpowiedź na pytanie: co się wydarzy?
- Podjęcia działania w trybie autonomicznym (zwinność i elastyczność, działanie w trybie proaktywnym) – odpowiedź na pytanie: czy podjąć działanie autonomiczne?



Rysunek 2 Idea zastosowania technologii BIM na kolejnych poziomach analizy

3D	4D	5D	6D	7D
<ul style="list-style-type: none"> • Modele istniejących warunków: • Skanowanie laserowe • Skanowanie w ziemi (GPR) • Modele bezpieczeństwa i logistyki • Animacje, wizualizacje, • Dokładność laserowa modeli BIM 	<ul style="list-style-type: none"> • Planowanie • Symulacje faz projektu • Szczupłe Planowanie • Last Planner • JIT • Dokładne symulowanie instalacji • Sprawdzanie wizualne w celu akceptacji płatności 	<p>Szacowanie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelling pojęciowy i planer kosztów w czasie rzeczywistym (DProfiler) • Ekstraktor ilościowy) w celu wsparcia szczegółowych szacunków kosztów • Weryfikacja zakupu za pomocą modeli produkcyjnych - Stal konstrukcyjna - Architektura -Instalacje • Inżynieria wartości -Scenariusze wariantów -Wizualizacje -Ekstrakcje ilościowe • Rozwiązania do prefabrykacji -Miejsca równorzędne - Systemy MEP - Prefabrykacja wielu branż - Unikalne elementy architektoniczne i strukturalne 	<p>Zrównoważony rozwój</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analiza koncepcji energii przez DProfiler • Dokładna analiza energii przez EcoTech • Zrównoważone namierzanie elementów • LEED 	<p>Zarządzanie budynkiem</p> <ul style="list-style-type: none"> • Strategie LC BIM • Wykonanie BIM • Rozszerzony BIM jako instrukcje O&M • Stosowanie COBie • Utrzymanie BIM • Zarządzanie nieruchomością BIM

Rysunek 2.13. Korzyści wprowadzenia industry 4.0.

W rzeczywistości Przemysł 4.0 oferuje wiele korzyści – zwiększona wydajność to dopiero początek!



Analizując możliwości zastosowania idei Industry 4.0 w odniesieniu do budownictwa wskazać można trzy podstawowe kierunki wdrożenia (Oesterreich & Teuteberg, 2016) :

- Inteligentny plac budowy:
 - Monitoring procesów i otoczenia w czasie rzeczywistym
 - Technologia zbierania danych oparta na zastosowaniu czujników (z możliwością przesyłania danych bezprzewodowo)

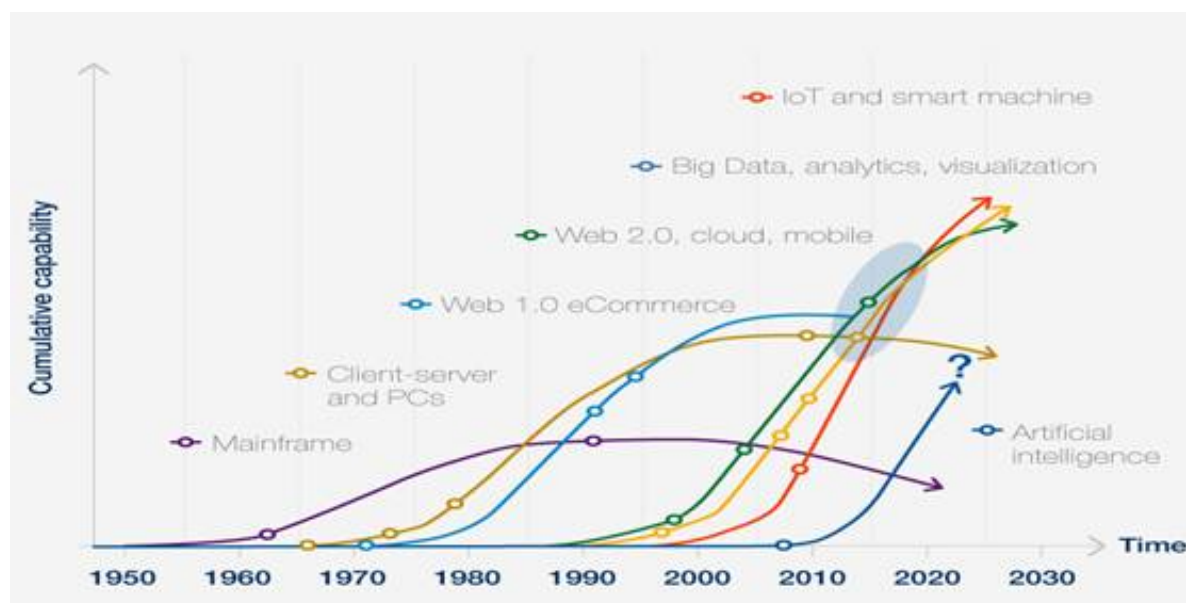


- Technologia śledzenia zasobów i zarządzania nimi w celu optymalizacji czasu i kosztów (wykorzystanie technologii RFID)
- Internet rzeczy i usług – stworzenie wirtualnej sieci dla wsparcia inteligentnej budowy
- Nowe metody produkcji (3D printing i budownictwo modułarne)
- Symulacja i modelowanie:
 - Symulacja obiektu (także w stadium użytkowania) w wirtualnej rzeczywistości
 - Zastosowanie technologii BIM w kolejnych stopniach zaawansowania 3D, 4D planowanie realizacji, 5D szacowanie kosztów, 6D budownictwo zrównoważone, 7D zarządzanie obiektem w trakcie eksploatacji (Ybañez et al., 2022; N. Zhao, 2021)
- Cyfryzacja i wizualizacja (Leśniak et al., 2021; Moon et al., 2019; Skrzypczak et al., 2022; H. Wang et al., 2019) :
 - Projektowanie obiektów budowlanych w chmurze
 - Projektowanie obiektów druk miniatur 3d
 - Zarządzanie projektami w chmurze
 - Kontrola i nadzorowanie budowy za pośrednictwem kamer i dronów
 - Inwentaryzacja skomplikowanych obiektów – wykorzystanie chmury punktów
 - Obliczenia w chmurze
 - Jedno źródło poprawnych danych
 - Big data
 - Wykorzystanie urządzeń mobilnych
 - Digitalizacja produktów i usług.
 - Zarządzanie cyklem życia budynków i budowli
- Cyfrowa realizacja:
 - Drukowanie budynków (García-Alvarado et al., 2021; Tay et al., 2017)

2.12. Podsumowanie rozdziału

Rys. Czynniki rozwoju oparte na digitalizacji – synergia IoT, web 2.0, obliczenia w chmurze, mobilność

Rysunek 2.14. Schemat czasowy rozwoju systemów opartych na cyfryzacji procesów



Mimo panującej iż Industry 4.0 nie zostało jeszcze w pełni skonsumowane i wdrożone w wielu gałęziach przemysłu oraz w przedsiębiorstwach to już powstają podwaliny industry 5.0. Skoro między przemysłem industry 2.0 a 3.0 minęło ok 100 lat to między 3 a 4 rewolucją minęło już tylko 42 lata. W związku z tym mając na uwadze ciągłą akcelerację postępu – każda nowa technologia przyspiesza rozwój następnych technologii, to można założyć, skoro rok 2011 uznaję się datę początku czwartej rewolucji przemysłowej to około na przełomie lat 30 XXI wieku możemy się spodziewać wdrożenia industry 5.0. Tak jak nie dawno technologia komunikacji przesyłania danych w standardzie 5G była wielką nowością (2019) i wydawało się iż będzie w stanie sprostać zapotrzebowaniu internetowi rzeczy tak dziś już wdraża się standaryzację technologii 6G. Standaryzacja technologii 6g ma rozpocząć się w około 2025-2030 roku by sprostać rosnącemu zapotrzebowaniu na transferowanie danych i informacji.

Tak jak poprzednie rewolucje były znaczącym krokiem ku przyszłości tak również industry 4.0 spowodowała znaczące zmiany w przemyśle i jego otoczeniu. Mimo iż wdrożenie i adaptacja industry 4.0 wiąże się z pochłanianiem znacznych zasobów przedsiębiorstw to i tak tempo wdrażania wydają się być niesatysfakcjonujące. W czwartej rewolucji przemysłowej widać znaczną przewagę rozwiązań sprzętowych nad oprogramowaniem: roboty inteligentne czujniki drukowanie 3d wraz z pełną integracją Przemysłowego Internetu Rzeczy (IIoT - Industry Internet of Things).



I choć wydawało się że Przemysł 4.0. jest ostatnią erą integracji i współpracy obiekty i ludzie – (fabryka zostanie niejako przekształcona w inteligentne środowisko), potem w kolejnej rewolucji będą tylko roboty a zarządzać nimi będzie sztuczna inteligencja. To nasuwa się pytanie czy będzie potrzebny jeszcze człowiek. W związku z tym 5 rewolucji przemysłowej planuje się przywrócenie czynnika ludzkiego do systemu produkcyjnego, z paradygmatem współpracy człowiek-robot (HRC - Human–Robot Collaboration). W niedawno przedstawionej nowej wizji cyfryzacji i rozwoju, o nazwie Industry 5.0. stwierdzono iż nowy paradygmat przemysłowy powinien przyczynić się do osiągnięcia celów społecznych poza poprawą wydajności, wzrostu gospodarczego powinien przyczynić się do tworzenia miejsc pracy (Komisja Europejska, 2021). Głównym celem Przemysłu 5.0 jest wykorzystanie ludzkich specjalistów i ekspertów we współpracy z inteligentnymi maszynami, aby uzyskać wydajność w najbardziej efektywny sposób (Maddikunta et al., 2022),(Nahavandi, 2019)(Longo et al., 2020).

Główne zmiany zaproponowane w tej nowej wizji dotyczyć będą nowych technologii, które muszą opierać się na trzech powiązanych ze sobą podstawowych wartościach (Xu et al., 2021):

- Human-centricity : podstawowe potrzeby i interesy ludzkie i społeczne powinny być w centrum procesów projektowania i produkcji (znanych również jako Society 5.0, (Fukuyama, 2018);
- Zrównoważony rozwój: należy rozwijać procesy neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla i procesy o obiegu zamkniętym, które umożliwiają ponowne wykorzystanie, zmianę przeznaczenia i recykling zasobów naturalnych, a także zmniejszenie ilości odpadów i wpływu na środowisko, co doprowadzi do gospodarki o obiegu zamkniętym
- Odporność : odnosi się do potrzeby zapobiegania wystąpieniu zakłóceń poprzez dostarczanie lub wspieranie infrastruktury krytycznej w czasach kryzysu. Obecne kryzysy gospodarcze i ocieplenia na świecie zwróciły uwagę na potrzebę ponownego przemyślenia istniejących metod pracy i podejść w celu zmniejszenia podatności łańcuchów dostaw.

Podsumowując rozdział 2 można stwierdzić, że:

- Procesy budowlane są trudne do sterowania, co wynika ze specyfiki budownictwa jako dziedziny gospodarki
- Jednym z kluczowych czynników wewnętrznych generujących zakłócenia jest wciąż człowiek jako realizator procesów (wahania wydajności, błędy itp.)
- Do czynników zewnętrznych wpływających znacząco (zwłaszcza w klimacie zmiennym – Polska) są czynniki pogodowe



- Jednym z działań ukierunkowanych na uprzemysłowienie budownictwa jest prefabrykacja i budownictwo modułowe
- Uprzemysłowienie w tym ujęciu pozwala na wprowadzenie automatyzacji procesów, wykorzystanie ICT, co w efekcie prowadzi do ograniczenia udziału pracowników w procesie produkcyjnym oraz wpływu warunków pogodowych ich poprawny na przebieg
- Jednak przy wprowadzeniu prefabrykacji należy liczyć się z pewnym udziałem robót na placu budowy
- Do typowych procesów realizowanych na placu budowy należą roboty betonowe
- Ich realizacja jest obciążona w sposób szczególny wpływem zmiennego otoczenia, gdyż decyzje dotyczące składu mieszanki betonowej, metod jej układania i pielęgnacji podjąć trzeba z relatywnie dużym wyprzedzeniem, co generuje duże ryzyko – decyzje trzeba podejmować w warunkach ograniczonej ilości i jakości informacji (np. prognoza pogody)
- W tak opisanej sytuacji ryzykowej pozostają dwie strategie działania: zwiększenie ilości i jakości informacji o procesach i otoczeniu (także prognoza) oraz wprowadzenie elastyczności (warianty technologiczne oparte o opcje materiałowe i procesowe).
- Stwierdzić można rosnące zainteresowanie badaczy monitorowaniem procesu betonowania, co potwierdza istotne znaczenie tego procesu w budownictwie
- Istotnymi motywatorami do podjęcia nowych inicjatyw w tym zakresie są nowatorskie programy Industry 4.0 i Project Management 2.0 promujące zastosowanie technologii innowacyjnych (coraz doskonalsze czujniki, automatyczne zbieranie, transmisja i analiza danych, wykorzystanie uczenia maszynowego itp.)
- Bazując na analizie literatury stwierdzić można lukę umożliwiającą wprowadzenie systemu wspomagania decyzji technologicznych w zakresie betonowania w niskiej temperaturze.
- Proponowana koncepcja trzypoziomowego systemu doradczego opiera się o:
 - naukę z przykładów (wykorzystanie dotychczasowych doświadczeń)
 - wprowadzenie innowacji materiałowych i procesowych
 - przygotowanie wariantów technologicznych: zgodnych z ideą elastyczności czynnej (adaptacyjność) i biernej (odporność)

Rozdział 3. Cel, tezy i przedmiot rozprawy

3.1. Cel rozprawy

Celem rozprawy jest wskazanie możliwości usprawnienia procesu podejmowania decyzji technologicznych w budownictwie. Metoda bazuje na podejściu elastycznym – decyzje są podejmowane hierarchicznie – w zależności od poziomu zarządzania i horyzontu planowania. Przewidziano możliwość korekty dotychczasowej decyzji w oparciu o zarządzanie procesem w czasie rzeczywistym. Skoncentrowano się na technologii betonowego budownictwa na bazie betonu cementowego, jednak założenia metody można uogólnić na zarządzanie procesami budowlanymi uzależnionymi od stanu zmiennego otoczenia.

Zaproponowano system doradczy oparty o tablicę decyzyjną uwzględniającą aktualny stan procesu i otoczenia, jak i prognozę stanu na najbliższy okres.

3.2. Tezy rozprawy

Podczas realizacji postawionego celu rozprawy zostały sformułowane następujące hipotezy badawcze:

- Zastosowanie elastycznego proaktywnego podejścia umożliwi osiągnięcie wymaganych efektów procesu pomimo działania w zmiennym otoczeniu (zapewnienie jakości)
- Monitorowanie procesów i otoczenia on-line pozwala podejmować właściwe decyzje przy uwzględnieniu możliwości korekty decyzji w kolejnym etapie
- Budowa systemu doradczego wykorzystującego uczenie się z przykładów systematycznie zwiększa efektywność i skuteczność przy realizacji procesów budowlanych.
-

3.3. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest proces betonowania realizowany w warunkach zmiennego otoczenia ze szczególnym uwzględnieniem obniżonej temperatury.



3.4. Zakres rozprawy

W rozdziale 1 przedstawiono wprowadzenie bazujące na motywacji autora.

W rozdziale 2 omówiono stan wiedzy w zakresie rozprawy wskazując typowe problemy wynikające z uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych oraz możliwości związanych z zastosowaniem nowoczesnych metod zarządzania i organizacji procesami.

W Rozdziale 3 zawarto cel i tezy rozprawy.

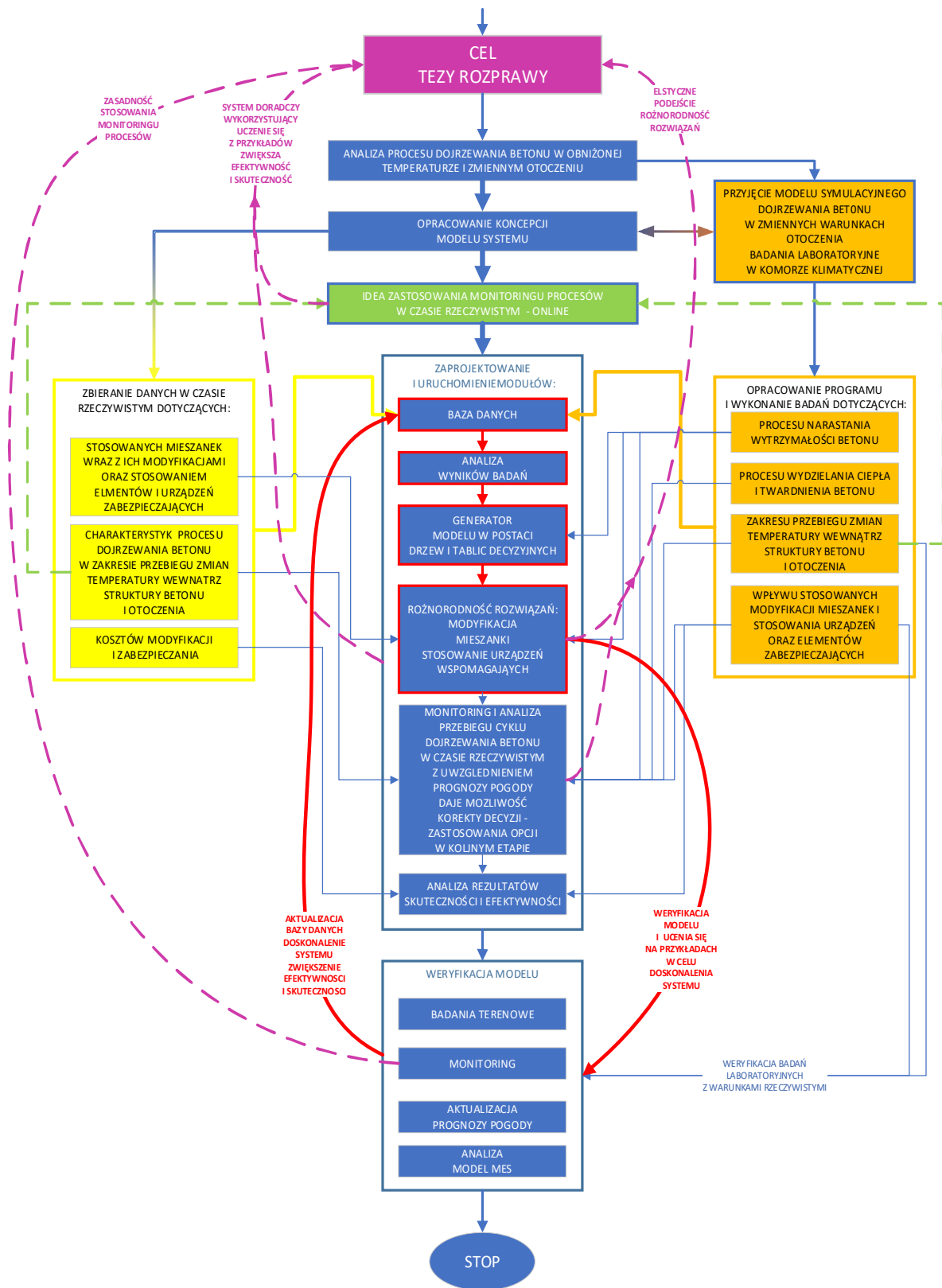
W rozdziale 4 omówiono niezbędne elementy współczesnego systemu doradczego.

W rozdziale 5 przedstawiono podstawy wieloetapowego systemu doradczego.

W rozdziale 6 omówiono system doradczy COLCON wraz z zastosowaną aparaturą.

W rozdziale 7 przedstawiono wnioski ogólne i szczegółowe oraz zaprezentowano problematykę dalszych badań.

Rysunek 3.1 Przedstawia schemat działania przy pisaniu rozprawy – opracowanie autora.



Rozdział 4. Niezbędne elementy oraz uwarunkowania systemu doradczego

Współczesny system doradczy związany z podejmowaniem decyzji w zmiennym otoczeniu powinien być oparty o strategię elastyczności proaktywnego podjęcia z wykorzystaniem monitoringu online (parametrów otoczenia oraz przebiegu zmian temperatury w dojrzewającej mieszance betonowej). Tak podjęcie umożliwi podejmowanie właściwych decyzji przy uwzględnieniu zmiennego otoczenia oraz uwarunkowań termodynamicznych dojrzewającego betonu z możliwością adaptacji - korekty decyzji w kolejnych etapach zarządzania procesem betonowania w obniżonej temperaturze.

4.1. Elastyczność jako alternatywna idea dla klasycznego podejścia organizacji robót

Dynamiczne zmiany społeczne i technologiczne mają ogromny wpływ na realizację procesów – rosnące wymagania (skrócenie czasu realizacji poszczególnych etapów robót, działanie w warunkach niepewności przy ograniczonej ilości informacji) a co za tym idzie również warunki funkcjonowania przedsiębiorstwa. O ile jeszcze kilkanaście lat temu w odpowiedzi na dynamiczne zmiany środowiska można było odpowiedzieć poprzez restrukturyzację, transformacje oraz adaptacje dzisiaj jest to niewystarczające do pomyślnego zrealizowania zadania oraz osiągnięcia przewagi konkurencyjnej na rynku budowlanym (Wojtkowiak, 2015).

Powyższe czynniki powodują powiększenie obszarów ryzyka oraz brak skutecznej możliwości ich wyeliminowania z drugiej strony stwarzają możliwości ich wykorzystania i osiągnięcia korzyści (Skrodzka, 2013).

Nieustanne przeobrażanie się przedsiębiorstw działających w tradycyjnych strukturach i stosujących klasyczne technologie jest nie wystarczające by sprostać dynamicznie zmieniającemu się otoczeniu zarówno na rynku zleceń oraz przede wszystkim w trakcie realizacji inwestycji. Dlatego nowoczesne przedsiębiorstwa budowlane powinny zmieniać narzędzia i strategie i podążać w kierunku upodobnienia produkcji budowlanej do produkcji fabrycznej. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu rozwiązań wykorzystywanych w Industry 4.0 oraz technologii BIM.

Nowoczesne technologie oparte o wymianę i przepływ informacji w czasie rzeczywistym pozwoliło by na stworzenie nowych elastycznych rozwiązań w postaci elastyczności określanej jako zwinność



(Trzcieliński, 2011) czyli sprawną adaptację do warunków zmieniającego się środowiska pracy i otoczenia. w celu eliminacji ryzyka

Elastyczność jest elementem nowoczesnej strategii – podejścia do realizacji procesów i zarządzania współczesnym przedsiębiorstwem oraz instrumentem redukcji ryzyka.

Elastyczność poprzez zdolności adaptacyjne wpływa na wszystkie obszary zarówno organizację produkcji, zasoby ludzkie, finansowe i informacyjne o czym świadczy rozwój wiedzy w poszczególnych obszarach a także inne zbliżone metody zarządzania czy strategię takie jak lean management, lean production czy lean enterprise (Saurin et al., 2013; Thüerer, 2013), (Nowotarski et al., 2016; Nowotarski & Paślawski, 2018)

Specyfika branży budowlanej – zwłaszcza sezonowość związana z cyklem rocznym oraz logistyka obsługi różnych lokalizacji w przestrzeni geograficznej wymaga elastycznego przerzucania zasobów oraz adaptacyjnej zmiany technologii i organizacji pracy niezbędnej w turbulentnym i dynamicznie zmieniającym się otoczeniu dla skutecznego „gaszenia pożarów”.

W tak zdefiniowanej elastyczności mamy do czynienia z paradoksem łączenia różnych technologii i generowania dodatkowych kosztów dla osiągnięcia odpowiedniej równowagi między tymi czynnikami co pozwala wyeliminować ryzyko lub złagodzić konsekwencje jego wystąpienia.

Tak pojmowana elastyczność w zarządzaniu polegać będzie na poszukiwaniu optymalnych rozwiązań w celu zapewnienia możliwie jak najwyższej skuteczności i efektywności.

Elastyczność możemy podzielić ogólnie na wewnętrzną i zewnętrzną:

- elastyczność wewnętrzną to zdolność do dostosowania rozwiązań do zmiennych warunków realizacji zadania poprzez modyfikację dedykowanych rozwiązań niezbędnych do realizacji zamierzonych celów lub zadania
- elastyczność zewnętrzną to zdolność do ograniczenia wpływu określonych czynników poprzez absorpcję zakłóceń inaczej mówiąc ograniczenie ryzyka

W porównaniu do rozwiązań tradycyjnych, które charakteryzują się stałym układem procesów i rozwiązań (podejście deterministyczne) podejście elastyczne daje odporność na stosunkową dużą częstotliwość zmian.

Takie podejście wydają się być odpowiednie dla zarządzania procesami betonowania ze względu na możliwość indywidualizacji i dopasowania produkcji elementów betonowych o różnorodnym kształcie



i przekroju realizowanych w zmiennych warunkach lokalizacyjnych oraz dynamicznie zmieniającego się otoczenia (warunków atmosferycznych zwłaszcza temperatury).

Dokonując przeglądu i analizy literatury pod kątem zastosowania elastyczności należy wyodrębnić dwa główne nurty: adaptacja i odporność. Przyjęty podział elastyczności na dwie podstawowe składowe jako odpowiedzi wymienić można przykładowo opracowania, (Krupski, 2005; Paślawski, 2017; Ross et al., 2008)

Ponadto osiągnięcie wysokiego poziomu elastyczności to zdolność tworzenia przewagi konkurencyjnej a w niektórych przypadkach może być jedynym warunkiem przetrwania przedsiębiorstwo w zmiennym otoczeniu (Wojtkowiak, 2015)

Tabela 4.1. Cztery zasadnicze elementy konkurencyjności – adaptowana koncepcja Lau (1996)

Wysoka	JAKOŚĆ	ELASTYCZNOŚĆ	
Zdolność do spełniania oczekiwań klienta			
Niska	KOSZT	INNOWACYJNOŚĆ	
	Niski	Potencjał reakcji na zmiany	Wysoki

Tabela 4.2. Ogólna koncepcja elastyczności i elastyczność w inżynierii procesów budowlanych - porównanie (Paślawski 2009)

Koncepcja	Ogólna koncepcja elastyczności	Specyficzne podejście do elastyczności w budownictwie
Wyszczególnienie	Możliwość dostosowania do wymagań indywidualnego klienta -customerization	Możliwości dostosowania do specyficznych warunków realizacji - conditilization
Obiekt dostosowania	Klient/Odbiorca	Otoczenie/środowisko
Kluczowy element ryzyka	Zapotrzebowanie klienta	Warunki realizacji



Przykłady	Przemysł samochodowy, maszynowy elektroniczny	Budowa dróg lotnisk, montaż elewacji budynków wysokich
-----------	--	---

4.1.1. Przesłanki zastosowania elastyczności

Elastyczność w zarządzaniu przedsiębiorstwem oraz w organizacji procesów jest odpowiedzią na zmieniające się warunki otoczenia w jakich musi funkcjonować i realizować zadania współczesna firma. Współcześnie mamy do czynienia z postępującą globalizacją, deregulacją rynków, rosnącym natężeniem walki konkurencyjnej przy realizacji wszelkich inwestycji.

Wszystkie te zjawiska w makro i mikro otoczeniu, jak również działania podejmowane przez firmy, generują wysoką zmienność w codziennej działalności przedsiębiorstwa. w związku z powyższym odpowiednia elastyczność organizacji pozwala sprawnie funkcjonować w turbulentnym otoczeniu i stanowi ważny, coraz ważniejszy, element budowania konkurencyjności i efektywności przedsiębiorstwa (Osbert-Pociecha et al., 2008)

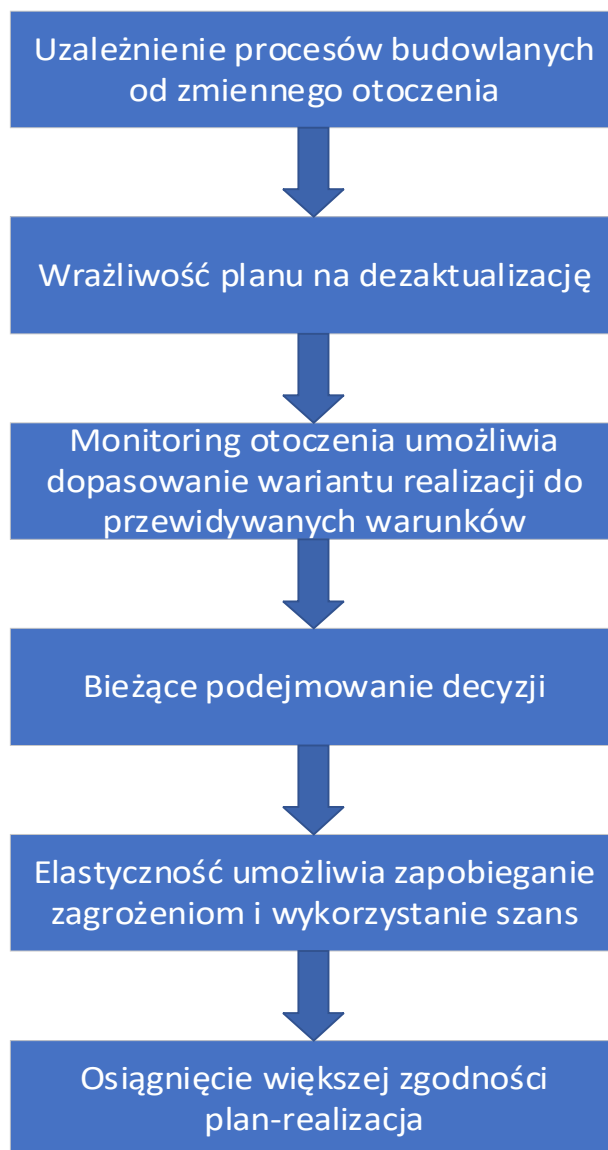
Jednocześnie elastyczność przedsiębiorstwa wymaga przełamania barier technologicznych związanych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii

Szybki postęp sprzyja wprowadzeniu elastyczności przez wykorzystanie takich elementów chociażby jak monitoring procesów w czasie rzeczywistym.

Stosowanie nowoczesnych technologii – innowacji ułatwia wprowadzenie podejścia elastycznego w inżynierii procesów budowlanych poprzez wykorzystanie monitorowania i symulowania procesów w toku. (Paślawski, 2009)

Zastosowanie elastyczności pozwala na etapowe podejmowanie decyzji poprzez dostosowanie poszczególnych etapów realizowanego procesu do zmieniającego się otoczenia w celu osiągnięcia odpowiedniej równowagi między tymi czynnikami. Wybór odpowiedniego - optymalnego rozwiązania na kolejnym etapie co pozwala wyeliminować ryzyko lub złagodzić konsekwencje jego wystąpienia.

Rysunek 4.1. Ciąg logiczny uzasadniający zastosowanie elastyczności (Paśtawski, 2009)



4.1.2. Dualizm elastyczności

Z analizy literatury pod kątem zastosowania elastyczności omówionej powyżej można wyodrębnić podział na elastyczność zewnętrzną i wewnętrzną związaną głównie z funkcjonowaniem przedsiębiorstwa oraz elastyczność bierną i czynną związaną z realizacją procesów.

Z punktu zawartości niniejszej rozprawy kluczową parą jest elastyczność bierna określona tutaj jako odporność i elastyczność czynna zwana adaptacyjnością.

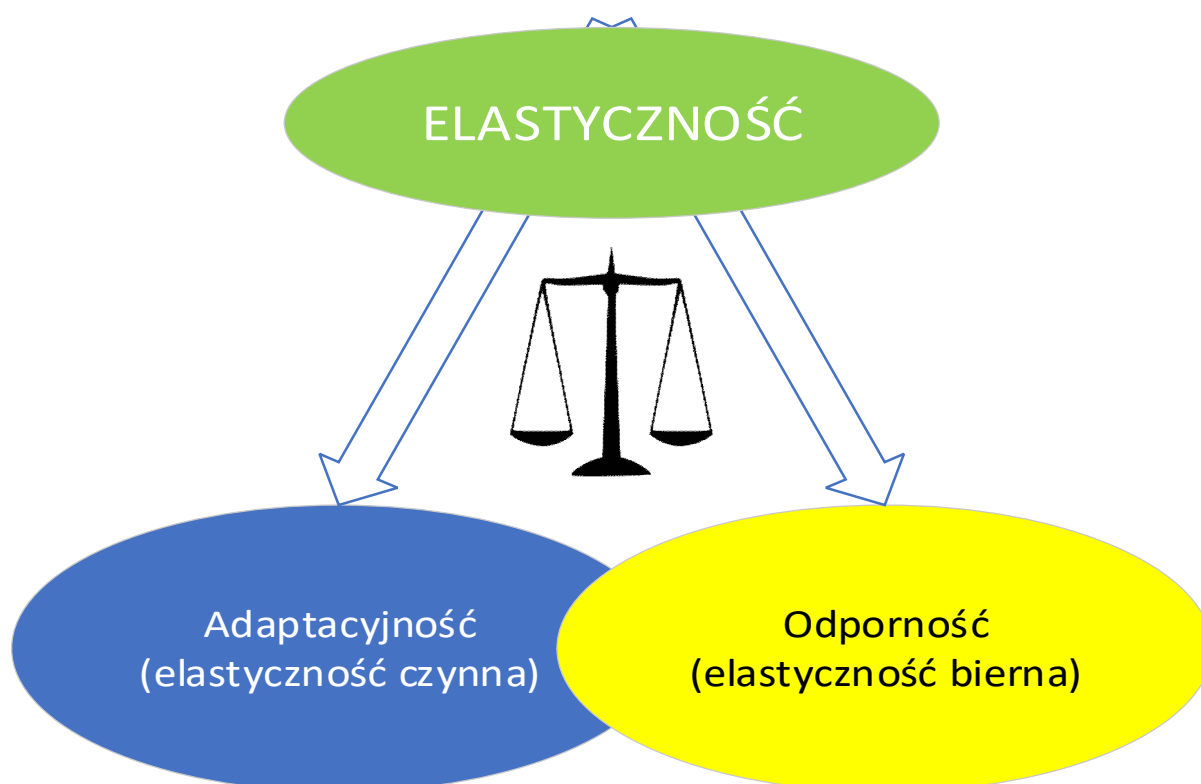
Adaptacyjność to zdolność do przystosowania się do zmieniających się warunków oraz właściwość umożliwiająca odpowiednie reagowanie systemu na zmiany otoczenia.

Mechanizm dostosowania powinien opierać się na systemie monitorowania (zbierania, przesyłania i analizy danych), który umożliwia podjęcie właściwej decyzji.

Odporność to nie wrażliwość na nieprzewidywalne w pewnym zakresie zmiany otoczenia. Istotne jest określenie zakresu zmian oraz przedział czasu, w którym to zakłócenie występuje.

Obecnie odporność w przeciwieństwie do adaptacyjności uznać należy za cechę dominującą w wielu procesach budowlanych gdyż łatwiej jest zawyżyć parametry mieszanki betonowej w celu kompensacji zakłóceń, które mogą wystąpić we wczesnej fazie wiązania betonu niż stosować adaptacyjność w postaci np. ogrzewanych deskowań.

Rysunek 4.2 Schemat podziału elastyczności



Natomiast z punktu widzenia proponowanego systemu istotna role odgrywa elastyczność czynna – adaptacyjność która pozwala na etapowanie podejmowania decyzji.

W pierwszej fazie realizacji procesu betonowania to odporność stanowić będzie kluczowy element elastyczności poprzez modyfikację mieszanki betonowej – takie rozwiązanie jest relatywnie tanie a co



za tym idzie uzasadnione ekonomicznie. w kolejnych etapach poprzez zastosowanie monitoringu procesu w toku oraz stosowanie dodatkowych elementów w postaci elektro-nagrzewu czy też podgrzewanych deskowań możliwe będzie zwiększenie odporności danego elementu na niekorzystne warunki zewnętrzne (długotrwałe oddziaływanie obniżonej temperatury) poprzez zastosowanie elastyczności czynnej – adaptacyjności przez odpowiednie uruchamianie tych urządzeń w odpowiednim czasie.

4.1.3. Klasyfikacja Elastyczności

Analizując omówione powyżej idee zastosowania elastyczności zgodnie z opracowaniem (Paślawski, 2009) należy wymienić następujące warianty:

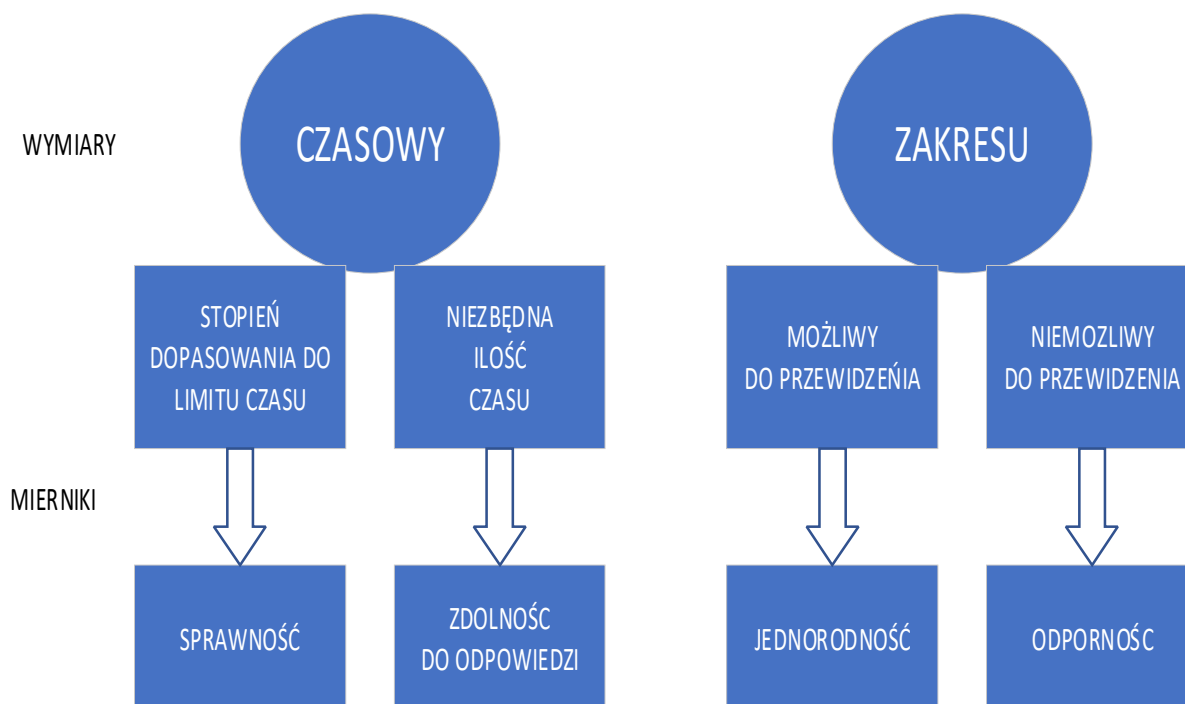
- Elastyczność horyzontalna – odnosząca się do poszczególnych faz i stanów produkcji,
- Elastyczność pionowa – hierarchiczna, która dotyczy pojedynczych zasobów lub całego systemu,
- Elastyczność czasowa oparta na czasie reakcji w odpowiedzi na zmiany otoczenia,
- Elastyczność według możliwości przewidywania zmian,
- Elastyczność według reaktywności: pro aktywna i reaktywna związana z podejmowaniem działań przed lub po wystąpieniu zdarzenia,
- Elastyczność według strategii działania: ofensywna i defensywna,
- Elastyczność lokalizacji: wewnętrzna zewnętrzna – zależnie od obszaru, gdzie się znajduje,
- Elastyczność według ważności czynników ryzyka i niepewności,
- Elastyczność według lokalizacji elastyczności w strukturze procesu,

4.1.4. Miernik Elastyczności

Wyniki badań nad ryzykiem przedsiębiorstw i przedsięwzięć budowlanych wykazują, że największe wymierne korzyści związane z eliminacją ryzyka daje wykształcenie odpowiedniego poziomu elastyczności jako kluczowej kompetencji (Tworek, 2013)

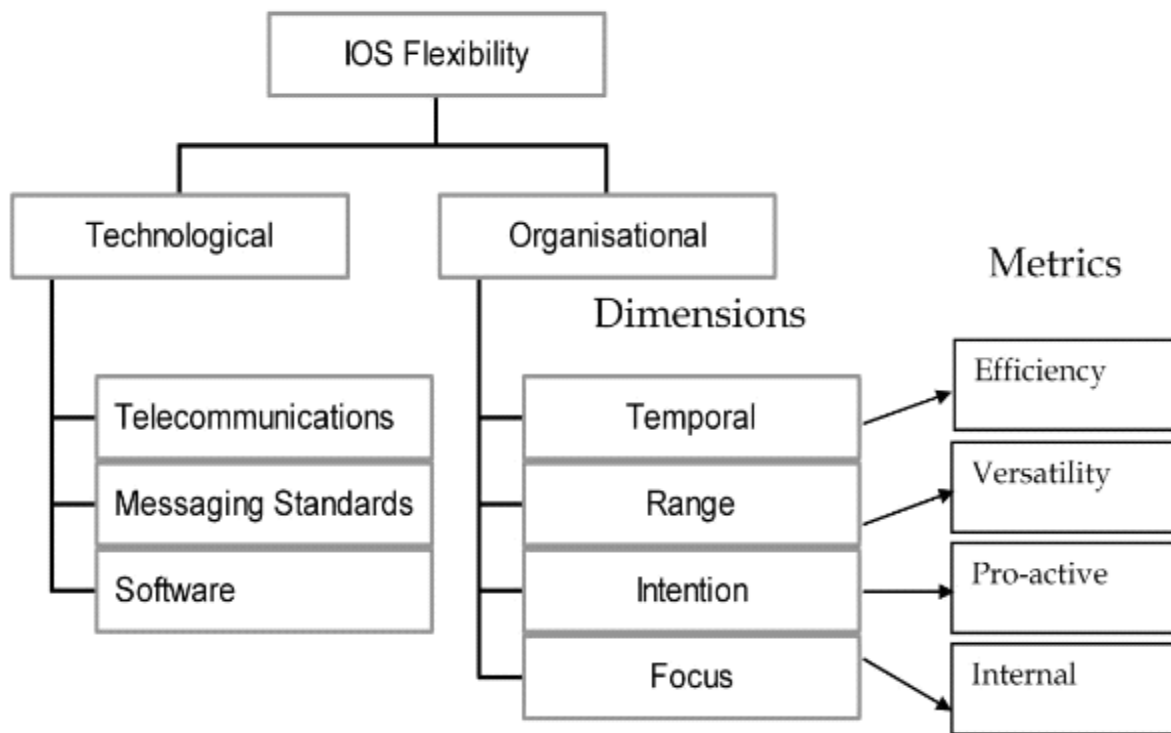
Powstaje zatem pytanie w jaki sposób mierzyć skuteczność elastyczność.

Rysunek 4.3. Powiązania między wymiarami elastyczności i jej miernikami (Golden, Powell 2000)



Na podstawie kilkunastu prac określono cztery najważniejsze mierniki rysunek powyżej (nr do wpisania). w późniejszych badaniach (William Golden & Powell, 2004; Willieam Golden & Powell, 2000) w odniesieniu do elastyczności organizacyjnej proponują podział na wspomniane już cztery wymiary: czasowy, zakresu, celowości i zogniskowania uwagi, które łączą się czterema miernikami: sprawnością, wszechstronnością, pro aktywnością i elastycznością wewnętrzną.

Rysunek 4.4. Powiązania między wymiarami elastyczności i jej miernikami (Golden, Powell 2004)



Ponadto możliwe zastosowanie oceny wielokryterialnej do analizy elastyczności przedstawili (Lu et al., 2005) oraz (Sayers et al., 2003).

Według (Stabryła, 2020) elastyczność można ocenić poprzez:

- wielkość efektów działania
- wskaźnik funkcjonowania system np. trwałość, niezawodność
- Natomiast według (Osbert-Pociecha et al., 2008) kompleksowymi miernikami mogą być:
- Skuteczność oznaczająca ukierunkowanie na osiągnięcie odpowiednich celów
- Sprawność rozumiana jako racjonalne urzeczywistnienie celów

Przy realizacji procesów budowlanych kompleksowym miernikiem elastyczności mogą być koszty realizacji poszczególnych etapów przedsięwzięcia.



4.1.5. Strategie elastyczności

Rodzaje strategii:

- strategia agresywna maxi-maxi,
- strategia konkurencyjna (mini-maxi),
- strategia konserwatywna (maxi-mini),
- strategia defensywna (mini-mini),

W związku z realizacją przedsięwzięć budowlanych zawężonych do procesu betonowania w obniżonej temperaturze w warunkach zmiennego otoczenia odpowiednią będzie strategia konserwatywna umożliwiająca ograniczenia zakłóceń związanych z nagłym i długotrwałym oddziaływaniem obniżonej temperatury.

4.2. Monitoring w czasie rzeczywistym narzędzie niezbędne w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu.

Jak wynika z analizy podstawowych trendów w dziedzinie zarządzania podstawowym elementem jest wykorzystanie monitorowania procesów w toku i otoczenia w celu podejmowania odpowiednich działań w turbulentnym otoczeniu.

W budownictwie polskim prekursorem tego typu podejścia jest Witakowski (Witakowski, 2003, 2009, 2011; Witakowski & Instytut Techniki Budowlanej., 2010; Witakowski & Pawluś, 2005), którego działania od początku skoncentrowane były na budownictwie betonowym. w roku 2004 ukazała się instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej dotycząca systemu kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie.

Na przestrzeni dziewięciu lat (lata 2002-2011) z inicjatywy Prof. Piotra Witakowskiego zostało zorganizowanych 13 sympozjów, których tematyka poszerzała się stopniowo w odpowiedzi na dynamiczny rozwój dwóch dziedzin: zarówno zarządzania jakością, jak i teleinformatyki. Jednak zawsze przywiązywane było duże znaczenie do zarządzania procesem betonowania jako kluczowego procesu w budownictwie.

Na uwagę zasługują liczne praktyczne zastosowania, np. przy budowie mostu Świętokrzyskiego w Warszawie (Witakowski, 2003) oraz przy budowie wirtualnego laboratorium (Witakowski & Pawluś, 2005)



Ponadto na uwagę zasługują prace zespołu kierowanego przez Profesora Wilde

(A. Mariak & Wilde, 2015; Aleksandra Mariak et al., 2016; Wilde et al., 2017)

(Kuryłowicz-Cudowska et al., 2017; Aleksandra Mariak et al., 2016). Szczególnie interesująca jest publikacja dotycząca monitorowania budowy konstrukcji mostowej, w której poprzez zastosowanie monitoringu temperatury co pozwoliło określić przewidywaną wytrzymałości na ściskanie opartego na równaniu Arrheniusa uzyskano możliwość przyspieszenia robót.

Ponadto z punktu widzenia monitorowania w czasie rzeczywistym interesujący jest referat prezentowany na konferencji ISARC 2009 (Viljama i in., 2009), który dotyczy doświadczeń przy układaniu nawierzchni z betonu asfaltowego. Zaprezentowany prototypowy system monitoruje temperaturę masy asfaltowej przy wykorzystaniu czujników typowych (PT-100) i czujników podczerwieni (IR) oraz urządzeń GPRS i RFID. Podobną tematykę podjął (Jin et al., 2020; Zhang & Zhou, 2013; S. Zhao et al., 2023).

(Golparvar-Fard et al., 2009; K. Han et al., 2017; K. K. Han & Golparvar-Fard, 2015; Lee et al., 2009) przedstawili system zapewniający możliwość monitorowania procesu dojrzewania betonu oparty na czujnikach zintegrowanych z transponderami umożliwiającymi bezprzewodową transmisję danych.

Gajewski i Szabat (2005) opisali system symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji na przykładzie masywnych ścian zbiornika oczyszczalni ścieków. Głównym celem systemu było zapewnienie bezawaryjnego betonowania masywnej konstrukcji w warunkach zmiennej temperatury otoczenia. w celu zapobiegania problemom jakościowym do zaizolowania konstrukcji użyto folii bąbelkowej.

(D. Wang & Zhu, 2011) przedstawili monitorowanie narastania wytrzymałości we wczesnej fazie dojrzewania betonu przez zastosowanie czujników opartych na przetwornikach impedancji.

W trakcie badań własnych prowadzone były prace związane z przebiegiem zmian temperatury we wczesnej fazie dojrzewania betonu poprzez zastosowanie czujników opornościowych typu PT100 przewodowych i bezprzewodowych z urządzeniem do zbierania i przekazywania danych poprzez sieć internetową oraz GSM.

Zastosowanie monitoringu temperatur pozwoliło na podjęcie odpowiednio wczesnej reakcji na uruchomienie elektronagrzewu co przyczyniło się do zapewnienia odpowiedniej jakości finalnej wykonywanego elementu (Poznań Garbary 2008).



4.3. Termodynamika tworzenia struktury betonu

4.3.1. Ciepło hydratacji

Proces wiązania cementu jest typową reakcją egzotermiczną. Wydzielanie ciepła jest uzależnione od składu mineralnego cementu, jego klasy, dodatków (np. popiołu lub żużla). Znajomość ciepła hydratacji jest istotna przy betonowaniu w obniżonej temperaturze gdyż dobór odpowiedniej mieszanki betonowej - stosowanie cementów o wyższej zawartości klinkieru, podgrzewanie kruszyw i wody zarobowej pozwala od odpowiednie zabezpieczenie mieszanki betonowej

Środki zaradcze ograniczające

4.3.2. Temperatura przebiegu procesu dojrzewania mieszanki betonowej jako główny parametr oceny prawidłowego przebiegu procesu

Matematyczny model twardniejącego betonu jest w literaturze przedstawiany bardzo dużą liczbą modeli matematycznych dojrzewającego betonu uwzględniający w różny sposób aspekty termo-hygro-chemo-mechaniczne. Na przykład Freitas i inni [9] sformułowali słabo sprzęgnięty model termochemiczny, który upraszcza się do różniczkowego równania na pole temperatury i ewolucyjnego równania na postęp hydratacji. Jego rozwinięciem jest trójpolowy model Azenha [10], w którym pole temperatury, wilgotności względnej i przemieszczeń są podstawowymi niewiadomymi, natomiast rozwój rys w betonie wyznaczany jest z empirycznego algebraicznego domknięcia. Z kolei w modelu Di Luzio – Cusatisa [11] pojawiają się źródła ciepła z dwóch wiodących reakcji chemicznych zachodzących podczas hydratacji cementu. Istotą podejścia Gawina [12, 13] jest „potraktowanie” procesu hydratacji jako pewnej egzotermicznej reakcji chemicznej, bez wnikania w ilości poszczególnych reakcji krokowych.

Opracowane modele zapewniają dobry wgląd na proces twardnienia betonu, ale z uwagi na swoją kompleksowość nie są odpowiednie do zastosowań inżynierskich.

Według autorów pomiary temperatury i wydzielanego ciepła w trakcie dojrzewania są głównym parametrem pomiarowym wokół którego można budować hipotezy co do przebiegu zjawisk, teorię matematyczną jak i modele symulacyjne. Zagadnienie dojrzewania betonu wymaga wprowadzenia równania termodynamicznego, w którym najbardziej złożony aspekt stanowi wewnętrzne źródło ciepła uwalniane w trakcie reakcji hydratacji. Powoduje ono przestrzenne zróżnicowanie pól temperatur.



Termodynamiczne równanie połowe opisujące stan młodego betonu można zapisać w postaci [8, 15, 16]

Wynikiem reakcji wiązania cementu jest przejście zaczynu cementowego od stanu plastycznego do sztywnego, czemu towarzyszy ciągłe wydzielanie ciepła. Proces ten jest szczególnie istotny w pierwszych dniach twardnienia betonu. Niejednorodne i niestacjonarne pole temperatury ($T(x, y, z, t)$) twardniejącego betonu kształtują się w zależności od rodzaju i ilości cementu, przewodności, pojemności cieplnej komponentów betonu, intensywności wymiany ciepła z otoczeniem, temperatury początkowej mieszanki betonowej oraz temperatury otoczenia. Istotny wpływ mają także wymiary i proporcje geometryczne wbudowanej mieszanki betonowej oraz sąsiedztwo gotowych bloków.

Parametry materiałowe $k, \alpha, \xi, \infty, 0, n$, n wyznacza się na drodze doświadczalnej. Zformuły (2) wynika, że aktywacja cieplna opisana członem Arrheniusa ψ ma zasadnicze znaczenie w fazie początkowej reakcji. W miarę postępu hydratacji reakcja ulega spowolnieniu, aż do osiągnięcia $\xi = \xi_{\infty}$. Równanie (2) pod warunkiem $0 \leq \xi \leq \xi_{\infty}$, spełnia wymóg realistycznego modelowania reakcji hydratacji [1]

Sezonowość robót budowlanych

Jedną z wielu branż zależnych od sezonowości jest właśnie branża budowlana, w której prace trwają w głównie podczas cieplejszych dni z dodatnią temperaturą. w warunkach obniżonej temperatury $< 10^{\circ}\text{C}$ należy spełnić dodatkowe wymagania, a w temperaturach ujemnych robót budowlanych nie powinno się w ogóle wykonywać. Taki stan rzeczy ma wpływ nie tylko na gospodarkę ale również na wiele innych kwestii pośrednio z nią związanych. Sezonowość branży budowlanej ma kolosalne znaczenie dla inwestycji infrastrukturalnych takich jak na przykład budowa dróg. Inwestycje te z założenia można realizować tylko i wyłącznie w okresie od wiosny i jesieni, ale już na pewno nie zimą gdy średnie temperatury są ujemne.

W związku z powyższym w inwestycjach budowlanych występują często opóźnienia, które pojawiają się szczególnie wówczas, kiedy pogoda sprawia niespodziewane figle (gwałtowne znaczne spadki temperatury głównie poniżej 0°C). Często zdarza się tak, że nawet w okresie wiosennym oraz jesiennym zdarzają się dni z ujemną temperaturą co przedstawia wykres poniżej. Nie mówiąc już o tym, że dodatkowo jesienią występują często spore opady deszczu, które dla wielu inwestycji budowlanych i drogowych mają bardzo zgubny wpływ. To jak duże znaczenie mają pory roku dla branży budowlanej można zaobserwować gołym okiem, kiedy dookoła nas prowadzone są jakieś budowy. Zimą na placach budów jest z reguły pusto wykonywane są jedynie roboty wewnętrzne w ogrzewanych budynkach a na zewnątrz na placu budowy widać jedynie stróża



Wpływ sezonowości w branży budowlanej widoczna jest również w przypadku mniejszych inwestycji np. w zakresie budownictwa mieszkaniowego jednorodzinnego

W ostatnich latach zimy nie były aż tak mroźne jak w przeszłości ale gwałtowne zmiany obniżenia temperatury powodowały iż rozpoczęte prace trzeba było wstrzymać. Wszelkie prace remontowe zimą są również bardzo mocno utrudnione, a przeprowadzane na zewnątrz budynków bardzo często muszą być wręcz wstrzymywane niemożliwe dla procesów w toku takich jak np. twardniejąca mieszanka betonowa co niesie ryzyko uszkodzenia elementu we wczesnej fazie twardnienia betonu.

Sezonowość w funkcjonowaniu przedsiębiorstw budowlanych

Zaprzestanie robót bardzo mocno utrudnia funkcjonowanie firm budowlanych powoduje problemy z utrzymaniem stałej kadry oraz przede wszystkim brak ciągłości uzyskiwanych dochodów. Sezonowość w branży budowlanej organizacyjnie niesie ze sobą ogromną niepewność towarzysząca każdej zimie i oczekiwanie na jej zakończenie.

Brak ciągłości uzyskiwanych dochodów zwłaszcza w okresie zimowym wymaga takiego gospodarowania środkami finansowymi, ażeby pieniędzy zarobionych w okresie prosperity wystarczyło również na zimowy okres przestoju.

Sezonowość na rynku pracowniczym

Jeszcze gorzej aniżeli właściciele firm budowlanych mają się ich pracownicy. W okresie zimowym w czasie obniżonej temperatury w większości przypadków dla pracowników wiąże się z koniecznością wzięcia bezpłatnych urlopów. Pracownicy w branży budowlanej są wręcz zmuszeni brać urlopy w okresie zimowym, ponieważ w letnim jest tak dużo pracy, żeby nie mogą sobie pozwolić na urlop.

Na szczęście na ratunek większości problemów związanych z realizacją robót w okresie zimowym dla branży budowlanej naprzeciw wychodzą coraz to nowsze technologie prac budowlanych. Dzisiaj jest coraz więcej rozwiązań technologiczno-materiałowych umożliwiających wykonywanie robót w okresie obniżonej temperatur, ale na znaczne obniżenia temperatury $<-15^{\circ}\text{C}$ nie ma jeszcze żadnego ratunku.



Rozdział 5. Opis proponowanego systemu doradczego

5.1. Proponowany system doradczy

Podstawy teoretyczne (model etapowego podejmowania decyzji – podejście elastyczne)

Wielopoziomowe planowanie i monitorowanie procesu betonowania i jego dojrzewania w czasie rzeczywistym bazujące na zastosowaniu czujników temperatury oraz zbieraniu i przetwarzaniu danych z zastosowaniem komunikacji bezprzewodowej oraz internetu.

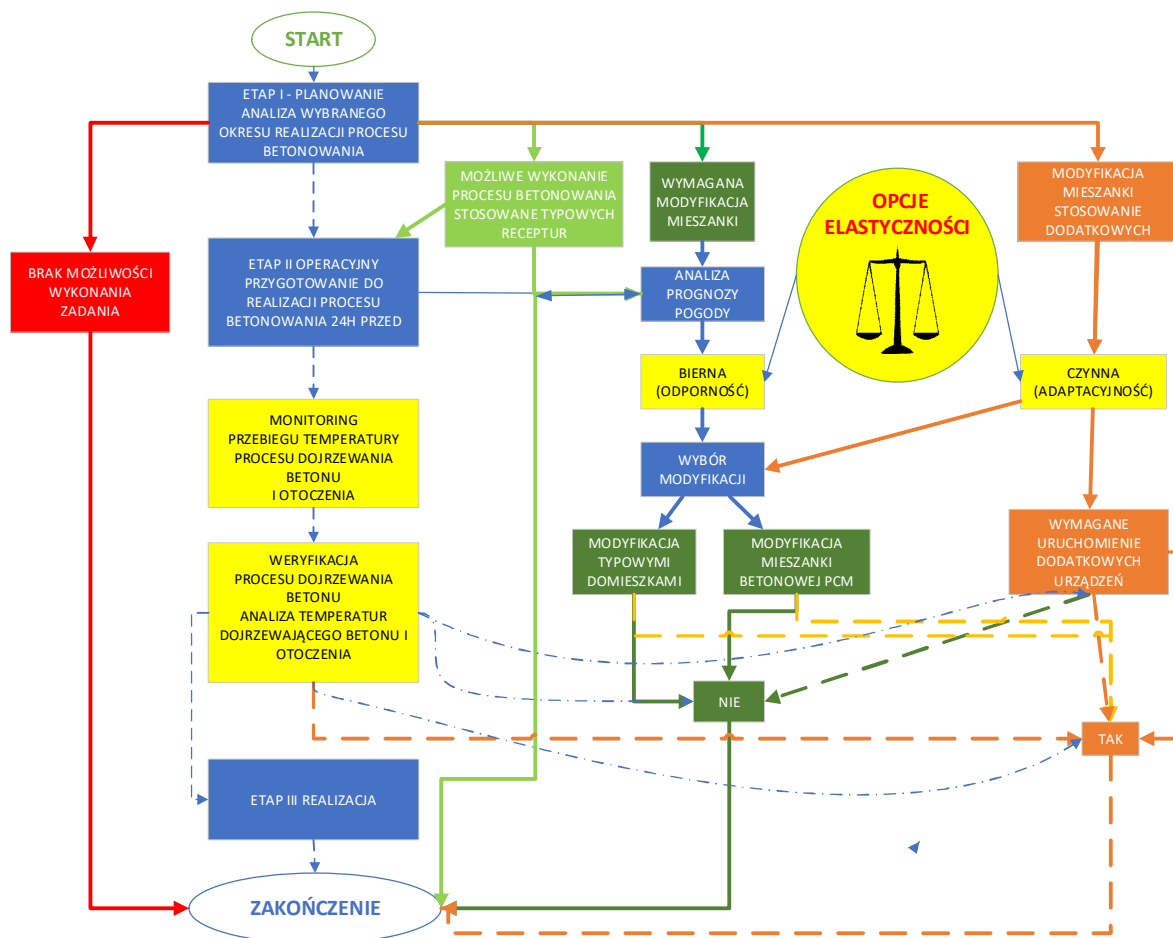
Budowa modeli samouczących się opartych na programie RapidMiner ma na celu zapewnianie wyboru racjonalnego elastycznego rozwiązania w celu prawidłowego wykonania procesu betonowania

Praktyczne zastosowanie idei elastyczności podczas realizacji procesów budowlanych umożliwia dostosowanie do zmiennych warunków realizacji procesów budowlanych poprzez stworzenie różnych opcji technologicznych.

Elastyczność technologiczna będąca podstawą tego systemu oraz procesu betonowania opiera się na stosowaniu domieszek i dodatków do betonu oraz stosowaniu dodatkowych urządzeń (np. elektronagrzew), co zapewnia odporność na szkodliwe działanie obniżonej temperatury przy założeniu jej krótkotrwałego działania.

Zastosowanie oprogramowania Rapid Minner ułatwia wybór optymalnego rozwiązania poprzez tworzenie drzew i tablic decyzyjnych proponowanych rozwiązań dla prognozowanych warunków wykonania, a poprzez ciągłe aktualizowanie bazy rozwiązań oraz wykorzystywanie somouczenia się na przykładach pozwala na ciągłe udoskonalanie prezentowanego systemu

Rysunek 5.1. Schemat podejścia elastycznego opartego na monitoringu w czasie rzeczywistym



5.2. Idea systemu

Celem systemu minimalizacją poziomu ryzyka realizacji procesów związanych z układaniem mieszanki betonowej na zewnątrz przy ograniczeniu możliwości zabezpieczenia/ostonienia przed wpływem otoczenia - w warunkach zależnych od oddziaływania czynników zewnętrznych takich jak spadek temperatury poniżej 0°C.

Wielopoziomowe podejście przy podejmowaniu decyzji technologicznych na trzech poziomach:

- od planowania procesu betonowania przy uwzględnieniu danych klimatycznych,
- dobór odpowiedniej modyfikacji betonu w oparciu o stan aktualny otoczenia i prognozę przed betonowaniem
- monitorowanie procesu dojrzewania betonu (ewentualne uruchomienie – w przypadku zagrożenia - taktyk elastyczności czynnej)

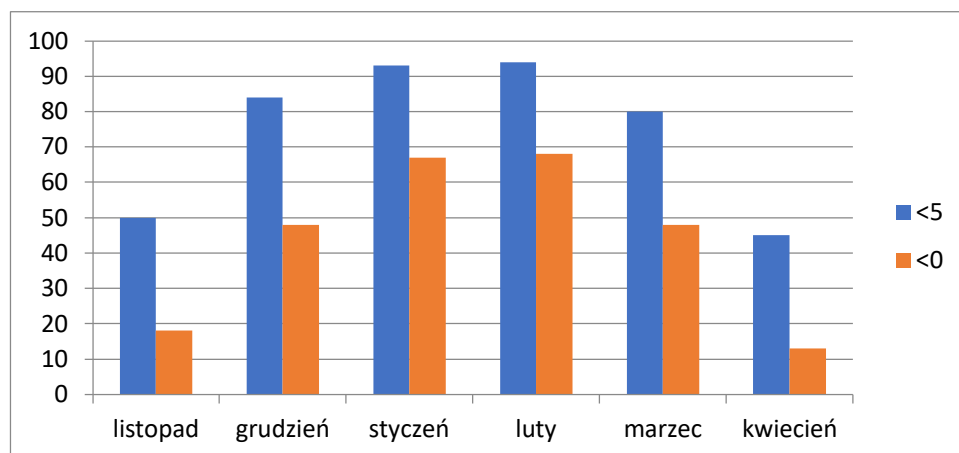
Wykorzystanie elastyczności technologicznej czynnej (adaptacyjność) i biernej (odporność) umożliwia zapewnienie osiągnięcia prawidłowej dynamiki procesu dojrzewania betonu pomimo utrudnień

5.3. Opis poziomu i – przygotowanie harmonogramu ogólnego

- Planowanie związane jest z określeniem przedziałów czasowych w zakresie których planowane zadanie:
 - - 1 maja do 30 września - bez większych zakłóceń
 - - 1 października do 30 kwietnia - możliwe zakłócenia oraz mogą wystąpić liczne przedziały czasowe w których realizacja nie będzie możliwa oraz dla prawidłowego przebiegu procesu betonowania będą niezbędne modyfikacje mieszanki betonowej oraz użycie dodatkowych modyfikatorów betonu w postaci PCM (lub innych) oraz urządzenia w postaci np. elektro-nagrzewu lub stosowanie deskowań specjalnych z opcją nagrzewu
- Zasadniczym celem podejmowania decyzji na tym etapie jest określenie najbardziej sprzyjającego okresu realizacji danego procesu budowlanego, bądź – w przypadku – znajomości czynników niesprzyjających (utrudniających) podjęcie działań ograniczających ich oddziaływanie

Mając na uwadze powyższe stwierdzić należy iż istotnym elementem jest aspekt sezonowości w robotach budowlanych, który podyktowany był głównie występowaniem temperatur poniżej 0°C, co przedstawiono na rysunku poniżej

Średnio w ciągu ostatnich 50 lat liczba dni z temperaturą <0°C waha się między 60-80 dni w roku



Rysunek 5.2. Wykres www.IMGW.pl

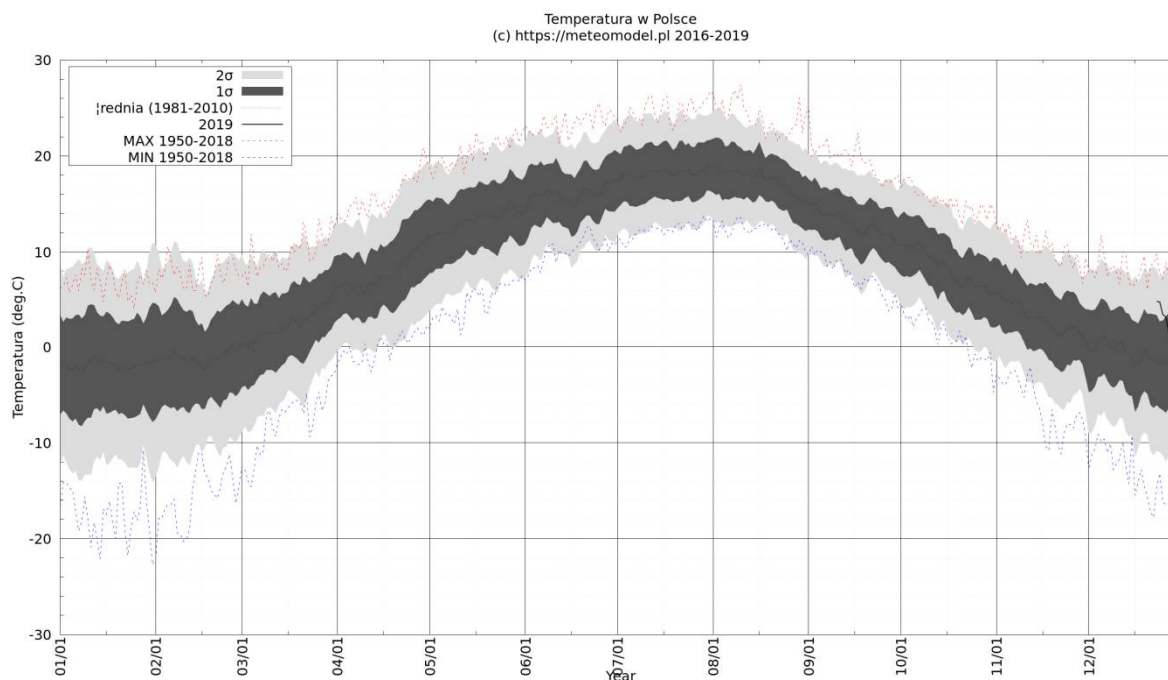
urlopów. Pracownicy w branży budowlanej są wręcz zmuszeni brać urlopy w okresie zimowym, ponieważ w letnim jest tak dużo pracy, żeby nie mogą sobie pozwolić na urlop.

Na szczęście na ratunek większości problemów związanych z realizacją robót w okresie zimowym dla branży budowlanej naprzeciw wychodzą coraz to nowsze technologie prac budowlanych. Dzisiaj jest coraz więcej rozwiązań technologiczno-materiałowych umożliwiających wykonywanie robót w okresie obniżonej temperatury, ale na znaczne obniżenia temperatury $< -15^{\circ}\text{C}$ nie ma jeszcze żadnego ratunku.

Analiza średnich wieloletnich wartości temperatury

Analizując wyraźne tendencje wzrostowe średnich temperatury w okresie ostatnich 40 lat stwierdzić należy iż uśrednione wartości zanotowane w przeszłym wieloleciu nie mogą stanowić podstawy do bieżących analiz klimatycznych. Wobec tego niezbędne jest wprowadzenie prognostycznych czynników korekcyjnych związanych z powolnym ocieplaniem klimatu ok $0,3^{\circ}\text{C}$ na dekadę. Mimo iż tendencja temperatury jest wzrostowa to ilość dni z temperaturą poniżej 0°C aż tak nie maleje. W związku z tym analiza średnich temperatur zwłaszcza tych poniżej 0°C oraz okresów w których występują znaczne spadki temperatury jest istotne z punktu widzenia realizacji inwestycji w warunkach obniżonej temperatury.

wykres średnich temperatur w Polsce w latach 2016-2019



Rysunek 5.3. Okresy sprzyjające i niesprzyjające realizacji procesów betonowania



Jak przedstawiono na wykresie powyżej istotna jest nie tylko średnia temperatura ale także zakres możliwych zmian wartości temperatur w przedziałach $\pm 1\sigma$ i 2σ . Ma olbrzymie znaczenie przy planowaniu robót w okresie obniżonej temperatury. Przedział możliwych temperatur w poszczególnych okresach może skutkować znacznymi obniżeniami i przyrostami i tak dla 1σ zmienia się $\Delta 10^{\circ}\text{C}$ i $2\sigma \Delta 20^{\circ}\text{C}$.

W związku z powyższym bardzo istotnym elementem w tym przypadku jest aktualna prognoza pogody którą należy na bieżąco weryfikować oraz analizować gdyż jej sprawdzalność maleje wraz ze wzrostem długości okresu dla jakiego jest wyliczona, i tak średnio wynosi:

do 24h sprawdzalność ok 95%

dla 48h sprawdzalność ok 75%

dla 72h sprawdzalność ok 60%

W okresie sprzyjającym (od maja do września) głównym zagrożeniem dla robót monolitycznych mogą być długotrwałe i intensywne opady deszczu (incydentalnie zdarzały się opady śniegu) i ewentualne przymrozki w maju.

W okresie od października do kwietnia kiedy to trzeba się liczyć z możliwością wystąpienia obniżonej temperatury największym problemem jest sytuacja kiedy w dniu rozpoczęcia robót monolitycznych warunki były sprzyjające a nagle w ciągu doby dochodzi do znacznego obniżenia temperatury poniżej 0°C przy amplitudzie dobowej ok 20°C .

5.4. Podsumowanie etapu I

Reasumując powyższe stwierdzić należy, iż istotnym elementem dla realizacji robót w obniżonej temperaturze jest bieżąca aktualizacja prognozy pogody oraz monitoring temperatury wewnątrz twardniejącej mieszanki betonowej i jej otoczenia.

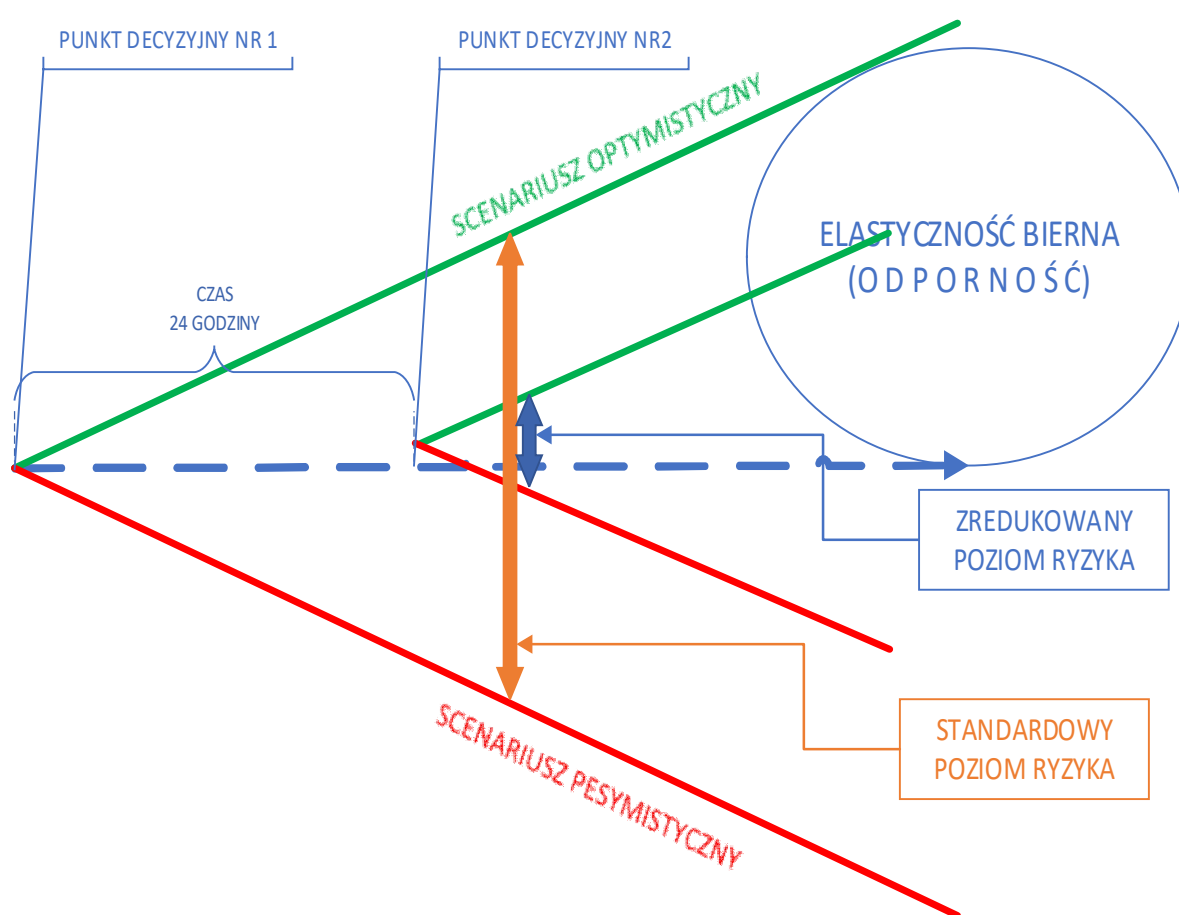
W przypadku planowania w okresie sprzyjającym i stnienia możliwości przesunięcia terminu betonowania należy przeanalizować współczynniki sezonowości i betonowania !!!

W przypadku braku takiej możliwości należy podjąć odpowiednie działania w celu zmniejszenia ryzyka (programowanie skutecznych modyfikacji mieszanki betonowej, zastosowanie deskowań z opcją podgrzewu itp.)

5.5. Opis poziomu II

Przygotowanie do realizacji procesu betonowania bezpośrednio przed planowaną datą wykonania oparte na podstawie prognozy pogody krótkoterminowej i doboru odpowiedniej modyfikacji mieszanki betonowej oraz betonowanie.

- Opracowanie tablic decyzyjnych w celu doboru modyfikacji mieszanki betonowej w zależności od temperatury otoczenia aktualnej oraz prognozowanej w dniu wykonania procesu betonowania na okres najbliższych 24/48 h. Prawidłowy dobór opcji technologicznej przy betonowaniu w tym okresie zapewni osiągnięcie wytrzymałości mrozowej dojrzewającego betonu (5-10 MPa) dla scenariusza optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego (elastyczność bierna – ODPORNOŚĆ).



Rysunek 5.4 Schemat Poziomu nr 2 Operacyjnego

Na podstawie aktualnego stanu pogody i prognozy krótkoterminowej (48h) menadżer działa w oparciu o tablicę decyzyjną opartą o naukę z przykładów. Przykładową tablicę zastosowaną na tym etapie przedstawia rys. 55



Działania systemu COLCON na tym poziomie bazuje na wykorzystaniu elastyczności biernej (odporności). Dzięki zastosowaniu modyfikatorów mieszanki betonowej możliwe jest osiągnięcie wytrzymałości mrozowej w ciągu 24/48h.

Ideą działania systemu na poziomie II ilustruje rys. 5,4

Działania na poziomie II dotyczą zaistnienia scenariusza optymistycznego i najbardziej prawdopodobnego. Zastosowanie dodatku- modyfikacji PCM (Phase Change Material) poszerza zakres działania na poziomie II (adaptacyjność)

5.6. Podsumowanie poziomu II

Mając na uwadze powyższe stwierdzić należy, iż weryfikacja przyjętego scenariusza wraz z analizą aktualnej prognozy pogody pozwala stwierdzić czy przyjęty scenariusz wykonania procesu betonowania jest realny do wykonania. Jeżeli przyjęte założenia są adekwatne dla aktualnej prognozy oraz stanu parametrów warunków atmosferycznych można uznać i mamy do czynienia se scenariuszem optymistycznym.

Mimo, iż obecny na tym etapie stan wiedzy wydają się być wystarczający należy pamiętać by w dynamicznie zmiennym otoczeniu należy na bieżąco- w czasie rzeczywistym monitorować zgodność założonych -prognozowanych warunków atmosferycznym z rzeczywistymi odczytami temperatury we wczesnej fazie dojrzewania mieszanki betonowej w obniżonej temperaturze.

5.7. Opis poziomu III

Poziom III – monitoring procesu dojrzewania betonu

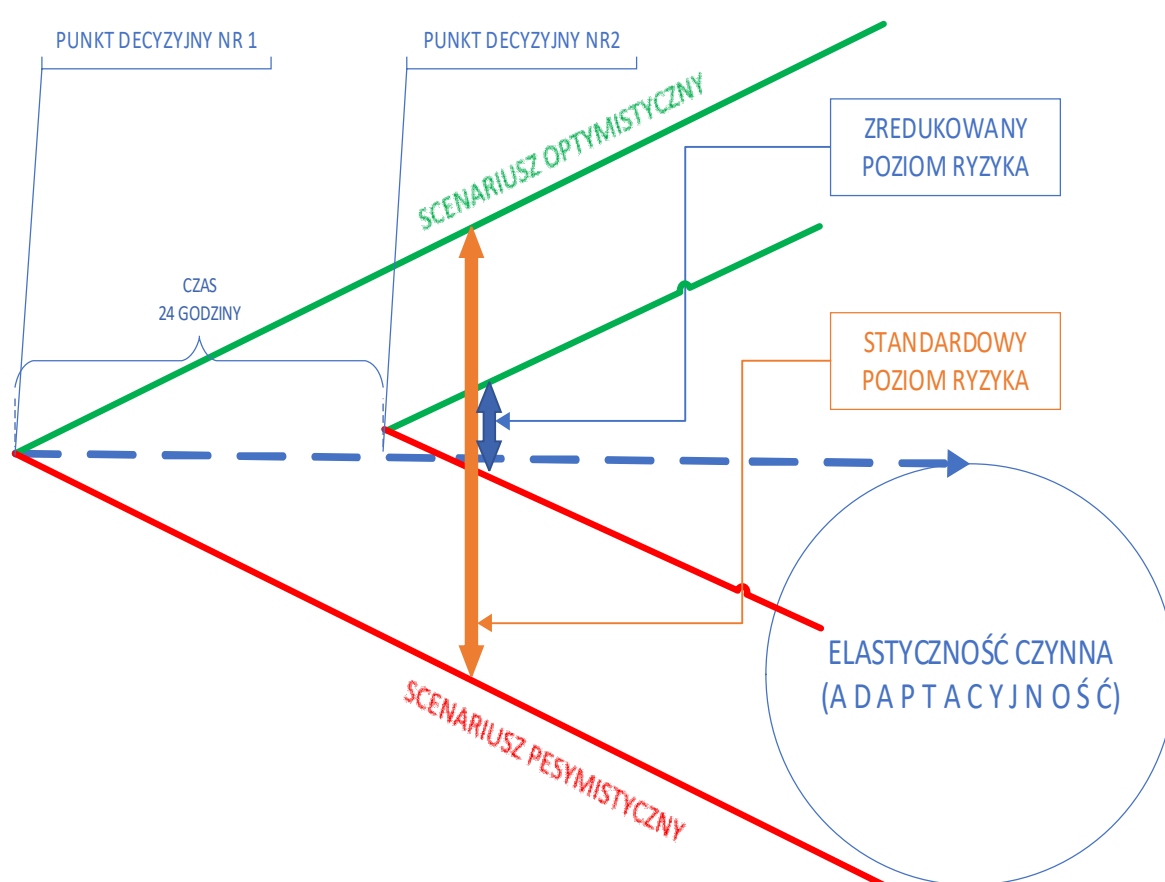
Jeżeli od czasu podjęcia decyzji o realizacji procesu betonowania przyjęte parametry wartości temperatur w czasie nie różnią od wartości rzeczywistych to mimo to należy przez okres min 72h monitorować proces dojrzewania mieszanki betonowej by uzyskała odporność mrozową. W przypadku nagłej lub znacznej niekorzystnej zmiany -obniżeniu temperatury należy uruchomić jedną z zaplanowanych elementów elastyczności czynnej – czyli adaptacyjności przez użycie: elektro nagrzewu , czy podgrzewanych deskowań.

W związku z powyższym należy w czasie rzeczywistym monitorować przebieg zmian temperatury, by w trakcie pogorszenia warunków dojrzewania mieszanki betonowej poprzez zastosowanie elastyczności czynnej - adaptacyjności doprowadzić zakończenia procesu betonowania z sukcesem.

W trakcie testowania systemu przy realizacji procesu betonowania zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i na budowie testowano różne sposoby dodatkowego zabezpieczenia mieszanki betonowej.

W przypadku zaistnienia ryzyka scenariusza pesymistycznego przewidziano specjalne działania w ramach zastosowania elastyczności:

- czynnej (adaptacyjności): podgrzewane deskowanie, uruchomienie nagrzewu.
- elastyczności pasywnej (odporności)- modyfikacji PCM



Rysunek 5.6 Schemat systemu COLCON na poziomie 3

5.8. Podsumowanie poziomu III

Działania w systemie ColCON na poziomie III dotyczą zaistnienia scenariusza pesymistycznego wykraczającego poza odporność bierną, co przedstawiono na rysunku powyżej.



Działania na tym poziomie opierają się na podjęciu specjalnych działań gwarantujących osiągnięcie zakładanych rezultatów w przypadku zagrożenia uszkodzenia struktury dojrzewającego betonu ze względu na obniżenie temperatury otoczenia poniżej wartości prognozowanej na poziomie II

Ciągły monitoring temperatury wewnątrz elementu betonowego oraz otoczenia umożliwia przewidywanie zagrożeń uszkodzenia struktury betonu (w oparciu o model MES oraz wiarygodną prognozę, (która nie zmienia się w stosunku do prognozy przyjętej na poziomie II)

Zaistnienie warunków znacznie poniżej prognozowanych i oczekiwanych oznacza to pogorszenie warunków dojrzewania a w najgorszym przypadku zagrożenie trwało uszkodzenia struktury twardniejącego elementu. Odpowiedzią na taki stan jest zastosowania elastyczności czynnej – adaptacyjności w postaci np. elektro nagrzewu.

5.9. Algorytm – etapowanie podejmowania decyzji

Podstawa opracowania algorytmu postępowania oraz weryfikacji optymalizacji modelu – przyjętego rozwiązania wieloetapowego podejmowania decyzji w otoczeniu rozmytym (zmiennym otoczeniu).

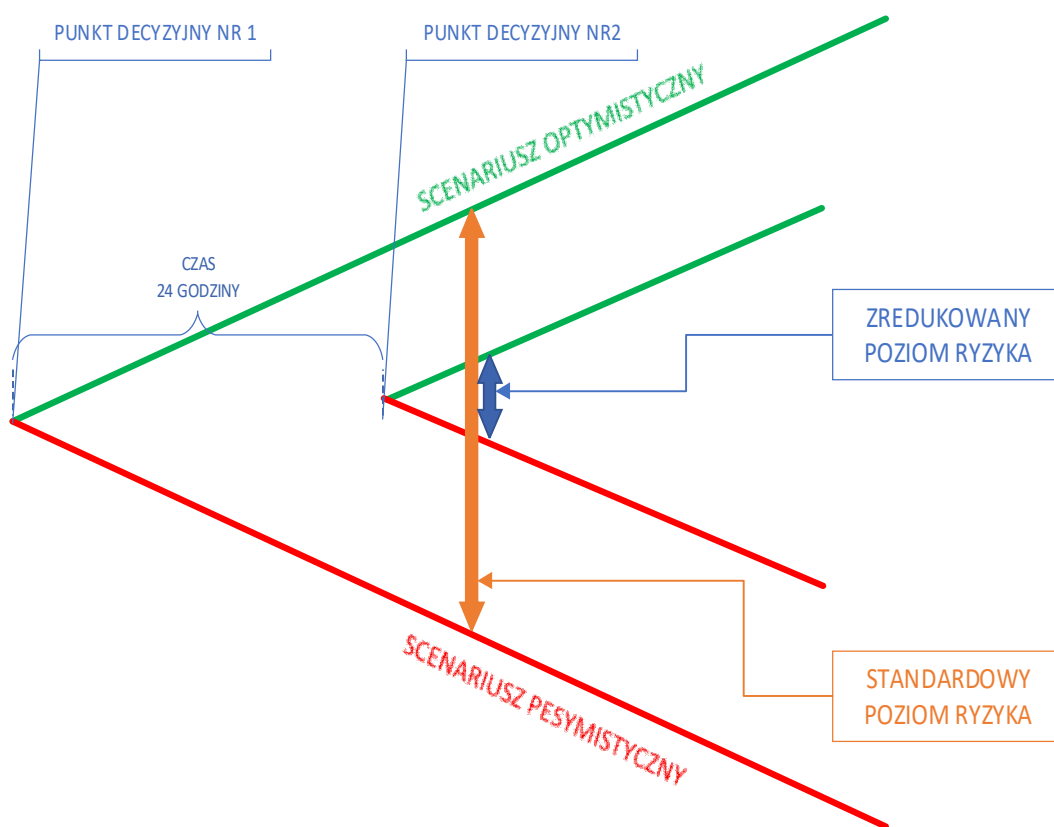
Etapowanie podejmowania decyzji - Hierarchiczny system doradczy - umożliwia:

- 1) identyfikację współczynnika sezonowości w danym okresie (jeżeli jest bliski 1, to OK, ale przy współczynniku 0,5 należy się liczyć z realnym ryzykiem strat - to nie ma miejsca na niefrasobliwą wiarę, że "będzie dobrze". Wymaga to zastosowania specjalnych procedur - zastosowania podejścia elastycznego
- 2) identyfikacja sytuacji decyzyjnej - podjęcie decyzji w oparciu o elastyczność bierną - receptura mieszanki zapewniająca osiągnięcie zakładanych efektów dla scenariusza najbardziej prawdopodobnego i optymistycznego
- 3) możliwość korekty decyzji - zastosowanie elastyczności czynnej - adaptacyjności - w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego zastosowanie podgrzewanego deskowania, nagrzew elementu itp.

Należy podkreślić, że opisywana sytuacja decyzyjna dotyczy nie warunków zimowych, ale ma zastosowanie w okresie przejściowym, kiedy we dnie warunki są sprzyjające, a w nocy - groźnym zjawiskiem są spadki temperatury otoczenia, a ze względu na nagły charakter zjawiska, typowe domieszki nie zapewnią oczekiwanej jakości betonu w konstrukcji.

5.10. Istota wieloetapowego podejmowania decyzji

Wykorzystanie teorii wieloetapowych procesów decyzyjnych wraz z analizą drzew decyzyjnych oraz algorytmu Random Forest pozwala na odpowiednie zaplanowanie oraz wykonanie procesu betonowania z minimalizacją ryzyka niepowodzenia. Prawdopodobieństwo zaistnienia poszczególnych stanów oszacowałem przede wszystkim na podstawie wyników badań laboratoryjnych i terenowych. Zebranie danych – informacji o stanach natury oraz przebiegu zmian temperatury w dojrzewającej mieszance betonowej w postaci reguł decyzyjnych (drzew decyzyjnych) oraz alfortytmu Random Rorest pozwala na optymalizację – kroków – etapów podejmowania decyzji w kolejnych punktach. Wieloetapowe podejmowanie decyzji umożliwia ograniczenie ryzyka niepowodzenia oraz minimalizację kosztów związanych z wykonaniem procesu betonowania. Znajomość prawidłowego przebiegu proceu betnowania oraz monitoring online poprzez zastosowanie narzędzi w postaci elastyczności biernej i czynnej pozwala na redukcję ryzyka przez korekty decyzji w trakcie realizacji.

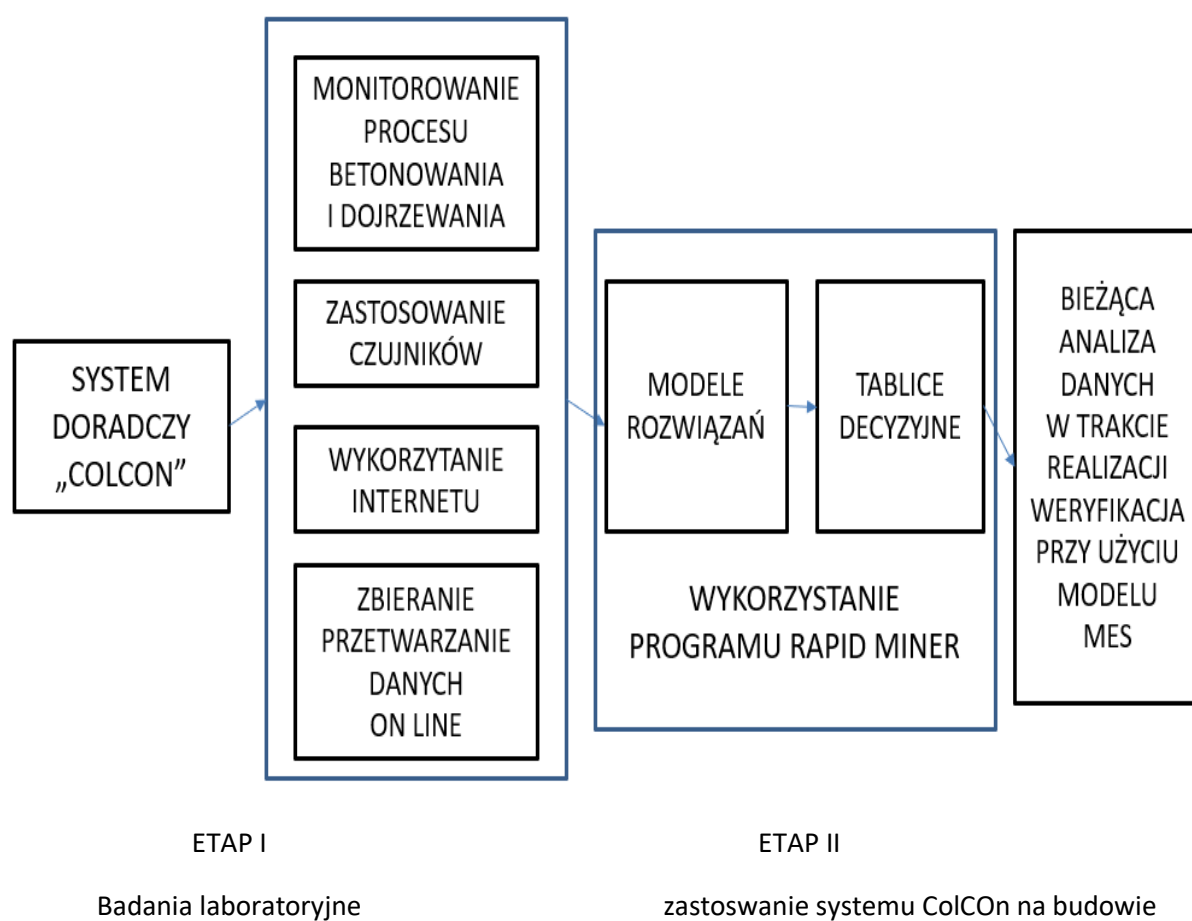


Rysunek 5.7 Ogólna idea zastosowania elastyczności w metodzie ColCON

Rozdział 6. System Doradczy COLCON

System „ColCon” (COLD CONCRETING) – hierarchiczny system podejmowania decyzji technologicznych na trzech poziomach. Przedmiotowy system związany jest z minimalizacją poziomu ryzyka realizacji procesów związanych z układaniem i dojrzewaniem mieszanki betonowej na zewnątrz w warunkach obniżonej temperatury

SYSTEM DORADCZY „COLCON”



Rysunek 6.1. Schemat systemu ColCon



6.1. Przegląd współczesnych technik i urządzeń pomiarowych.

W Polsce jak i na świecie istnieje wiele urządzeń służących do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu np. (Kiernożycki, 2003) (Czkwianianc 2002), (Godyski-Ćwirko Kiernożycki 2000), (Witakowski 2002), Witakowski 2003). Na szczególną uwagę zasługuje skomputeryzowany system pomiaru temperatury SPT-GSM-GPS, opracowany i wykorzystywany przez P. Witakowskiego w Zakładzie Betonu ITB. System może działać zarówno w trybie on-line, jak i off-line umożliwiającym prowadzenie pomiarów w sposób ciągły. Moduł pomiarowy składa się z sondy, rejestratora, modemu GSM i odbiornika GPS. Wyniki z wykonanych pomiarów przekazywane są poprzez sieć GSM do komputera jednostki badawczej, odpowiadającej za monitorowanie robót budowlanych. Dzięki temu możliwe jest stałe monitorowanie temperatury, oraz prowadzenie badań na wielu budowach jednocześnie, teoretycznie niezależnie gdzie się one znajdują. Dodatkową zaletą systemu jest możliwość instalacji sondy w dowolnym czasie w praktycznie każdym miejscu konstrukcji i wyjęcia w dowolnym czasie celem użycia w innym miejscu, oraz niezależność od panujących warunków atmosferycznych jak opady deszczu czy śniegu. System sond ma ograniczenia związane z jego instalacją oraz jest podatny na uszkodzenia natomiast zaletą jest możliwe jego wielokrotne wykorzystanie. System ten był wykorzystywany do monitorowania wielu bardzo ważnych konstrukcji mostowych, między innymi przy Moście Świętokrzyskim, Siekierkowskim oraz Tunelu Wisłostrady w Warszawie. Wdrożony przez Zakład Betonu ITB system zdalnego monitorowania konstrukcji, stanowi bardzo ważny czynnik służący zapobieganiu uszkodzeniom konstrukcji podczas betonowania i dojrzewania głównie elementów masywnych.

Czkwianianc i inni, Pawica, Maćkowiak, Saferna (2002) do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu wykorzystują półprzewodnikowe czujniki typ LM35D firmy National Semiconductor. Natomiast Gotycki-Ćwirko, Kiernożycki, (Wojdak 2000) do pomiaru temperatury wewnętrznej dojrzewającego betonu wykorzystują platynowe czujniki rezystancyjne podłączone do zestawu pomiarowego. Technika pomiaru dla obydwu przypadków polega na umieszczeniu czujników wewnątrz elementu, jeszcze przed jego betonowaniem. Po zakończeniu procesu betonowania – w zakresie układania mieszanki betonowej rozpoczynany jest pomiar zmian temperatury. W niektórych krajach np. w Niemczech wg eurokodu wymaga się rejestracji pomiaru temperatury dojrzewającego betonu.

Większość obecnie stosowanych w Polsce np. Czkwianianc Pawica, Maćkowiak, Saferna (2002) rozwiązań technicznych dotyczących pomiaru temperatury opiera się na tej samej zasadzie, czyli umieszczeniu jeszcze przed betonowaniem czujnika termicznego lub termopary we wcześniej wybranym miejscu konstrukcji. Pomiar temperatury przeprowadzany jest przy wykorzystaniu zestawu



pomiarowego np. UPM 60 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik, SmartRock oraz innych o podobnej zasadzie działania przy wykorzystaniu połączeń przewodowych lub bezprzewodowych.

6.2. Cel i zakres badań własnych

W celu przeprowadzenia analizy wpływu zmian temperatury we wczesnej fazie dojrzewania betonu przeprowadzono szereg badań własnych mających na celu określenie istotnych parametrów w zakresie pomiaru zmian temperatury. Jednym z głównych a przede wszystkim istotnym czynników okazało się rozmieszczenie czujników w strukturze badanego elementu oraz przy jego powierzchni co umożliwiło określenie bezpośredniego wpływ oddziaływania środowiska oraz dało możliwość zweryfikowania wpływu gradientu temperatury.

W trakcie wykonywania wielu prac laboratoryjnych i terenowych umieszczano czujniki w różnych miejscach wewnątrz elementu i przy jego powierzchni oraz dodatkowo w różnych odległościach zależnych od wymiarów elementów.

Ponadto badania prowadzono w 3 typach komór chłodniczo klimatycznych poprzez wykonanie badań wstępnych oraz planowanych, dzięki czemu udało się uwzględnić pracę komory i jej wpływ na odzwierciedlenie rzeczywistych warunków klimatycznych.

Badania te wykazały, iż istotnym elementem w trakcie badań laboratoryjnych jest zależność wymiarów objętości - wielkości poszczególnych elementów tak by układ klimatyzacji komory mógł pracować w zakresie zadanych parametrów a odległości między elementami nie zaburzały rzeczywisty wyników przebiegu zmian temperatury. Po analizie badań okazało się iż objętość analizowanych elementów nie może przekraczać 30-50% objętości komory, gdyż przekroczenie tych wielkości powodowało zaburzenia w pracy agregatu komory klimatycznej i skutkowało zmianą ustalonego przebiegu ustalonego cyklu krzywej dobowej temperatury.

Badania terenowe w kilku przypadkach prowadzono z wykorzystaniem lokalnej stacji pogodowej Davis. Takie rozwiązanie dało możliwość rejestracji i analizy lokalnych warunków pogodowych w obrębie lokalizacji placu budowy i przede wszystkim pozwoliło porównać z prognozą pogody dla najbliższej lokalizacji w danym serwisie pogodowym. Po analizie zebranych danych okazało się iż otrzymane wyniki różniły się w zakresie 2-5°C (czy do tego ma być tabela w załączniku)



6.3. Opis zastosowanego sprzętu pomiarowego wykorzystywanego w systemie ColCon.

Pomiary temperatury wewnętrznej i otoczenia wykonano przy użyciu rezystorowych czujników temperatury typu PT100 oraz PT1000 (bezprowadowych lub przewodowych) umieszczonych bezpośrednio w wewnętrznej przestrzeni elementu betonowego przy jego powierzchni oraz otoczenia za pomocą zestawu pomiarowego składającego się z rejestratora oraz dodatkowo modułu -modemu GSM lub bezpośredniego połączenia z komputerem lub z modemem za pomocą sieci Ethernet.

W celu właściwego rozmieszczenia czujników w badanym elemencie, oraz dla zabezpieczenia ich przed uszkodzeniem w trakcie betonowania sprawdzano położenie czujników, czy zostały odpowiednio rozmieszczone na całej wysokości przekroju po 3 czujniki rezystorowe w każdej osi pomiarowej. Dodatkowo temperaturę zewnętrzną (powietrza i powierzchni elementu) mierzono termometrem elektronicznym ręcznym lub kamerą termowizyjną.

Temperaturę powierzchni zewnętrznej badanego elementu mierzono bezpośrednio przy powierzchni oraz na powierzchni elementu. Różnica w próbnym pomiarze temperatury między czujnikami rezystorowym a termometrem i kamerą termowizyjną wynosiła ok $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Natomiast odchyłka w pomiarze temperatury między czujnikami dochodziła do $\pm 1^{\circ}\text{C}$, co uznano za wystarczającą dokładność przeprowadzonych badań.

Podstawowym urządzeniem służącym monitorowania oraz zbierania danych w czasie rzeczywistym jest rejestrator danych oraz czujniki pomiaru temperatury. Poszczególne typy rejestratorów danych różnią się funkcjonalnością, ilością obsługiwanych czujników pomiarowych oraz metodą komunikacji – przesyłania danych. Poniżej omówiono zastosowany sprzęt pomiarowy.

Systemy przewodowe - rejestratory

Rejestrator elektroniczny Metronic MPI-G-16 współpracujący z modemem Osbridge

MPI-G jest szesnastokanałowym miernikiem sygnałów analogowych z elektroniczną rejestracją wyników na kartach MMC. Przyrząd przeznaczony jest do pomiaru procesów wolnozmiennych, w szczególności temperatur, a także innych wielkości fizycznych (wilgotność, ciśnienie, przepływ, itp.) przetworzonych na standardowy sygnał prądowy 0/4-20mA.



Rysunek 6.2. Rejestrator przewodowy MPI-G 16 kanałowy



Rysunek 6.3. Modem GSM Osbridge 3GN

Rejestrator elektroniczny KRT-806 GSM współpracujący z modemem Wavocom

Komputerowy 8 kanałowy rejestrator temperatury KRT-806 GSM jest przeznaczony do precyzyjnego pomiaru i rejestracji temperatury. Urządzenie pozwala na pomiar i rejestrację temperatury w zakresie od -90°C aż do $+300^{\circ}\text{C}$.



Rysunek 6.4. Rejestrator Geneza KRT-806 GSM 8 kanałowy przewodowy



Rysunek 6.5. Modem Gsm Wavocom

Systemy przewodowe – czujniki

Czujniki Pt100 i Pt1000

Czujnik Pt100 i Pt1000 to termometr rezystancyjny wykonany z platyny o odpowiedniej dla danego typu czujnika wartości oporu i charakteryzuje się rezystancją elektryczną, która zwiększa się wraz z temperaturą i dlatego określana jest jako PTC (dodatni współczynnik temperatury). Punkt pomiaru temperatury, chroniony osłoną termometryczną, najczęściej w postaci metalowej odpornej na uszkodzenia zewnętrzne.

Wartości oporów dla stosowanych czujników temperatury

- [Pt100](#) – opornik platynowy o wartości pomiarowej 100 Ω w 0 °C
- [Pt1000](#) – opornik platynowy o wartości pomiarowej 1000 Ω w 0 °C

Czujniki wykonane są najczęściej w wersji dwuprzewodowej, natomiast jeżeli konieczne jest wydłużenie standardowego przewodu lub mamy czujniki z przewodami o różnej długości dla zwiększenia dokładności pomiarów należy wykonać połączenia między czujnikiem a rejestratorem jako trójprzewodowe.



Rysunek 6.6. Czujniki przewodowe Pt100

Systemy bezprzewodowe - rejestratory

Rejestrator MonnitLink™

Rejestrator danych - odbiornik MonnitLink™ Ethernet umożliwia komunikację 50 bezprzewodowych czujników Monnit w obrębie kilku metrów. Rejestrator sieciowy MonnitLink™ wystarczy podłączyć Internetu poprzez kabel sieciowy z ruterem lub modemem GSM, aby połączyło się z serwerem producenta. Urządzenie buforuje do 16 000 informacji z czujników w swojej pamięci na wypadek przerwania połączenia internetowego. Gdy połączenie z internetem zostanie przywrócone dane z czujników zostaną automatycznie wysłane do serwera iMonnit lub lokalnego PC



Rysunek 6.7. Rejestrator Monnit link zbierający dane z czujników bezprzewodowych

Rejestrator iNode LAN/ iNode Care GSM

Rejestrator- bramka komunikacyjna do transferowania danych – odczytów temperatury za pomocą komunikacji – protokołu Bluetooth Low Energy z czujników iNode Beacon w odległości ok kilku maksymalnie 15m.

Urządzenia iNode oparte jest na układzie **ESP32** i programowane w języku **micro Python**. MCU GSM nie posiada określonej funkcjonalności, może on np. okresowo przysyłać dane w formacie binarnym z czujników Bluetooth na wskazany serwer HTTP. Moduł może być dowolnie zaprogramowany w języku microPython opartego na Python 3.4. Skrypty wgrywa się do urządzenia poprzez aplikację iNodePy współpracującą z urządzeniami Windows, Android oraz Linux, w środowisku przeglądarki Chrome lub Edge. Wyposażony został w ponad 2 MB pamięci RAM, ok. 4,7 MB pamięci wewnętrznej oraz takie interfejsy komunikacji bezprzewodowej jak **Bluetooth 4.1**, **WiFi** oraz **GSM**. Urządzenie zostało wyposażone także w sprzętowy watchdog. W urządzeniu można znaleźć slot na karty nano SIM oraz dwa złącza antenowe dla Bluetooth oraz GSM. Moduł zasilany jest poprzez port microUSB (**5 V / 1 A**). W zestawie znajdują się również dwie anteny SMA.



Rysunek 6.9. Bramka enernet systemu inode

Systemy bezprzewodowe – czujniki

Czujniki Inode

Czujniki bezprzewodowe zakres temperatur pracy i odczytu pracy: od -10 do 55 °C, zasilanie bateryjne 2032 wystarcza 22 dni przy odczytach co 10min i 266dni przy odczytach co 22 godziny.



Rysunek 6.8. Czujniki bezprzewodowe systemu Monnit

Czujniki iNode beacon

Czujniki iNode beacon przesyłają dane w standardzie BT4,0 zakres temperatur pracy i odczytu pracy: od -30 do 65 °C odległość ok 15m, czas działania na jednej baterii to ok 12 miesięcy.

Dodatkowo czujniki wyposażone są w pamięć wewnętrzną utrzymywaną przez zasilanie bateryjne.



Rysunek 6.10. iNode beacon – czujnik temperatury

Kamera termowizyjna

Kamera termowizyjna służy do wykrywania i pomiaru energii podczerwieni obiektów. Kamera przetwarza dane termograficzne w obraz elektroniczny w oparciu o różnice temperatur, na którym przedstawiona jest pozorna temperatura powierzchni kontrolowanego obiektu w postaci obrazu termograficznego.



Rysunek 6.11 Kamera termowizyjna VIGO do badania powierzchniowego dojrzewającej mieszanki betonowej

Stacja meteorologiczna

Stacja meteorologiczna Davis Vantage Pro2 to profesjonalna, bezprzewodowa stacja pogodowa renomowanej amerykańskiej firmy Davis Instruments, wyposażona w czujniki temperatury, wilgotności, ciśnienia, opadu oraz kierunku i prędkości wiatru.



Rysunek 6.12 Lokalna stacja pogodowa



6.4. Rozwój technik pomiarowych – rozbudowa systemu w przyszłości

W przyszłości planowane jest zwiększenie zakresu monitorowanych parametrów dojrzewającej mieszanki betonowej przez pomiar dodatkowych parametrów fizycznych. W czasie dojrzewania mieszanki betonowej należy docelowo przewidzieć pomiar i analizę innych zmiennych parametrów fizycznych takich jak np. wilgotność nasłonecznienie oraz skurcz.

W związku z powyższym systemy pomiarowy należałoby doposażyć w kolejne czujniki.

Zbieranie dodatkowych informacji umożliwi szerszą analizę parametrów oraz czynników wpływających na dojrzewanie mieszanki betonowej w zmiennym otoczeniu i przy obniżonej temperaturze.

Znajomości dodatkowych parametrów pozwoli doprecyzować warunki dojrzewania mieszanki betonowej dzięki czemu będziemy system doradczy będzie bardziej skuteczny co pozwoli zmniejszenie ryzyka związanego z realizacją procesów betonowych.

6.5. Zastosowane oprogramowanie

6.5.1. Omówienie dostępnych programów do analizy danych

Wybór oprogramowania do analizy danych oraz Narzędzia Data Mining

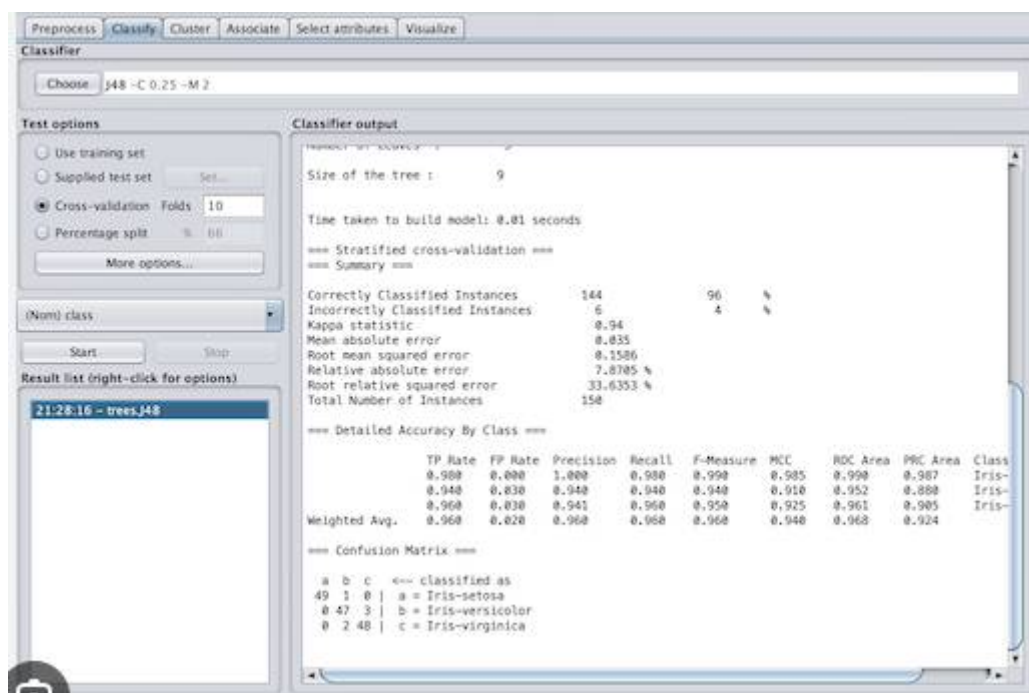
Istnieje wiele gotowych narzędzi do eksploracji i analizy danych. Na rynku jest dostępnych wiele narzędzi płatnych i bezpłatnych najczęściej o ograniczonej liczbie zmiennych. Poniżej przedstawione zostały krótkie opisy charakterystyki popularnych narzędzi, które są często wykorzystywane w eksploracji danych i wymienione w artykułach branżowych.

Weka

Weka (ang. Waikato Environment for Knowledge Analysis) to oprogramowanie stworzone przez uniwersytet Waikato udostępniające nie tylko graficzny interfejs użytkownika, ale również umożliwiające wykonywanie komend z linii poleceń oraz użycie we własnej aplikacji w formie biblioteki. Jest to rozwiązanie popularne i nagradzane za swoją użyteczność.

Program Weka przeznaczony jest dla doświadczonych użytkowników. Zapoznanie się z programem zdecydowanie ułatwi bogata baza danych przykładów dostępnych na stronie projektu, czy też dokumentacja. Istnieje również książka o eksploracji danych wykorzystująca w przykładach Wekę, ale nie jest ona dostępna w Internecie. Nie zmienia to jednak faktu, iż obsługa Weki wymaga sporo wiedzy z zakresu data mining oraz z samej konstrukcji tego oprogramowania.

Weka umożliwia pobranie danych z plików, czy też baz danych, wstępną ich obróbkę (np. normalizacja, dyskretyzacja), a następnie wykorzystanie ich do uczenia (np. algorytmy klasyfikacji, analizę skupień itd.). Za tą część odpowiedzialny jest moduł Weki o nazwie Explorer. Experimenter ułatwia porównywanie efektywność działania różnego rodzaju sposobów nauki. Natomiast KnowledgeFlow umożliwia zautomatyzowane przetwarzania danych z wielu źródeł i na różne sposoby poprzez skonstruowanie grafu opisującego przepływ danych.



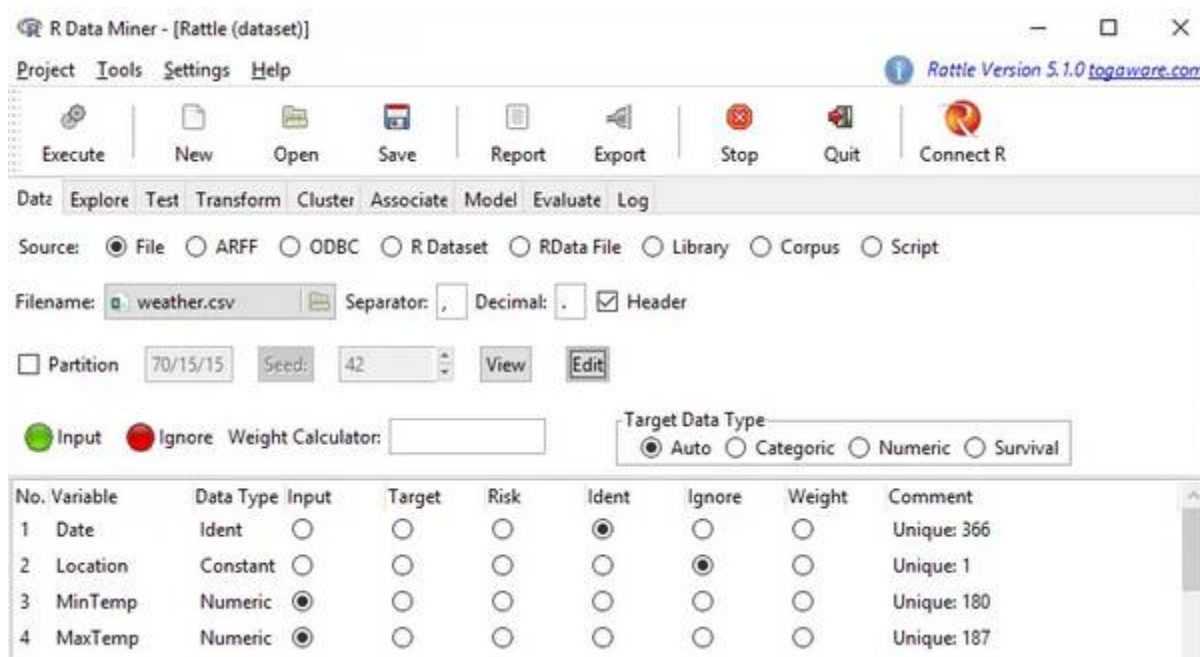
Rysunek 6.13. Widok okna dialogowego programu WEKA

Rattle

Rattle (ang. R Analytic Tool To Learn Easily) to wieloplatformowy program napisany z wykorzystaniem języka i środowiska R oparty o bibliotekę graficzną GTK 2, jest stosunkowo prosty w użyciu i nadaje się dla początkujących użytkowników. Udostępnia następujące techniki z zakresu modelowania:

- asocjacje z użyciem apriory (arules),
- klasyfikację z użyciem drzew decyzyjnych (rpart),
- uogólnione modele liniowe (glm),
- boosting (gbm),
- losowe lasy (randomForest).

Rattle jest wykorzystywany podczas codziennej pracy przez jeden z największych australijskich zespołów zajmujących się eksploracją danych, w Australijskim Urzędzie Skarbowym. W porównaniu do Weki, czy też RapidMinera, wydaje się być naprawdę prosty i stosunkowo ubogi w ilość zaimplementowanych algorytmów i funkcji.



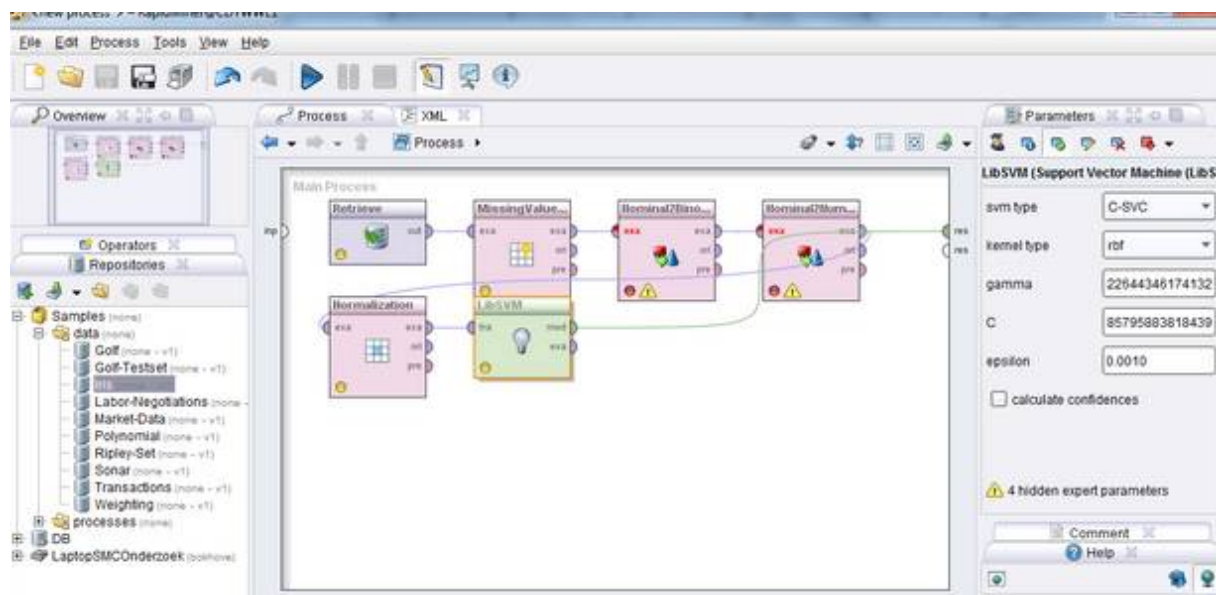
Rysunek 6.14. Widok okna dialogowego programu RATTLE

Rapid Miner Community Edition

RapidMiner Community Edition (znany kiedyś jako YALE) wykorzystuje m.in. wspomniane wcześniej oprogramowanie o nazwie Weka (nie jest jednak ono konieczne do poprawnego działania). Udostępnia ponad 500 operatorów (z czego 100 z aplikacji Weka) dla wszystkich głównych procedur maszynowego uczenia, włączając w to obsługę wejścia, wyjścia, przetwarzania danych oraz wizualizację. Podobnie, jak Weka, posiada on GUI oraz umożliwia wykonywanie komend z poziomu linii poleceń, udostępniając jednocześnie środowisko java API. Dodatkowo posiada własny system wtyczek.

RapidMiner zdecydowanie wygrywa z Weką i Rattle pod względem interfejsu użytkownika. Przyjazne ikony, dużo opisów, wszechobecne kreatory i wbudowany tutorial nie pozwalają użytkownikowi zagubić się w bogactwie opcji. W razie problemów pomocne okazać się może forum projektu na którym odpowiedzi udzielają sami jego twórcy oraz wiki, które jest niestety mocno niekompletne. Sam

program dodatkowo udostępnia dwa tryby działania - eksperta i początkującego. Jednakże bez względu na jakość wykonania interfejsu wymaga on przede wszystkim wiedzy na temat samego zagadnienia eksploracji danych. Oczywiście, RapidMiner pozwala na wszystko to, co Weka oraz na jeszcze więcej. Dzięki zastosowaniu XML-a i wygodnego edytora bez problemu można tworzyć łańcuchy i drzewa operatorów, źródeł danych i innych "bloków" składających się na program wykonywany przez RapidMinera.



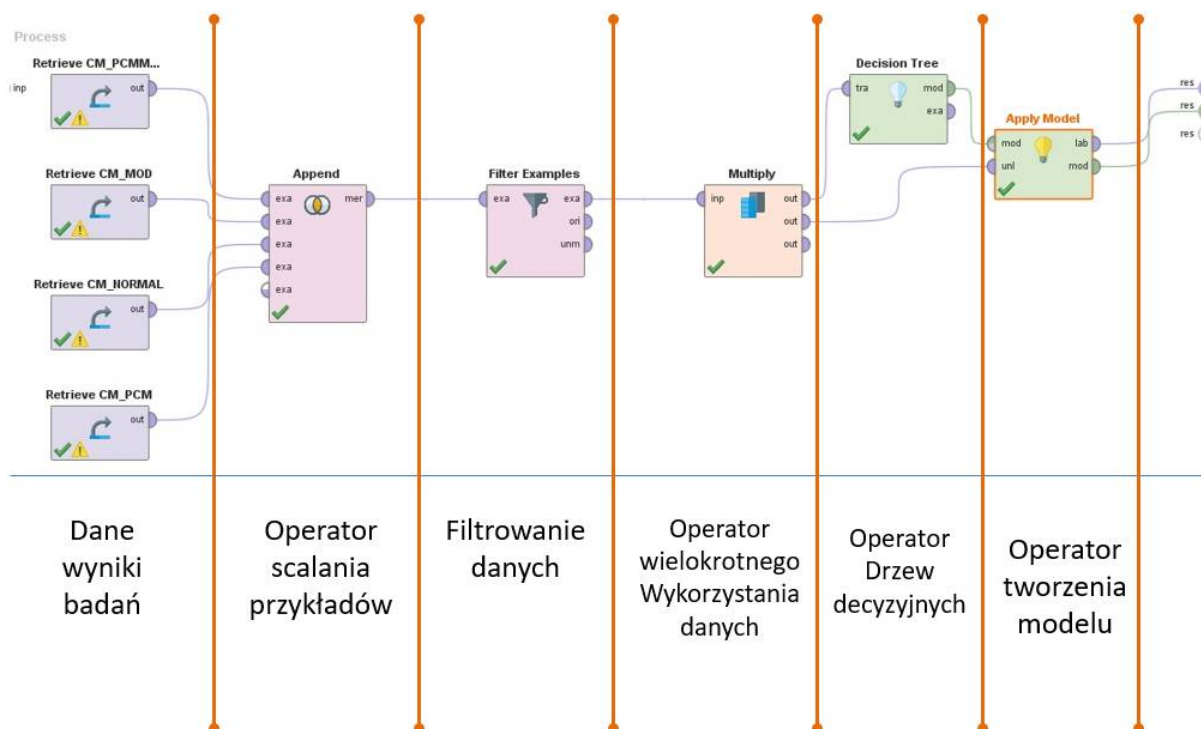
Rysunek 6.15. Widok okna dialogowego programu RapidMiner

Szczegółowe omówienie wybranego do analizy danych oprogramowania

RapidMiner jest środowiskiem do analizy danych oraz procesu eksploracji wyników. Możliwości wizualizacyjne oprogramowania obejmują m.in. generowanie histogramów, wykresów i macierzy rozrzutu, drzew decyzyjnych itp.

Machine Learning - RapidMiner

okno procesu



Rysunek 6.16. Schemat działania programu Rapid Miner

Dane wyniki badań

Program RapidMiner może czytać dane z baz danych MS SQL, Access, python, oraz z plików *.txt, *.xml i Programu MS Excel-*.xls. Dane mogą pochodzić z jednej bazy lub kilku baz oraz jednego lub wielu plików.

Operator scalania przykładów- wyników badań

Zastosowanie tego operatora umożliwi nam na potrzeby programy scalić wybrany zakres danych z bazy danych oraz plików.



Flirtowanie danych

Powyższy operator pozwala na wybór odpowiedniego zakresu danych do analizy – poszczególne przypadki, zastosowane mieszanki domieszki lub dodatki oraz inne np. zabezpieczenia mieszanki betonowej stosowanie elektro nagrzewu czy podgrzewanych deskowań.

Operator wielokrotnego wykorzystania danych

Pozwala to na losowanie danych ze zwracaniem lub losowanie z powtórzeniami – rodzaj wielokrotnego losowania, w którym powtarzane jest takie samo pojedyncze losowanie z tego samego zbioru możliwych wyników

Operator Drzew decyzyjnych

Podstawowy algorytm wykorzystywany w systemie COLCON do optymalizacji danych i tworzenia modelu i stopnia

Jako algorytm drugiego stopnia wykorzystywany był Random Forest, który po analizie predykcji okazał się bardziej skutecznym modelem.

Operator tworzenia modelu

Element programu umożliwiający prezentację otrzymanych wyników w postaci drzewa decyzyjnego w przypadku algorytmu Decision Tree oraz wielu drzew decyzyjnych w przypadku zastosowania Random Forest ale za to z lepszym klasyfikatorem co widać w macierzy predykcji.

Pozyskiwanie danych w czasie rzeczywistym

Zbieranie danych wyników badań laboratoryjnych a przede wszystkim terenowych w poszukiwaniu reguł decyzyjnych wspomagających podejmowanie decyzji przy betonowaniu w obniżonych temperaturach jest skomplikowane. Wymaga to instalacji znacznej ilości traconych czujników w celu pozyskania rozkładu temperatur oraz weryfikacji przebiegu zmian temperatur w strukturze wykonywanego elementu z mieszanki betonowej oraz wpływu zmian temperatury otoczenia. Proces ten jest pracochłonny, kosztowny, ale przede wszystkim jest niezbędny do przekraczania granic związanych w wykonywaniem elementów betonowych w warunkach obniżonej temperatury. Ilość rejestrowanych przypadków monitorowania zmian temperatury we wczesnym procesie dojrzewania mieszanki betonowej jest niewielka. Wynika to ze znacznych kosztów oraz niewielkiej popularności tych pomiarów będących następstwem przekonań o braku potrzeby ich wykonywania w środowisku inżynierów.



Analiza danych

Przeprowadzona pierwotna analiza danych oparta na zebranych ok 30 przypadkach pozwoliła na wyodrębnienie prostych czytelnych reguł decyzyjnych z zastosowaniem drzew decyzyjnych.

Kolejna szczegółowa analiza większej liczby przypadków ok 80 również z zastosowaniem drzew decyzyjnych ujawniła następujące wady:

- Przeuczenie się drzew decyzyjnych
- Znaczna ilość przypadków spowodowała iż otrzymane drzewa decyzyjne miały złożoną, mało czytelną i skomplikowaną strukturę o znacznej głębokości .

Poszukiwanie alternatyw

Do rozwiązania powyższych problemów skuteczne stało się wykorzystanie wielu drzew decyzyjnych przez zastosowanie algorytmu Random forest przy użyciu programu Rapidminer.

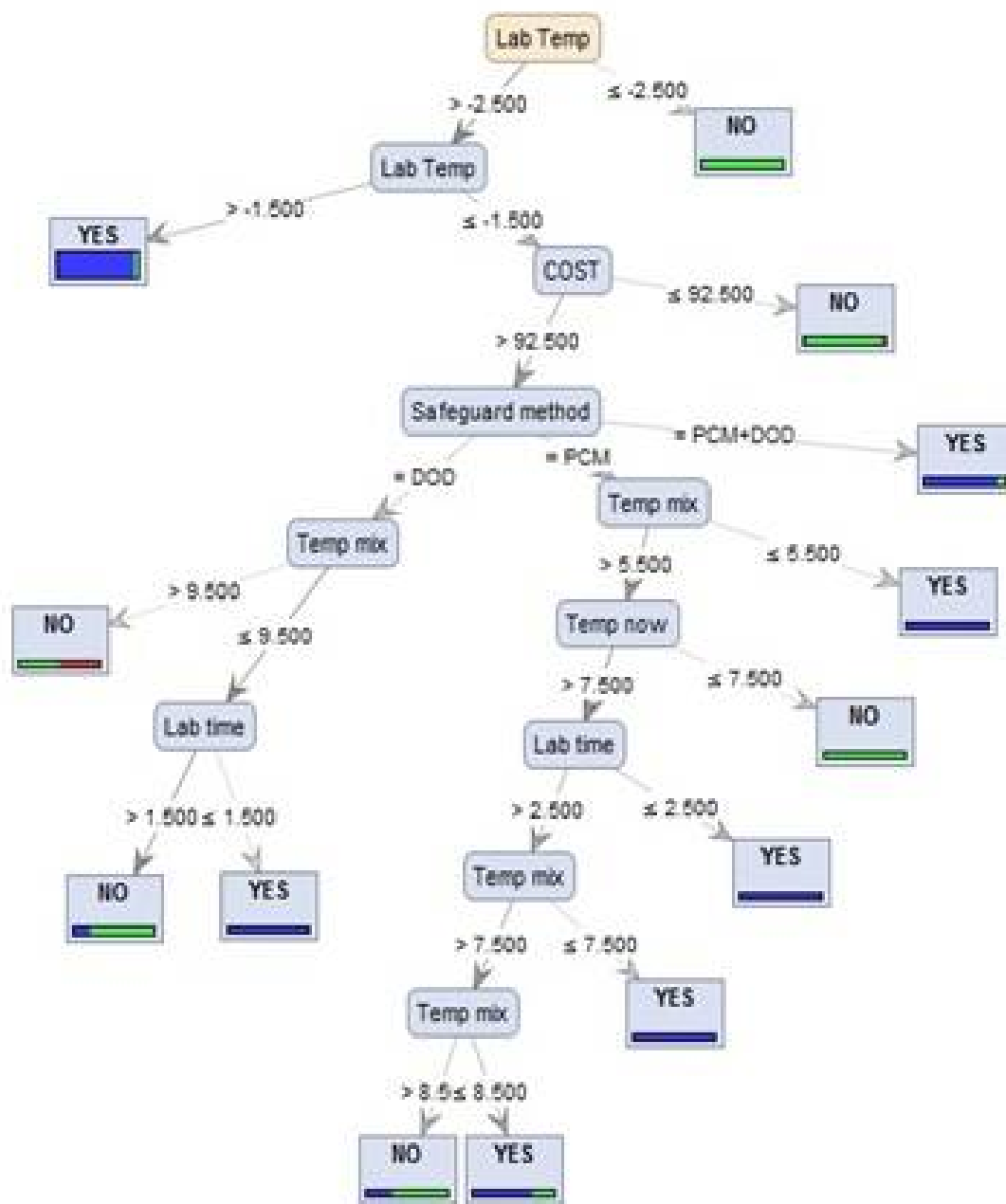
Przez zastosowanie powyższej metody otrzymujemy inną strukturę wyników.

Po pierwsze otrzymujemy nie jedno proste czytelne lub skomplikowane w strukturze drzewo ale wiele klasyfikatorów (drzew decyzyjnych) o prostej strukturze co nie prowadzi do problemu przeuczenia się.

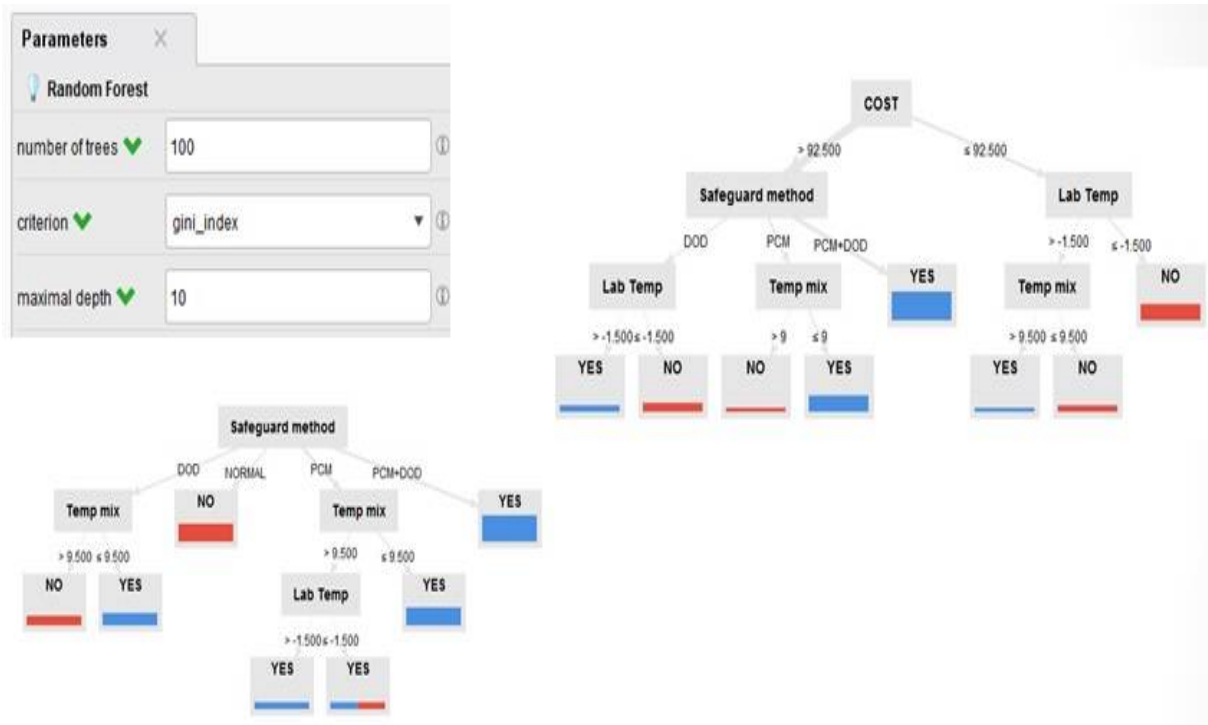
Po drugie każde otrzymane – zbudowane drzewo decyzyjne jest wygenerowane z losowo wybranego zbioru ze zwracaniem co zapobiega tworzeniu bardzo skomplikowanych w strukturze drzew i każdy podział jest wybierany jako najlepszy z podzbioru zmiennych.

Podsumowując różnice to nie otrzymujemy jednego drzewa ale wiele drzew które tworzą lepszy klasyfikator który pozwala na weryfikację prognozowanych parametrów realizacji procesu betonowania wraz z określeniem ich skuteczności.

Kluczowym w zastosowaniu tego algorytmu była ilość analizowanych przypadków mimo iż w bazie danych mamy ok 80 przypadków to losowanie ze zwracaniem i analizę losowo podzielonych danych przy ok 1000 prób losowych okazała się najbardziej skuteczna dalsze zwiększanie przypadków nie spowodowało polepszenia skuteczności klasyfikatora w macierzy predykcji.

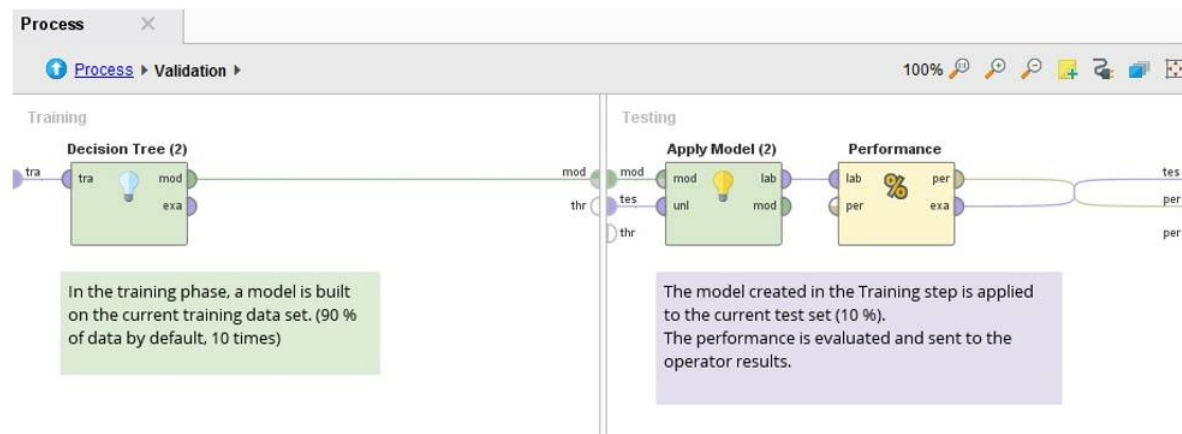


Rysunek 6.17. Drzewo decyzyjne wynikami skuteczności uzyskanego klasyfikatora 78-81% dla metod stosowania optymalizacji reguł z zastosowaniem drzew decyzyjnych.



Rysunek 6.18 Wybrane przykładowe jedno z wielu drzewo decyzyjne z wynikami skuteczności 82-85% klasyfikatora dla metody Random Forest.

Machine Learning - RapidMiner okno procesu



Schemat działania programu Rapid Miner weryfikacja modelu trenowanie i testowanie – uczenie się z przykładów.

Baza treningowa 80% przypadków

Baza testowa 20% przypadków

Uczenie się z przykładów systematycznie zwiększa skuteczność co potwierdziło się w trakcie wykonanych analiz.

Baza danych składająca się z 30 przypadków miała skuteczność ok 74-78%.

W trakcie dalszych prac po zebraniu ok 80 przypadków skuteczność wzrosła do ok 78-81% z wykorzystanie algorytmu drzew decyzyjnych. W kolejnych etapach związanych z budowaniem systemu ColCon wykorzystano inne algorytmy i osiągnięto znaczna poprawę w skuteczności:

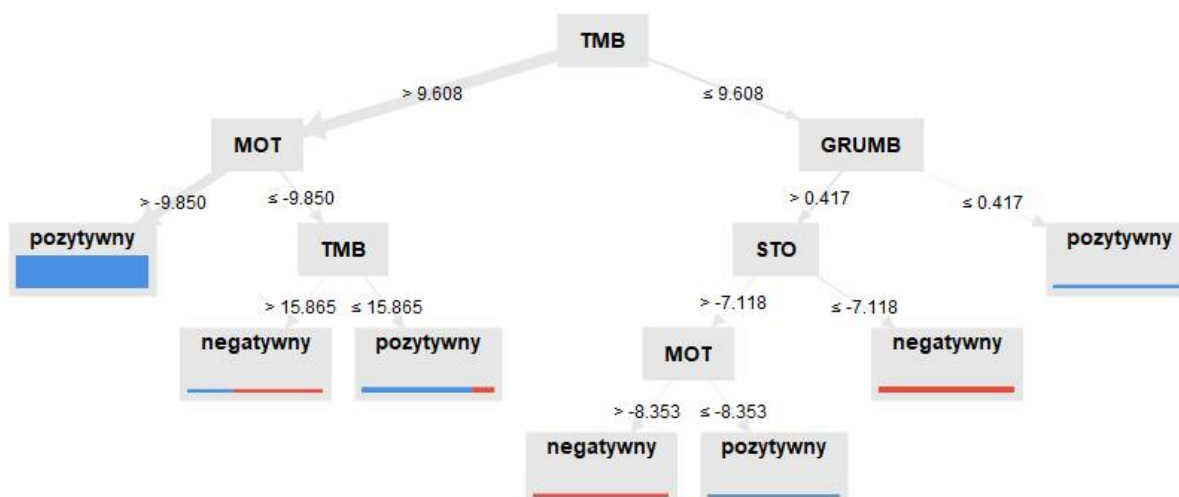
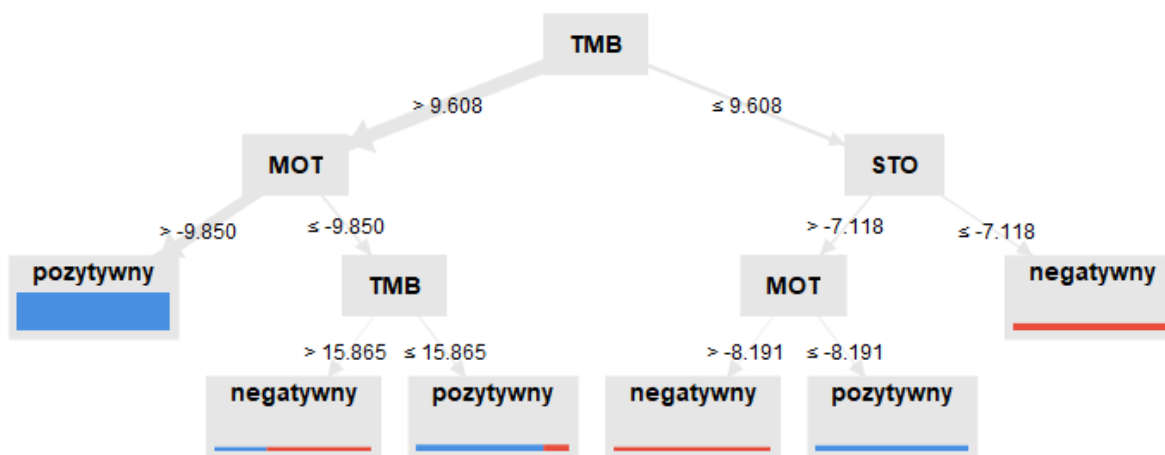
- algorytm Random Forest skuteczność na poziomie ok 82-85%.
- algorytm gradient boosted Treess skuteczność na poziomie ok 87-92%.

Table View Plot View

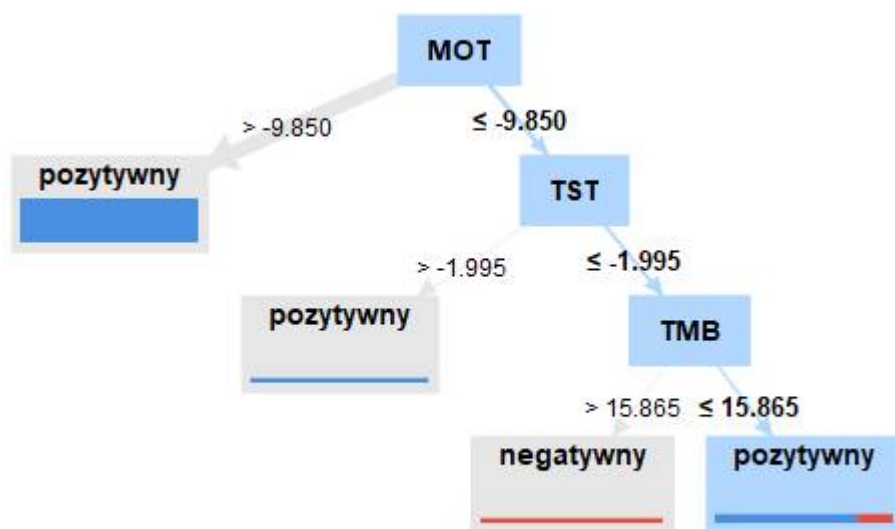
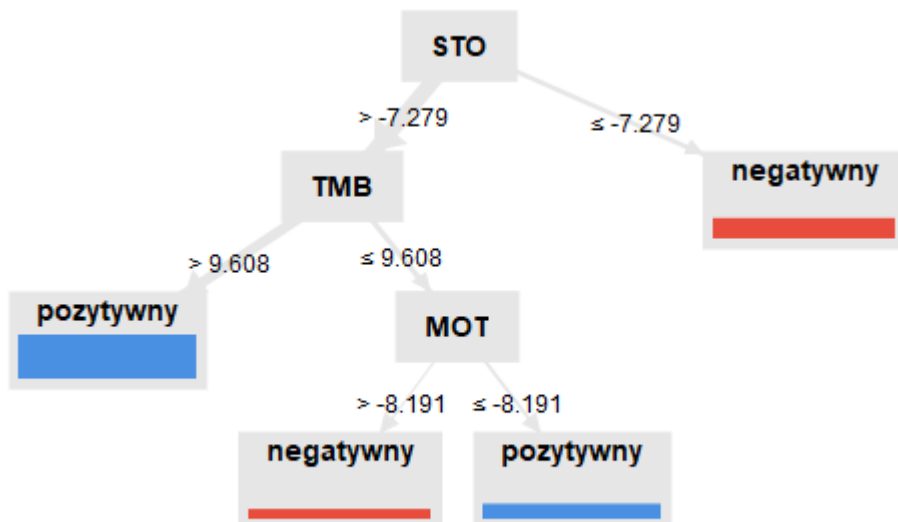
accuracy: 88.75% +/- 11.23% (micro average: 88.73%)

	true pozytywny	true negatywny	class precision
pred. pozytywny	57	7	89.06%
pred. negatywny	1	6	85.71%
class recall	98.28%	46.15%	

Przykłady drzew decyzyjnych z zastosowaniem algorytmu Drzew decyzyjnych.

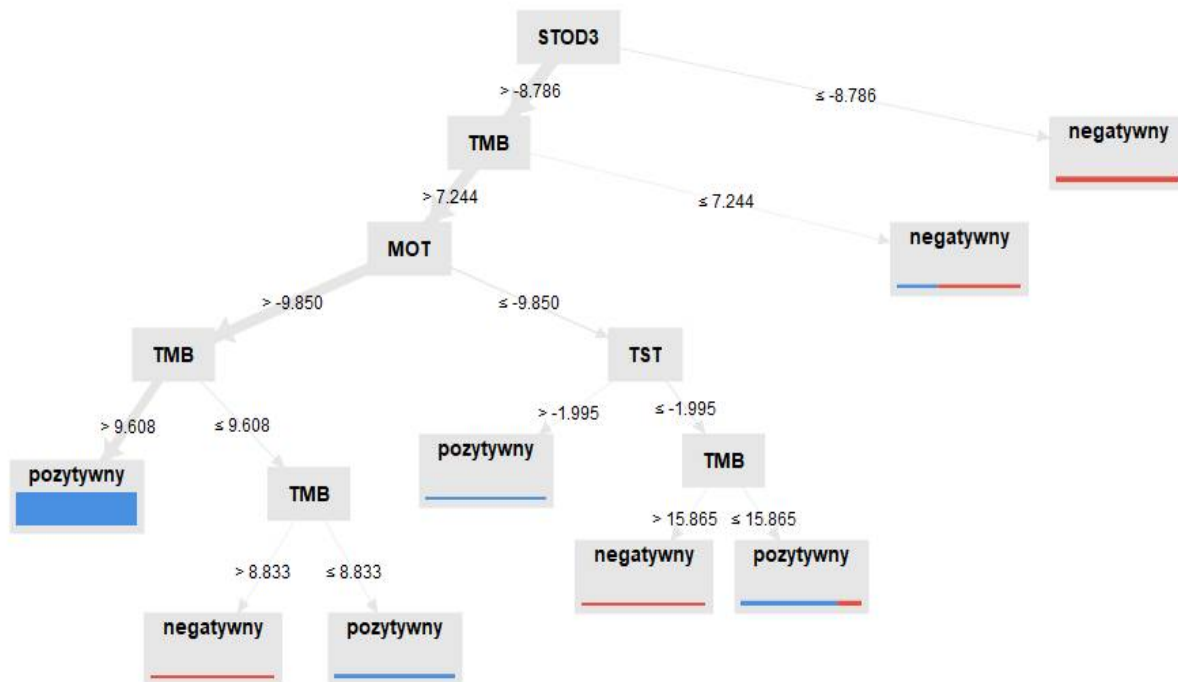


Przykłady drzew decyzyjnych z zastosowaniem algorytmu Random Forest.

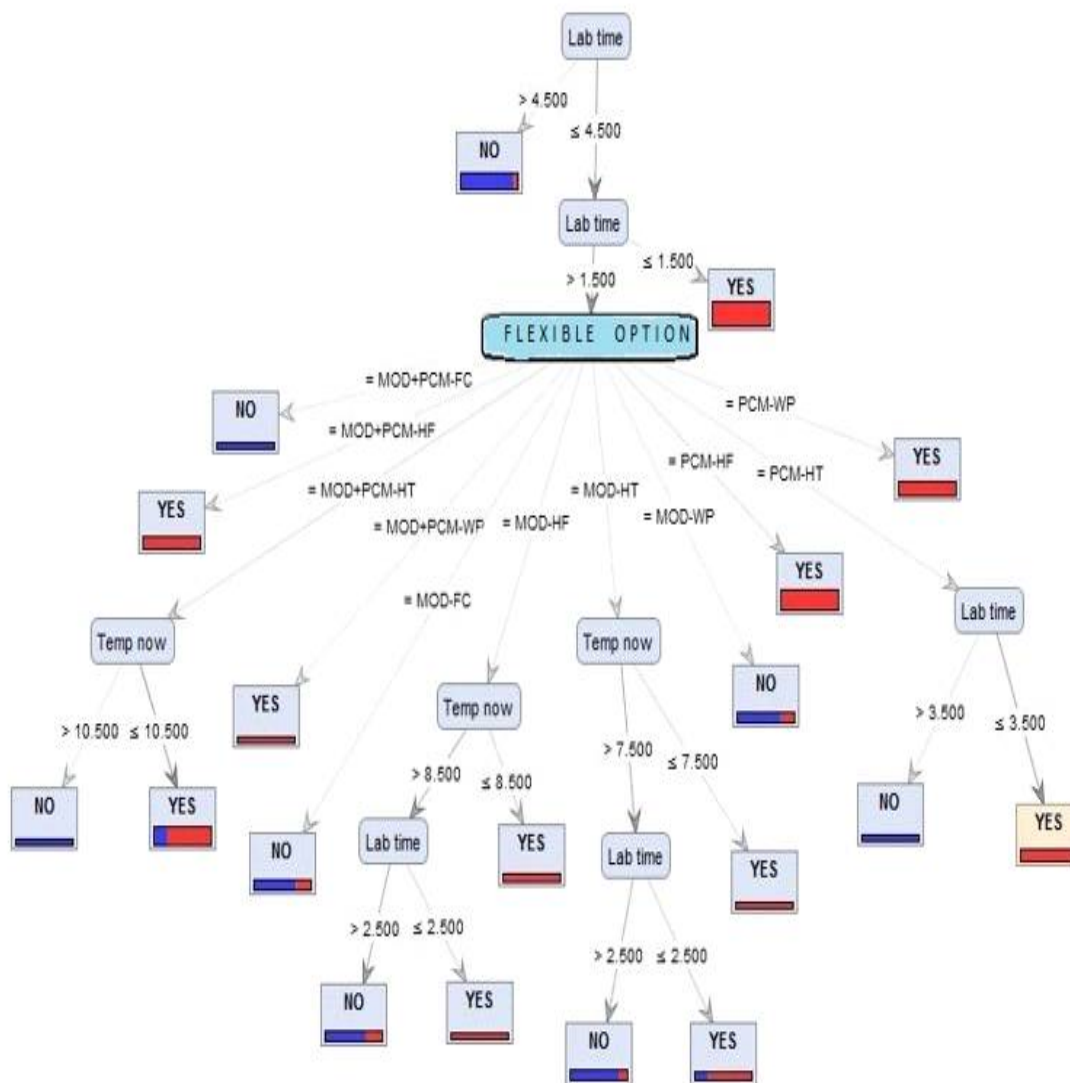




Przykłada drzewa decyzyjnego z zastosowaniem algorytmu Drzew decyzyjnych.



Przykładowe drzewo decyzyjne porównanie skuteczności modyfikacji mieszanek betonowych.





HIERARCHICZNY SYSTEM PODEJMOWANIA DECYZJI PRZY BETONOWANIU
W OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PODEJŚCIE ELASTYCZNE
mgr inż. Andrzej Karłowski

Przykład tablicy decyzyjnych na podstawie optymalizacji Drzew decyzyjnych.

TEMP. NOWY [°C]	FLEXIBLE OPTION ACTIV	LAB. TEMP.														
		FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV			FLEXIBLE OPTION PASSIV		
		CM-MOD	CM-PCM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-PCM	CM-MOD+PCM	CM-MOD-RESULT	CM-PCM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-PCM	CM-MOD+PCM	CM-MOD	CM-PCM	CM-MOD+PCM
		(5÷10) [°C]			(0÷4,9) [°C]			(-5÷-0,1) [°C]			(-10÷-5,1) [°C]			(-15÷-10,1) [°C]		
[5÷10] [°C]	NO	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES
[0÷4,9] [°C]	NO	NO	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO
[-5÷-0,1] [°C]	NO	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
[-10÷-5,1] [°C]	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	NO	YES	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	YES	YES	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
[-15÷-10,1] [°C]	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	FC	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HT	NO	NO	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	HF	NO	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO



6.6. Przykład badań

6.6.1 Zastosowania badań elastyczność bierna – odporność stosowanie domieszek mrozowych

Na początku 2008 roku system został wykorzystany do nadzorowania procesu betonowania płyty stropowej budynku Zakładu Radioterapii w Poznaniu przy ulicy Garbary. Badana płyta wykonana była z barytobetonu, wymiary stropu 12 x 27m i grubość 1,9 m. Ze względu na dużą objętość wbudowywanego betonu całość podzielono na 2 części o wymiarze 12 x 13,5m. Proces betonowania jednego bloku trwał ok. 20 godzin, temperatura mieszanki betonowej wynosiła ok. 9-16°C, temperatura (Karłowski & Pasławski, 2008) temperatura otoczenia zmieniała się w zakresie od -6 do +2°C w zależności od pory dnia. Przebieg zmian temperatury w czasie oraz max Grad A przedstawiono na wykresie nr 6.15., temperatura maksymalna w wysokości 54 °C została osiągnięta po ok. 100 godzinach od rozpoczęcia procesu betonowania.

Celem określenia poprawności przebiegu procesu dojrzewania betonu w badanej konstrukcji masywnej zweryfikowano otrzymany gradient pionowy i poziomy w poszczególnych punktach z gradientem krytycznym (określanym w granicach ok. 1°C/1cm). w omawianym przykładzie osiągnięto następujące maksymalne gradienty:

Wewnętrzne

- pionowy między czujnikiem S1 a S2 na długości 0,7m Grad A = 10,56 °C po 76 godz. od rozpoczęcia procesu betonowania
(Grad C = 0,7m*100 °C =70 °C) => Grad A < Grad C
- poziomy między czujnikiem S3 a B3 na długości 6,3m Grad A = 34,28 °C po 102 godz. od rozpoczęcia procesu betonowania
(Grad C = 6,3m*100 °C =630 °C) => Grad A < Grad C na granicy betonu i otoczenia zewnętrznego

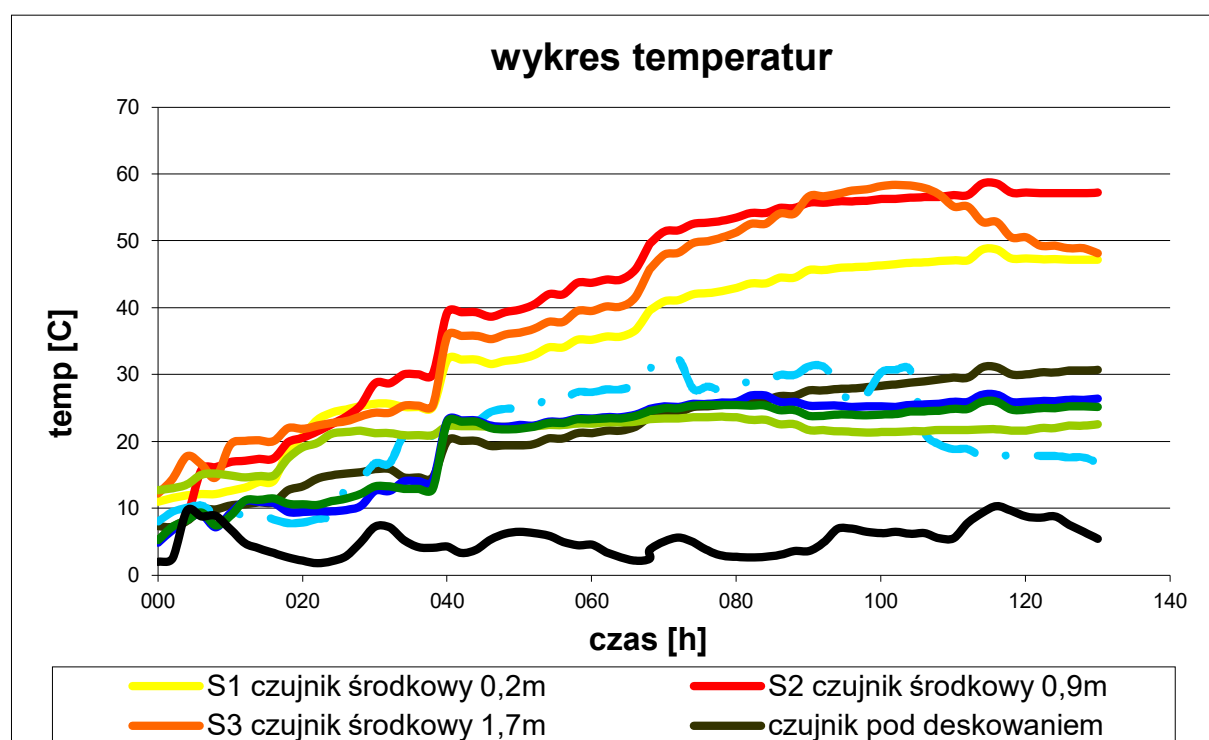
- pionowy między czujnikiem S3 a NAD na długości 0,35m Grad A = 37,36 °C po 108 godz. od rozpoczęcia procesu betonowania
(Grad C = 0,35m*100 °C =70 °C) => Grad A > Grad C

po stwierdzeniu przekroczenia Grad C rozpoczęto proces dogrzewania górnej powierzchni płyty betonowej dzięki czemu po ok. 9 godz. Grad A zmniejszył się z 37,36 °C na 32,50 °C

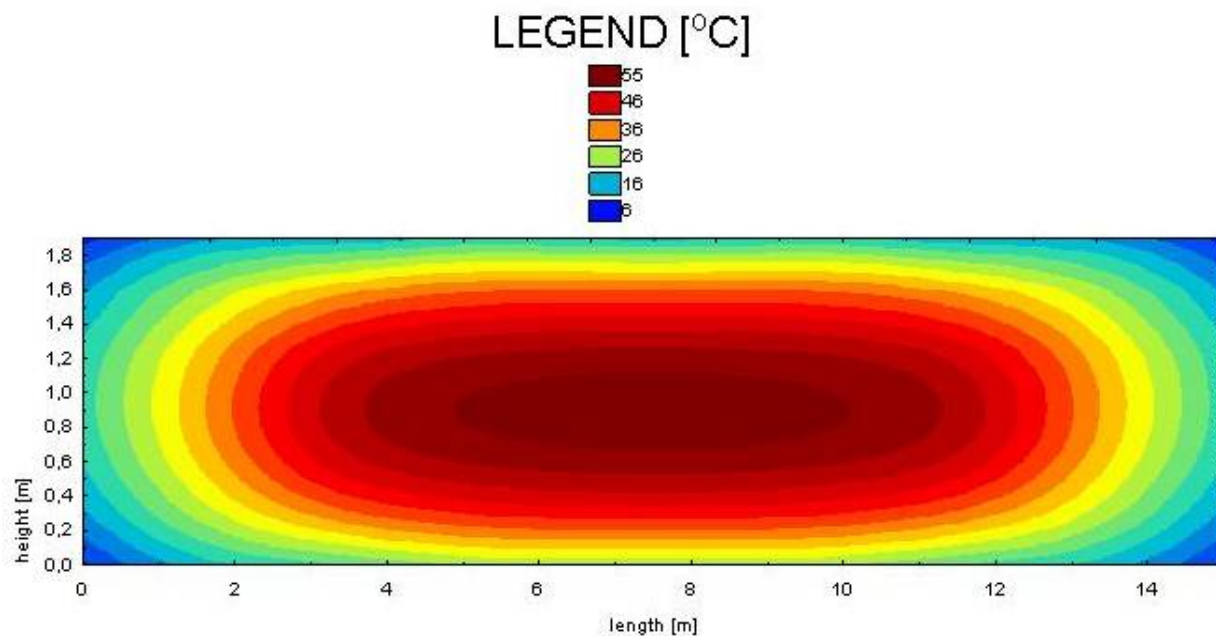
- poziomy między czujnikiem B2 a ZEW na długości 0,35m Grad A = 23,80 °C po 82 godz. od rozpoczęcia procesu betonowania
(Grad C = 0,35m*100 °C =35 °C) => Grad A < Grad C

Na wykresie nr 6.16. przedstawiono wykres pól temperatury w przekroju pionowym a na wykresie nr 6.17. w przekroju poziomym, oba wykresy sporządzone zostały dla temperatury maksymalnej wysokości 54 °C została osiągniętej po ok. 100 godzinach od rozpoczęcia procesu betonowania.

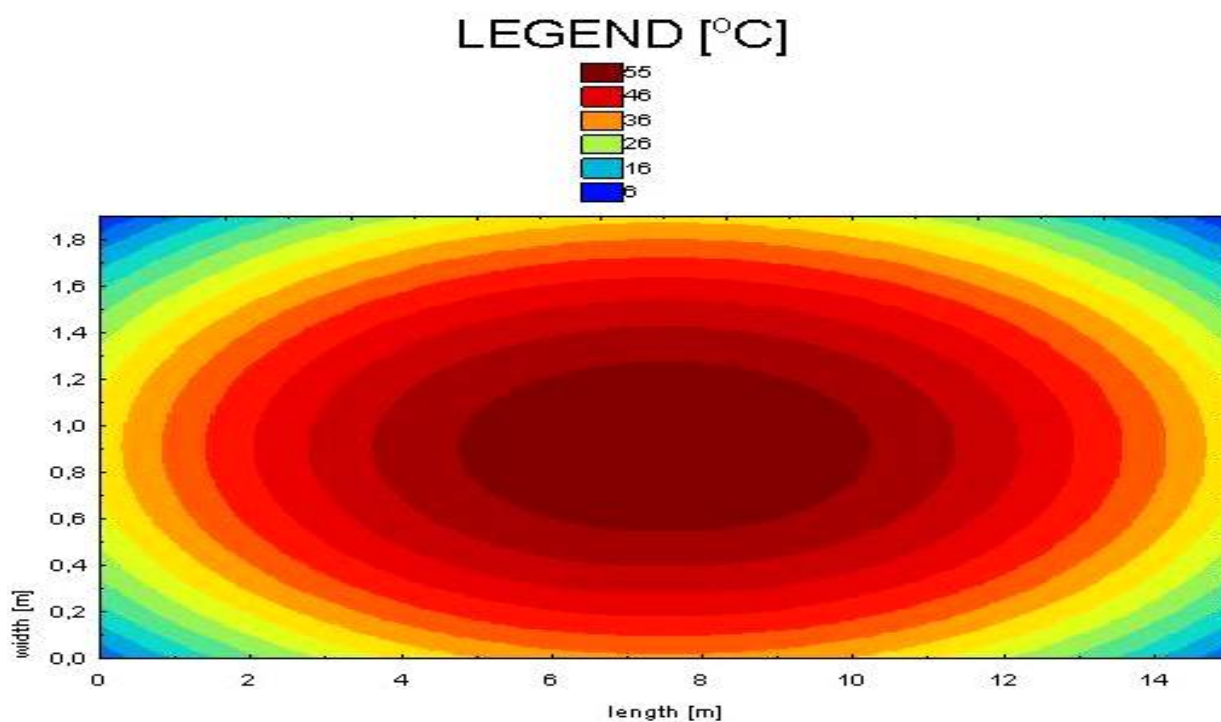
Dzięki zastosowaniu tego systemu do monitorowania procesu betonowania płyty budynku Zakładu Radioterapii na czas podjęto odpowiednie kroki w celu zabezpieczenia betonu przed nadmiernym wpływem naprężeń termicznych przez zastosowanie mat ochronnych oraz ogrzewanie zewnętrznej powierzchni bloku betonowego.



Rys. 6.15. Wykres przebiegu zmian temperatury



Rysunek 6.16. Wykres rozkładu temperatur przekrój pionowy



Rysunek 6.17. Wykres rozkładu przekrój poziomy

6.6.2. Badanie elementów ściennych w podgrzewanym deskowaniu elastyczność czynna adaptacyjność

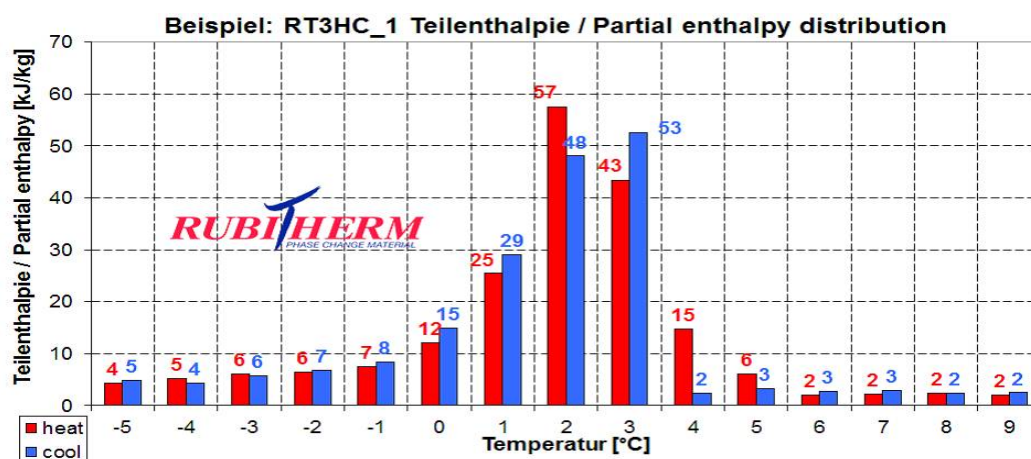
Celem badania było określenie efektów zastosowania materiałów zmiennofazowych (ang. Phase Change Material - PCM) do modyfikacji betonów cementowych w początkowej fazie dojrzewania.

Materiały zmiennofazowe charakteryzują się relatywnie wysokim ciepłem przemiany fazowej i dzięki temu dają możliwość ograniczenia negatywnego wpływu niskiej lub/i wysokiej temperatury oddziałującej na beton w początkowej fazie jego dojrzewania.

Zastosowano następujące materiały: beton zgodny z recepturą C35/45 W8 wg Zleceniodawcy oraz beton mostowy C40/50 (F150) – Zał. 1.

Jako materiały modyfikujące badane mieszanki zastosowano materiał RUBITHERM RT3. Materiał ten charakteryzuje się wysokim ciepłem przemiany fazowej przy temperaturze:

- 3 °C dla RT3 – rys. 1



Rysunek 6.18. Rozkład entalpii w temperaturze od -5 do +9 °C dla materiału RT3

Badania przeprowadzono w komorze klimatycznej w trzech wariantach:

- element ścienny nr 1 o grubości 20cm z betonu zgodnie z recepturą dostarczoną przez zleceniodawcę w komorze klimatycznej symulującej warunki dojrzewania przy występującym krótkotrwałym spadku temperatury w cyklu dobowym
- element ścienny nr 2 o grubości 20cm z betonu zgodnie z recepturą dostarczoną przez zleceniodawcę modyfikowany dodatkiem PCM w komorze klimatycznej symulującej warunki dojrzewania przy występującym krótkotrwałym spadku temperatury w cyklu dobowym



- element ścienny nr 3 o grubości 20cm w ogrzewanej matami formie z betonu zgodnie z recepturą dostarczoną przez zleceniodawcę w komorze klimatycznej symulującej warunki dojrzewania przy występującym krótkotrwałym spadku temperatury w cyklu dobowym
- Zastosowany cykl dobowy zmian temperatury opisany w Tablicy 1. Zastosowano beton C35/45 zgodnie z Załącznikiem 1.

Tablica 1. Dobowy cykl zmian temperatury w komorze klimatycznej

czas [h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0
temperatura w komorze [°C]	6,0	5,0	2,5	0,0	-0,5	-1,0	-2,0	-2,5	-2,5	-3,0	-3,0	-3,5	-3,0	-2,5	-1,5	-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	6,0

Dla elementu nr 1 i 2 czujniki umieszczono w elementach ściennych o grubości 20 cm na czterech poziomach: na dole, w środku wysokości oraz przy powierzchni górnej płaszczyzny ściany, oraz ponad powierzchnią ściany - umieszczono czujnik umożliwiający monitorowanie temperatury w komorze ponad powierzchnia badanego elementu ściennego.

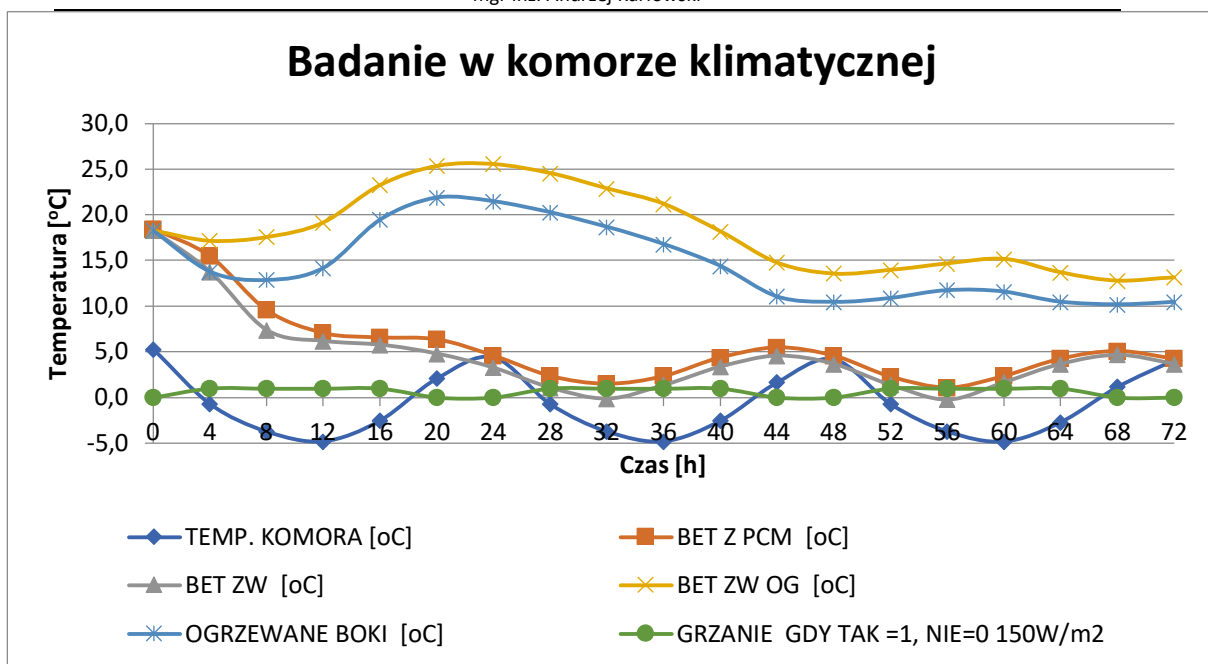
Dla elementu nr 3 - ogrzewane matami boki formy czujniki umieszczono w elemencie ściennym o grubości 20 cm w środku elementu w pionie na czterech poziomach: na dole, w środku wysokości oraz przy powierzchni górnej płaszczyzny ściany i ponad powierzchnią ściany - umieszczono czujnik umożliwiający monitorowanie temperatury w komorze ponad powierzchnia badanego elementu ściennego oraz dodatkowo po dwa czujniki na każdej stronie ściany z ogrzewanymi bokami



HIERARCHICZNY SYSTEM PODEJMOWANIA DECYZJI PRZY BETONOWANIU
W OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PODEJŚCIE ELASTYCZNE
mgr inż. Andrzej Karłowski

Tablica 6.1. Przebieg zmian temperatury w komorze klimatycznej i badanych elementach ściennych

CZAS [h]	TEMP. KOMORA [°C]	BET Z PCM [°C]	BET ZW [°C]	BET ZW OG [°C]	OGRZEWANE BOKI [°C]	GRZANIE GDY TAK =1, NIE=0 150W/m2
0	5,3	18,5	18,3	18,3	18,3	0,0
4	-0,7	15,5	13,8	17,2	13,8	1,0
8	-3,7	9,6	7,4	17,6	12,9	1,0
12	-4,8	7,1	6,2	19,2	14,2	1,0
16	-2,5	6,6	5,8	23,3	19,5	1,0
20	2,1	6,4	4,8	25,4	21,9	0,0
24	4,4	4,6	3,3	25,6	21,5	0,0
28	-0,7	2,4	1,1	24,6	20,3	1,0
32	-3,7	1,5	-0,1	22,9	18,7	1,0
36	-4,8	2,4	1,4	21,2	16,8	1,0
40	-2,5	4,4	3,4	18,2	14,4	1,0
44	1,7	5,5	4,6	14,8	11,1	0,0
48	4,2	4,6	3,7	13,6	10,5	0,0
52	-0,7	2,3	1,4	14,0	10,9	1,0
56	-3,7	1,1	-0,2	14,7	11,8	1,0
60	-4,8	2,4	1,7	15,2	11,6	1,0
64	-2,7	4,3	3,7	13,7	10,5	1,0
68	1,2	5,1	4,7	12,8	10,2	0,0
72	4,1	4,3	3,7	13,2	10,5	0,0



Poniższy wykres (rys. 2) przedstawia przebieg temperatury w poszczególnych punktach badanych elementów ściennych Nr1, Nr2 i Nr3.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały przydatność materiałów zmiennofazowych jako dodatku do betonów cementowych dojrzewających w niekorzystnych warunkach.

Potwierdziły się oczekiwane efekty zastosowania materiałów zmiennofazowych jako modyfikatora betonu cementowego służącego do ograniczenia ryzyka przemarzania betonu dojrzewającego w warunkach nagłego obniżenia temperatury otoczenia (typowe przymrozki występujące na przełomie jesieni i zimy oraz zimy i wiosny)

Badania wykazały, że konieczne jest uzyskanie odpowiedniej temperatury wyjściowej mieszanki betonowej w zakresie ok 20°C

Ponadto zastosowanie ogrzewanych deskowań ciesielskich wykazało że takie rozwiązanie może skutecznie zabezpieczyć beton przed przemarzeniem.

Dodatkowo badanie wykazało że należy jeszcze odpowiednio wyregulować krzywą sterownika nagrzewu oraz niezbędne byłoby wykorzystanie systemowych deskowania np firmy PERI z zastosowaniem opcji podgrzewania do wykonania badań laboratoryjnych w komorze klimatycznej

W badaniach w III etapie przewiduje się dalsze badania elementów ściennych na budowie z zastosowaniem systemowe deskowania np firmy PERI z zastosowaniem opcji podgrzewania.



Rozdział 7. Wnioski

Podsumowując niniejszą rozprawę można wyciągnąć następujące wnioski ogólne, szczegółowe oraz wytyczyć kierunki dalszych badań.

7.1. Wnioski ogólne

Do wniosków ogólnych zaliczyć można:

- Proponowany system doradczy służy do uwzględnienia wpływu czynników ryzyka technologicznego w celu efektywnego zarządzania procesami budowlanymi;
- Analiza otoczenia i procesów w toku pozwala na zwiększenie ilości informacji oraz prognozowanie stanu (przede wszystkim stanu zagrożenia);
- Wprowadzenie różnych opcji technologicznych umożliwia implementację elastyczności zarówno w formie aktywnej, jak i pasywnej;
- Przedstawione przykłady wskazują na różne możliwości zastosowania elastyczności dla różnych rodzajów przedsięwzięć;
- Za generalnie dominującą tendencją należy uznać dążenie do zastosowania pasywnej elastyczności (np. modyfikacja domieszkami betonu cementowego), jednak może być ona niewystarczająca ze względu na turbulentnie zmienne otoczenie – typowa strategia: elastyczność pasywna dla scenariusza najbardziej prawdopodobnego i optymistycznego.

7.2. Wnioski szczegółowe

Znaczne zróżnicowanie charakteru przedsięwzięć budowlanych wymaga dostosowania podejścia do przyjętej metody zarządzania w danym przypadku (np. betonowanie w deskowaniu ślizgowym (silos na cukier) – dominująca czynna elastyczność, betonowanie konstrukcji w warunkach obniżonej temperatury (płyta postojowa/szczelna na stacji paliwowej) – elastyczność czynna i bierna, betonowanie stropu i ścian z betonu barytowego – dominacja elastyczności biernej).

- Należy przeanalizować przedmiotowy system i dobrać odpowiednie opcje elastyczności czynnej i biernej kierując się zarówno skutecznością, jak i kosztami opcji.
- Uczucie się z przykładów usprawnia zarządzanie procesami budowlanymi na bazie dotychczasowych doświadczeń (Uczenie się – Autor: Cichosz) bazujące na analizie ilości informacji w poszczególnych gałęziach drzewa decyzyjnego.



- Proaktywne podejście umożliwia działanie wyprzedzające przewidywane zagrożenia, co ogranicza ryzyko uszkodzenia elementów i dalsze konsekwencje (rozbiórka i ponowne wykonanie).
- W systemie doradczym na poziomie zarządzania szczegółowej analizie poddano wpływ czynników klimatycznych na przebieg przedmiotowego procesu technologicznego, co umożliwia nie tylko wyznaczenie nie tylko najbardziej sprzyjającego okresu realizacji, ale także określenie współczynników wpływu na dany proces w różnych okresach (miesiącach). Pozwala także na określenie granic pesymistycznego scenariusza (np. minimum absolutne temperatury w analogicznym okresie na podstawie reprezentatywnego 30-lecia obserwacji).
- Na poziomie drugim sprawdziło się podejście oparte na systematycznym doskonaleniu tablicy decyzyjnej – działający w oparciu o program RapidMiner z algorytmem See5 gwarantuje wykorzystanie napływających informacji dotyczących wszystkich przypadków wraz z ich klasyfikacją.
- Na poziomie III zastosowanie zarządzania w czasie rzeczywistym daje możliwość korygowania wcześniej podjętej decyzji i uruchomienie opcji elastyczności czynnej przygotowanej (przewidzianej do uruchomienia) w przypadku zaistnienia scenariusza negatywnego (zagrożenie dużym ryzykiem – rozbiórka i ponowne wykonanie).

7.3. Kierunki dalszych badań okresu realizacji

- Wykorzystanie przedmiotowego systemu doradczego w technologii robót betonowych, które często można zakwalifikować jako procesy krytyczne w wielu przedsięwzięciach, można poszerzyć o inne ważne procesy także zależne od warunków pogodowych – np. roboty ziemne.
- Interesującym zagadnieniem wydaje się znalezienie najkorzystniejszego parytetu elastyczności aktywnej i biernej (np. modyfikacja mieszanki betonowej).
- W zarządzaniu procesami budowlanymi spotykamy się także z innymi źródłami ryzyka poza ryzykiem technologicznym. Warto zastanowić się nad wprowadzeniem innych metod zarządzania – np. Lean Management w celu ograniczenia wpływu strat związanych z zaangażowaniem zasobów – np. pracowników przy realizacji procesów produkcyjnych.

Bibliografia

- Alzaza, A., Ohenoja, K., Langås, I., Arntsen, B., Poikelispää, M., & Illikainen, M. (2022). Low-temperature (-10°C) curing of Portland cement paste – Synergetic effects of chloride-free antifreeze admixture, C–S–H seeds, and room-temperature pre-curing. *Cement and Concrete Composites*, 125, 104319. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104319>
- Ballard, G., & Howell, G. (1998). Shielding Production: Essential Step in Production Control. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(1), 11–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1998\)124:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:1(11))
- Ballard, Glenn, & Howell, G. A. (2003). Lean project management. *Building Research and Information*, 31(2), 119–133. <https://doi.org/10.1080/09613210301997>
- Ballard, Glenn, & Tommelein, I. (2012). Lean management methods for complex projects. *Engineering Project Organization Journal*, 2(1–2), 85–96. <https://doi.org/10.1080/21573727.2011.641117>
- Ballard, Glenn, & Tommelein, I. (2021). 2020 Current Process Benchmark for the Last Planner® System of Project Planning and Control. In *Lean Construction Journal* (Vol. 2021, Issue March).
- Barna, L. A., Seman, P. M., & Korhonen, C. J. (2011). Energy-Efficient Approach to Cold-Weather Concreting. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1544–1551. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000262](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000262)
- Barna, L., Jones, K., Vuyovich, C., & Shoop, S. (2019). A Comparison of Frost Depth Estimates from Ground Observations and Modelling Using Measured Values and Reanalysis Data for Vehicle Mobility. *Cold Regions Engineering 2019 - Proceedings of the 18th International Conference on Cold Regions Engineering and the 8th Canadian Permafrost Conference*, 1–7. <https://doi.org/10.1061/9780784482599.001>
- Bonacci, O., Željковиć, I., Trogrlić, R. Š., & Milković, J. (2013). Differences between true mean daily, monthly and annual air temperatures and air temperatures calculated with three equations: A case study from three Croatian stations. *Theoretical and Applied Climatology*, 114(1–2), 271–279. <https://doi.org/10.1007/S00704-012-0830-8>
- Burgeno, J. N., & Joslyn, S. L. (2020). The impact of weather forecast inconsistency on user trust. *Weather, Climate, and Society*, 12(4), 679–694. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-19-0074.1>
- Chatterji, S. (2003). Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. *Cem Concr Compos*, 25(7), 759–765. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(02\)00099-9](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(02)00099-9)
- Choi, H., Zhang, W., & Hama, Y. (2017). Method for determining early-age frost damage of concrete by using air-permeability index and influence of early-age frost damage on concrete durability. *Construction and Building Materials*, 153, 630–639. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.140>
- Drzewiecka, J., & Paślawski, J. (2011). Analiza zakłóceń procesów budowlanych. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 2, no, 475–479. <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPBA-0013-0006>



- Elkady, H. M., Yasien, A. M., Elfeky, M. S., & Serag, M. E. (2019). Assessment of mechanical strength of nano silica concrete (NSC) subjected to elevated temperatures. *Journal of Structural Fire Engineering*, 10(1), 90–109. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2017-0041/FULL/XML>
- Fagerlund, G. (1971). Degré critique de saturation. Un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction. *Matériaux et Constructions*, 4(No. 23), 271–285. <https://doi.org/10.1007/bf02479169>
- Fagerlund, G. (1977). The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Matériaux et Constructions*, 10(4), 231–253. <https://doi.org/10.1007/BF02478694/METRICS>
- García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., & Banda-Pérez, P. (2021). Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings 2021, Vol. 11, Page 254*, 11(6), 254. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11060254>
- Golden, William, & Powell, P. (2004). Inter-organisational Information Systems as Enablers of Organisational Flexibility. *Technology Analysis & Strategic Management*, 16(3), 299–325. <https://doi.org/10.1080/0953732042000251115>
- Golden, Willieam, & Powell, P. (2000). Towards a definition of flexibility: in search of the Holy Grail? *Omega*, 28(4), 373–384. <https://ideas.repec.org/a/eee/jomega/v28y2000i4p373-384.html>
- Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., Arboleda, C. A., & Lee, S. (2009). Visualization of Construction Progress Monitoring with 4D Simulation Model Overlaid on Time-Lapsed Photographs. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(6), 391–404. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2009\)23:6\(391\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:6(391))
- Goryński, J. (1911-1986)., & Majzner, L. (1981). *Ekonomika budownictwa i polityka budowlana*. https://books.google.com/books/about/Ekonomika_budownictwa_i_polityka_budowla.html?hl=pl&id=9xkdHAAACAAJ
- Han, K., Degol, J., & Golparvar-Fard, M. (2017). Geometry- and Appearance-Based Reasoning of Construction Progress Monitoring. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(2), 04017110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001428](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001428)
- Han, K. K., & Golparvar-Fard, M. (2015). Appearance-based material classification for monitoring of operation-level construction progress using 4D BIM and site photologs. *Automation in Construction*, 53, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.007>
- Jin, R., Zhang, H., Liu, D., & Yan, X. (2020). IoT-based detecting, locating and alarming of unauthorized intrusion on construction sites. *Automation in Construction*, 118, 103278. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103278>
- Jóźwiak-Niedźwiedzka, D. (2006). Zapobieganie tuszczeniu powierzchni betonowych przy użyciu nawilżonego kruszywa lekkiego Cz. I - Stan wiedzy. *Drogi i Mosty*, nr 2, 37–54. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BAT1-0020-0024>
- Jóźwiak, Ireneusz; Kliszczewicz, Ryszard; Zybura, A. (2006). *Zasady projektowania konstrukcji żelbetowych na podstawie*. Wydawnictwo Arkady.
- Karłowski, A., & Paślawski, J. (2008). Monitoring of construction processes in the variable



- environment. *Technological and Economic Development of Economy*, 14(4), 503–517.
<https://doi.org/10.3846/1392-8619.2008.14.503-517>
- Keane, P. J., & Caletka, A. F. (2009). *Delay analysis in construction contracts*.
<https://www.wiley.com/en-us/Delay+Analysis+in+Construction+Contracts%2C+2nd+Edition-p-9781118631171>
- Kerzner, H. (2015). Project Management 2.0: Leveraging Tools, Distributed Collaboration, and Metrics for Project Success. *Project Management 2.0: Leveraging Tools, Distributed Collaboration, and Metrics for Project Success*, 1–316. <https://doi.org/10.1002/9781119020042>
- Kiernożycki, W. (2003). *Betonowe konstrukcje masywne*.
- Krupski, R. (2005). *Zarządzanie przedsiębiorstwem w turbulentnym otoczeniu : praca zbiorowa*.
Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
<http://www.pwe.com.pl/zarzadzanie/zarzadzanie,p2102482087>
- Krylov, B. A., & Raton London New York, B. (2020). *Cold Weather Concreting*.
<https://doi.org/10.1201/9781003068921>
- Kumaraswamy, M. M., & Chan, D. W. M. (1998). Contributors to construction delays. *Construction Management and Economics*, 16(1), 17–29. <https://doi.org/10.1080/014461998372556>
- Kuryłowicz-Cudowska, A., Chróścielewski, J., & Wilde, K. (2017). *Symulacje przepływu ciepła przez płytę betonową*. 1049–1058.
- Łagoda, G., & Gajda, T. (2021). Change of Mechanical Properties of Repair Mortars after Frost Resistance Rests. *Materials*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/MA14123199>
- Lee, U. K., Kim, J. H., Cho, H., & Kang, K. I. (2009). Development of a mobile safety monitoring system for construction sites. *Automation in Construction*, 18(3), 258–264.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.08.002>
- Leśniak, A., Górka, M., & Skrzypczak, I. (2021). Barriers to BIM Implementation in Architecture, Construction, and Engineering Projects—The Polish Study. *Energies 2021, Vol. 14, Page 2090*, 14(8), 2090. <https://doi.org/10.3390/EN14082090>
- Levitt, M. (1977). Methods of carrying out and reporting freeze/thaw tests on concrete. *Materials and Structures*, 10(No. 58), 209–215.
- Liu, Y., Sun, F., Yu, K., & Yang, Y. (2020). Experimental and numerical research on development of synthetic heat storage form incorporating phase change materials to protect concrete in cold weather. *Renewable Energy*, 149, 1424–1433. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.142>
- Lo, T. Y., Fung, I. W., & Tung, K. C. (2006). Construction Delays in Hong Kong Civil Engineering Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(6), 636–649.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2006\)132:6\(636\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:6(636))
- Løhre, E., Sobkow, A., Hohle, S. M., & Teigen, K. H. (2019). Framing experts' (dis)agreements about uncertain environmental events. *Journal of Behavioral Decision Making*, 32(5), 564–578.
<https://doi.org/10.1002/BDM.2132>
-



- Longo, F., Padovano, A., & Umbrello, S. (2020). Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: A human-centric perspective for the design of the factory of the future. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(12), 1–25. <https://doi.org/10.3390/APP10124182>
- Lu, M., Dong, Z. Y., & Saha, T. K. (2005). Transmission expansion planning flexibility. *2005 International Power Engineering Conference*, 893-898 Vol. 2. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2005.207035>
- Maddikunta, P. K. R., Pham, Q. V., B, P., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., & Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100257. <https://doi.org/10.1016/J.JII.2021.100257>
- Mariak, A., & Wilde, K. (2015). Wyznaczanie wytrzymałości betonu na podstawie funkcji dojrzałości wg amerykańskiej normy ASTM C1074-11. *Materiały Budowlane, nr 4(4)*, 68–71. <https://doi.org/10.15199/33.2015.04.19>
- Mariak, Aleksandra, Chróścielewski, J., Sabik, A., Meronk, B., & Wilde, K. (2016). MONITORING OF CONCRETE CURING IN EXTRADOSED BRIDGE SUPPORTED BY NUMERICAL SIMULATION. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32), 254–262. <https://doi.org/10.12913/22998624/66186>
- Memarian, B., & Mitropoulos, P. (2014). Production System Design for Speed and Reliability: A Case Study in Concrete Construction. *International Journal of Construction Education and Research*, 10(3), 181–200. <https://doi.org/10.1080/15578771.2013.872735>
- Memarian, B., & Mitropoulos, P. (2015). Production practices affecting worker task demands in concrete operations: A case study. *Work (Reading, Mass.)*, 53(3), 535–550. <https://doi.org/10.3233/WOR-152179>
- Moon, D., Chung, S., Kwon, S., Seo, J., & Shin, J. (2019). Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. *Automation in Construction*, 98, 322–331. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2018.07.020>
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 4371*, 11(16), 4371. <https://doi.org/10.3390/SU11164371>
- Neville, A. M. (2012). *Właściwości betonu*. STOWARZYSZENIE PRODUCENTÓW CEMENTU.
- Nitheanandan, T., Cao, X., Choi, J. H., Dupleac, D., Kim, D. H., Nayak, A. K., Lele, H. G., & Rammohan, H. P. (2017). Benchmarking severe accident computer codes for heavy water reactor applications. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 3(2). <https://doi.org/10.1115/1.4035726/369877>
- Nowotarski, P., & Paślawski, J. (2018). Lean management in small and medium-sized construction enterprises in Poland - selected results. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 27(3[81]), 260–268. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2018.27.3.25>
- Nowotarski, P., Paślawski, J., & Matyja, J. (2016). Improving Construction Processes Using Lean Management Methodologies - Cost Case Study. *Procedia Engineering*, 161, 1037–1042. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.845>



- Osbert-Pociecha, G., Moroz, M., & Lichtarski, J. M. (2008). Elastyczność przedsiębiorstwa jako konfiguracja elastyczności cząstkowych. In *Gospodarka Narodowa* (Issue nr 4). [s.n.]. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.ekon-element-000150406598>
- Paślawski, J. (2008). Flexibility approach in construction process engineering. *Technological and Economic Development of Economy*, 14(4), 518–530. <https://doi.org/10.3846/1392-8619.2008.14.518-530>
- Paślawski, J. (2009). *Elastyczność w zarządzaniu realizacją procesów budowlanych*. <http://www.wbc.poznan.pl/dlibra/doccontent?id=168691>
- Paślawski, J. (2017). Flexible Approach for Construction Process Management Under Risk and Uncertainty. *Procedia Engineering*, 208, 114–124. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.11.028>
- Paślawski, J., & Karłowski, A. (2016, April 25). Technological flexibility for construction process management Concreting at low temperatures. *4th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering (ACE 2016)*. https://doi.org/10.5176/2301-394X_ACE16.135
- Powers, T. C. (1945). A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 41(1). <https://doi.org/10.14359/8684>
- POWERS, T. C. (1958). Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 41(1), 1–6. <https://doi.org/10.1111/J.1151-2916.1958.TB13494.X>
- Powers, T. C., & Helmuth, R. A. (1953). THEORY OF VOLUME CHANGES IN HARDENED PORTLAND-CEMENT PASTE DURING FREEZING. *Highway Research Board Proceedings*, 32.
- Rivas-Hermann, R., Köhler, J., & Scheepens, A. E. (2015). Innovation in product and services in the shipping retrofit industry: A case study of ballast water treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, 106, 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.062>
- Rosenqvist, M., Oxfall, M., Fridh, K., & Hassanzadeh, M. (2015). A test method to assess the frost resistance of concrete at the waterline of hydraulic structures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(8), 2403–2415. <https://doi.org/10.1617/S11527-014-0327-2/METRICS>
- Ross, A. M., Rhodes, D. H., & Hastings, D. E. (2008). Defining changeability: Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value. *Systems Engineering*, 11(3), 246–262. <https://doi.org/10.1002/sys.20098>
- Rushing, T. S., Al-Chaar, G., Eick, B. A., Burroughs, J., Shannon, J., Barna, L., & Case, M. (2017). Investigation of concrete mixtures for additive construction. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 74–80. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2015-0124>
- Rytel, O. (2009). Specyfikacja produkcji budowlanej. *Zeszyty Naukowe Akademii Podlaskiej. Seria: Administracja i Zarządzanie*, 10[83].
- Saurin, T. A., Rooke, J., & Koskela, L. (2013). A complex systems theory perspective of lean production. *International Journal of Production Research*, 51(19), 5824–5838. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.796420>
-



- Sayers, T. M., Jessop, A. T., & Hills, P. J. (2003). Multi-criteria evaluation of transport options—flexible, transparent and user-friendly? *Transport Policy*, 10(2), 95–105.
[https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00049-5)
- Schwab, K. (2015). Navigating the fourth industrial revolution. *Nature Nanotechnology*, 10(12), 1005–1006. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.286>
- Schwab, K. (World E. F. (2016). The Fourth Industrial Revolution. In *VINT research report*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Skrodzka, W. (2013). Analiza efektywności inwestycji w spółki sektora IT. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Ekonomiczne Problemy Usług, nr 104 Europejska przestrzeń komunikacji elektronicznej. T. 1*, 249–257.
- Skrzypczak, I., Oleniacz, G., Leśniak, A., Zima, K., Mrówczyńska, M., & Kazak, J. K. (2022). Scan-to-BIM method in construction: assessment of the 3D buildings model accuracy in terms inventory measurements. *Building Research & Information*, 50(8), 859–880.
<https://doi.org/10.1080/09613218.2021.2011703>
- Stabryła, A. (2020). *Zarządzanie strategiczne w teorii i praktyce firmy*.
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- Thürer, M. (2013). Hoshin Kanri for the Lean Enterprise: Developing Competitive Capabilities and Managing Profit. *Quality Management Journal*, 20(3), 70–70.
<https://doi.org/10.1080/10686967.2013.11918356>
- Tomita, Y., Yoneyama, A., Choi, H., Inoue, M., Kim, J., Choi, H., & Sudoh, Y. (2020). Evaluation of Mechanical and Shrinkage Behavior of Lowered Temperatures Cementitious Mortars Mixed with Nitrite–Nitrate Based Accelerator. *Materials 2020, Vol. 13, Page 3686*, 13(17), 3686.
<https://doi.org/10.3390/MA13173686>
- Trzcieliński, S. (2011). *Przedsiębiorstwo zwinne*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
<https://www.politechnik.poznan.pl/t/przedsiębiorstwo-zwinne,pp920.html>
- Tworek, P. (2013). *Reakcja na ryzyko w działalności przedsiębiorstwa budowlano-montażowego*. Wydawnictwo Difin, Warszawa 2013. Wydawnictwo Difin.
https://www.researchgate.net/publication/306356206_Piotr_Tworek_Reakcja_na_ryzyko_w_dzialalnosci_przedsiębiorstwa_budowlano-montazowego_Wydawnictwo_Difin_Warszawa_2013
- Wang, D., & Zhu, H. (2011). Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3703–3708.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.04.020>
- Wang, H., Pan, Y., & Luo, X. (2019). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Automation in Construction*, 103, 41–52.
<https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.03.005>
- Wawrzeńczyk, J., i, A. M.-F. B. w teorii, & 2010, undefined. (n.d.). Związek struktury porowatości betonu napowietrzonego za pomocą mikrosfer z jego mrozoodpornością. *Yadda.lcm.Edu.Pl*.
-



Retrieved November 5, 2023, from
<https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-LOD6-0022-0043/c/Wawrzenczyk.pdf>

Wawrzenczyk, J., Molendowska, A., betonu, P. Ś.-D., & 2008, undefined. (n.d.). Wpływ zastosowania mikrosfer na jakość napowietrzenia i mrozoodporność betonów o dużej ciekłości.

Dnibetonu.Com. Retrieved November 5, 2023, from https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2008/wawrzenczyk_molendowska_swiercz.pdf

Werner, W. A. (2008). *Zarządzanie w procesie inwestycyjnym* Werner. ISBN: 978-83-7207-781-3.

Werner, W. A. (2012). *Proces inwestycyjny dla architektów* (4th ed.).

Wilde, K., Mariak, A., Kurpińska, M., Meronk, B., Miśkiewicz, M., Chróścielewski, J., Sabik, A., & Groth, M. (2017). *Monitoring dojrzewania betonu skrzynki mostu MS3/B DK-16 - sekcja S3.18P*. 1–20. <https://mostwiedzy.pl/pl/publication/monitoring-dojrzewania-betonu-skrzynki-mostu-ms3-b-dk-16-sekcja-s3-18p,141089-1>

Witakowski, P. (2003). *Technologia betonowania i pielęgnacja betonu na budowie Mostu Świętokrzyskiego w Warszawie. Prace Instytutu Techniki Budowlanej*.

Witakowski, P. (2009). *Teleinformatyzacja i automatyzacja prac na placu budowy : system kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie*. Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP.

Witakowski, P. (2011). *Bezprzewodowe zarządzanie procesem budowlanym : system kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie*. Wydawnictwa AGH.

Witakowski, P., & Instytut Techniki Budowlanej. (2010). *Bezprzewodowy monitoring obiektów budowlanych materiały z IX Sympozjum : system kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie*. Instytut Techniki Budowlanej.

Witakowski, P., & Pawluś, D. (2005). *ZDALNY MONITORING WIZYJNY W LABORATORIUM REMOTE VIDEO MONITORING IN VIRTUAL*.

Wojtkowiak, G. (2015). The role of flexibility in the management of a construction company. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia, 2015(74/1)*, 321–331. <https://doi.org/10.18276/frfu.2015.74/1-27>

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems, 61*, 530–535. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2021.10.006>

Ybañez, R. S., Bautista, L. A., & De La Cruz, A. R. (2022). Virtual Project Management (VPM) in Project Execution. *American Journal of Industrial and Business Management, 12(12)*, 1867–1912. <https://doi.org/10.4236/AJIBM.2022.1212102>

Yoneyama, A., Choi, H., Inoue, M., Kim, J., Lim, M., & Sudoh, Y. (2021). Effect of a Nitrite/Nitrate-Based Accelerator on the Strength Development and Hydrate Formation in Cold-Weather Cementitious Materials. *Materials, 14(4)*, 1–14. <https://doi.org/10.3390/MA14041006>

Zegarra, O., & Alarcón, L. F. (2017). Variability propagation in the production planning and control



mechanism of construction projects. *Production Planning & Control*, 28(9), 707–726.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1304588>

Zegarra, O., & Alarcón, L. F. (2023). What Is the Complexity of Production Planning and Control? *Proceedings of the 31st Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC31)*, 1149–1159. <https://doi.org/10.24928/2023/0122>

Zhang, H. F., & Zhou, P. (2013). Design and implementation of the food shelf-life monitoring system. *Communications in Computer and Information Science*, 391 PART I, 293–303.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-53932-9_29/COVER

Zhao, N. (2021). Research on the Management Mode of EPC Project of Prefabricated Building Based on BIM Technology. *OALib*, 08(07), 1–13. <https://doi.org/10.4236/oalib.1107616>

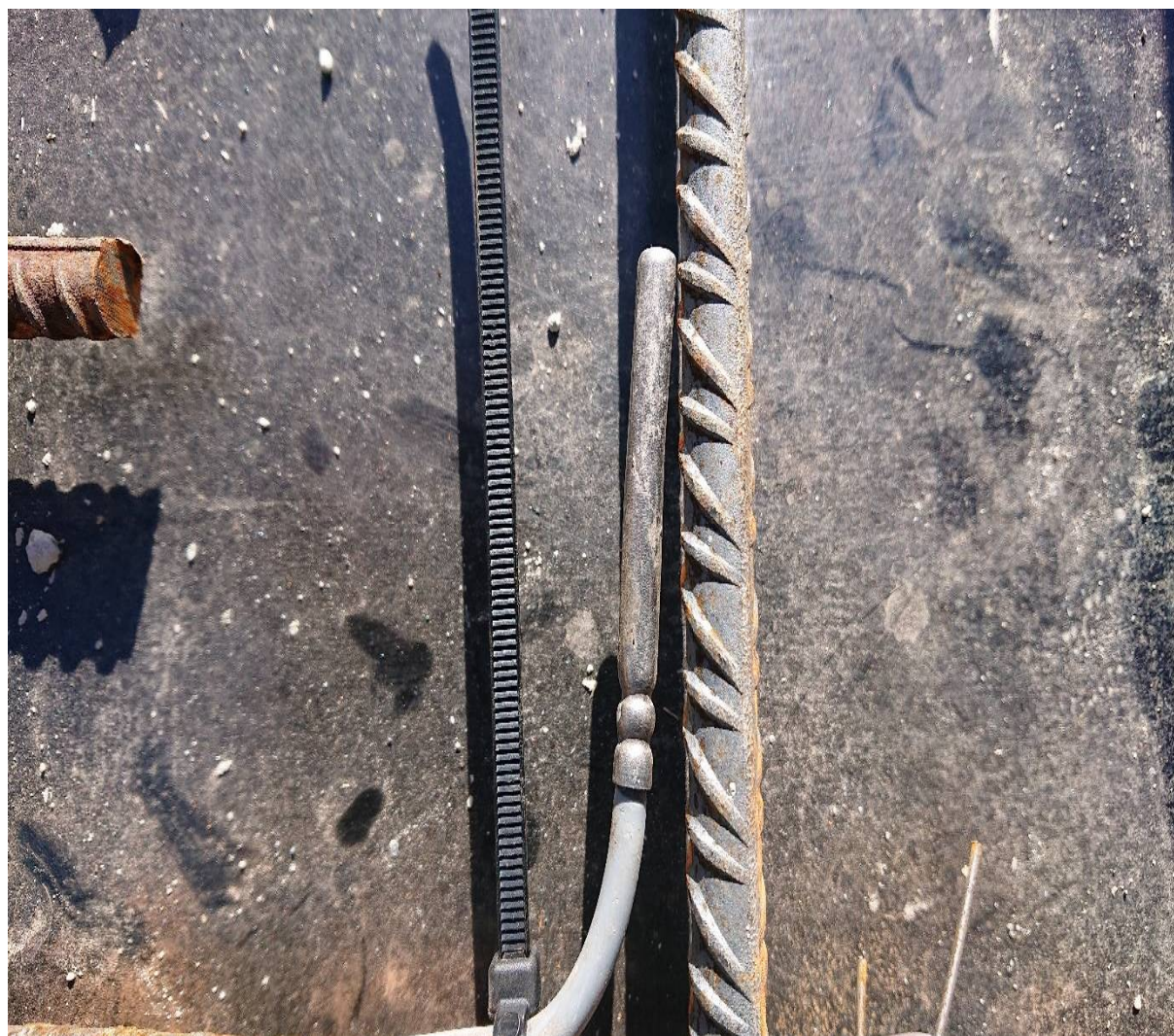
Zhao, S., Zhou, Z., Zhang, C., Wu, J., Liu, F., & Shi, G. (2023). Localization of underground pipe jacking machinery: A reliable, real-time and robust INS/OD solution. *Control Engineering Practice*, 141, 105711. <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2023.105711>

Załączniki

Dokumentacja fotograficzna

Dokumentacja fotograficzna

Badania terenowe



Fotografia nr B1. Analiza przebiegu zmian temperatury w stropie żelbetowym

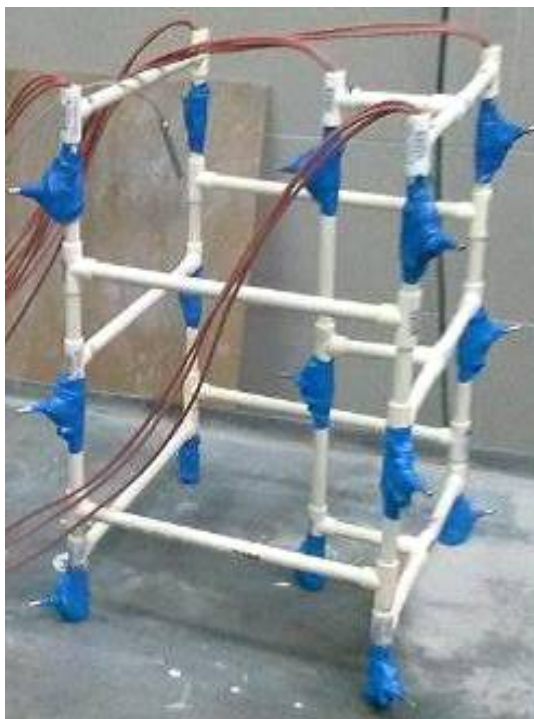
Czujniki przewodowe



Fotografia nr B2. Analiza przebiegu zmian temperatury w stropie żelbetowym

Czujniki bezprzewodowe

Badania laboratoryjne



Fotografia nr L1. Przykładowe rozwiązania rozmieszczenia czujników pomiarowych



Fotografia nr L2. Formy do wykonania elementu ściany z elektronagrzewem

Oraz z dwoma rodzajami mieszanki bez modyfikacji oraz modyfikowana PCM

Fotografia nr L3. Analiza przebiegu zmian temperatury

Płyta betonowa z elektro nagrzewem wewnątrz płyty betonowej



Fotografia nr L4. Analiza przebiegu zmian temperatury

Płyta betonowa z elektro nagrzewem powierzchniowym zewnętrznym



Fotografia nr 5. Analiza przebiegu zmian temperatury

**Element płyta betonowa porównanie zastosowania czujników przewodowych oraz
bezprzewodowych typu Beacon**





Zestawienie wyników badań terenowych i laboratoryjnych

Przedstawiono w załącznikach w postaci danych tabelarycznych i wykresów