

# **Rola nadzoru przy wykonywaniu masywnych konstrukcji betonowych**

## **THE ROLE OF SUPERVISION IN THE EXECUTION OF MASSIVE CONCRETE STRUCTURES**

### **Streszczenie**

W referacie przedstawiono zasady prowadzenia nadzoru robót betonowych w trakcie realizacji wielkogabarytowych elementów masywnych. Odniesiono je do doświadczeń zdobytych przy wykonywaniu fundamentów masywnych bloków energetycznych Elektrowni Opole.

Z uwagi na znaczenie konstrukcyjne takich elementów przedstawiono:

- wymogi w zakresie konieczności przygotowania prawidłowej i kompletnej dokumentacji technologicznej, zwłaszcza w zakresie zapewnienia właściwej jakości robót,
- niezbędny zakres robót przygotowawczych z uwzględnieniem przewidywanych warunków temperaturowych w budowywania betonu oraz jego pielęgnacji,
- nadzorowanie prawidłowości procesów transportu, w budowywania mieszanki betonowej, jej rozkładania i prawidłowego zagęszczenia,
- założenia do prowadzenia prawidłowej pielęgnacji dojrzewającego elementu, szczególnie w zakresie kontroli warunków temperaturowych i wilgotnościowych dojrzewającego betonu,
- nadzorowanie i korygowanie prawidłowości rozkładu temperatur wewnątrz dojrzewającego elementu.

### **Abstract**

The paper presents the principles of supervision concrete works during the implementation of large-size elements massive. They referred it to the experience gained

---

*dr inż. Grzegorz Bajorek – Politechnika Rzeszowska, Centrum Technologiczne Budownictwa przy Politechnice Rzeszowskiej*

*mgr inż. Marta Kiernia-Hnat – Centrum Technologiczne Budownictwa przy Politechnice Rzeszowskiej*

in implementing the foundations of the massive power plants Elektrownia Opole. Given the importance of these structural elements are shown:

- requirements for the need to prepare correct and complete technical documentation, especially in terms of ensuring the quality of the works,
- the necessary range of preparatory work with regard to the envisaged temperature conditions of incorporation of concrete and its curing,
- supervising the correctness of transport processes, installation of concrete mix, deployment, and proper compaction,
- assumptions to conduct proper care maturing element, especially in the control of temperature and humidity conditions for the maturing of concrete,
- supervising and correcting the accuracy of the temperature distribution inside the maturing element.

## 1. Wprowadzenie

Wykonywanie wielkogabarytowych betonowych konstrukcji masywnych jest złożonym procesem technologicznym wymagającym gruntownego zaprogramowania, będącego podstawą do realizacji wszystkich niezbędnych zabiegów zmierzających do uzyskania pełnowartościowego elementu, o zdefiniowanych przez projektanta właściwościach.

Największym zagrożeniem w trakcie betonowania jest możliwość powstania zimnych styków pomiędzy kolejnymi warstwami układanej mieszanki betonowej. Betonowanie takich elementów trwa nieprzerwanie od kilkunastu do kilkudziesięciu godzin, betonowanie poszczególnych warstw od kilku do kilkunastu godzin, a to znacznie przekracza czas początku wiązania dla betonów bez domieszki opóźniającej. Zimne styki są miejscami nieciągłości strukturalnej betonu i wytrzymałość na rozciąganie spada w nich do zera. Wpływają więc na obniżenie nośności konstrukcji oraz otwierają drogę czynnikiem agresywnym środowiska do wnętrza struktury materiału, inicjując procesy korozyjne, nawet na dużej głębokości przekroju elementu. Obniżają zatem trwałość konstrukcji.

Drugim istotnym zagrożeniem w wykonawstwie konstrukcji masywnych jest możliwość pęknięć i zarysowań betonu dojrzewającego w dużym bloku wskutek naprężeń wywołanych zróżnicowanymi odkształceniami termicznymi w różnych częściach uformowanego elementu. Od wnętrza następuje intensywne samonagrzewanie od ciepła wyzwalanego w trakcie egzotermicznych reakcji hydratyzującego cementu (rozszerzanie), od zewnątrz natomiast wychładzanie poprzez promieniowanie ciepła do zimniejszego otoczenia (kurczenie). Newralgiczny jest czas do momentu osiągnięcia maksymalnej temperatury wewnątrz bloku (trwa to przeciętnie do kilku dni od momentu zabetonowania elementu) oraz czas wychładzania bloku, który trwa przeciętnie kilkoma do kilkunastu dni. Im wcześniej wystąpi zagrożenie zróżnicowanymi odkształceniami (zbyt dużymi różnicami temperatur) w różnych częściach elementu, tym większe niebezpieczeństwo uszkodzenia – beton w tym czasie ma jeszcze stosunkowo niską wytrzymałość (także tą na rozciąganie), więc nie może przeciwstawić się szybciej rosnącym naprężeniom termicznym. Następuje wtedy pęknięcie elementu, dzieląc go na mniejsze części – zmienia się w ten sposób schemat statyczny konstrukcji, a może nawet spowodować całkowitą utratę funkcji elementu, np. gdy ma stanowić jednolitą masę tłumiącą drgania.

Innymi zagrożeniami wykonawstwa dużych masywnych elementów są: duża ilość jednorazowo wbudowywanego betonu (od kilkuset do nawet ponad dwudziestu tysięcy metrów sześciennych) i długi czas trwania tych robót (nawet do 5–7 dób). Po początkowej mobilizacji sił i środków, a nawet mentalnego podejścia realizującego to zadanie zespołu ludzkiego, przychodzi czas zmęczenia i znużenia ciągle powtarzającymi się operacjami i czynnościami. Część z nich zaczyna się pomijać lub upraszczać – np. kolejność zabudowy miejsc i warstw, kolejność i systematyczność procesów zagęszczania, systematyczność kontroli poszczególnych dostaw betonu – zwłaszcza pod osłoną nocy, gdy również czujność nadzoru jest znacznie zredukowana. Doprowadza się wtedy do lokalnych niejednorodności struktury materiału, czego efektem jest zróżnicowana wytrzymałość lub gęstość, różny skurcz betonu, a nawet raki, kawerny, pustki czy brak pełnego otulenia zbrojenia. Widoczne to jest po zdjęciu deskowania na powierzchni rozformowanego elementu, ale przecież jego wnętrze posiada podobne defekty, choćby w sąsiedztwie gęsto zbrojonych fragmentów konstrukcji. Niekiedy zbrojenie układane jest w czterech lub więcej warstwach, a w miejscach zmiany przekrojów często brakuje prześwitu pomiędzy prętami, niezbędnego do zagłębienia wibratora.

Sporą trudnością w początkowej fazie betonowania jest obserwacja rozkładania mieszanki betonowej w elemencie. Przy grubościach sięgających kilku metrów i przeszkodach w postaci gęstych siatek zbrojenia górnego i pośredniego, śledzenie równomiernego dozowania porcji betonu i późniejszego zagęszczania wymaga znacznego wysiłku zarówno ze strony bezpośrednich operatorów sprzętu, jak i osób odpowiedzialnych za nadzór robót. Problem ten nasila się w godzinach nocnych, kiedy trudno jest zapewnić równomierne oświetlenie frontu robót. Ustawienie reflektorów czy masztów oświetlających na pewno pomaga w polepszeniu widoczności, natomiast przeszkadza przy ciągłym przestawianiu ramienia pompy podającej mieszankę betonową.

Przedstawione powyżej zagrożenia potwierdzają, że proces technologiczny związany z wykonywaniem elementów masywnych musi być bardzo precyzyjnie przygotowany i ustalony w dokumentacji wykonawczej, a następnie zgodnie z nią prowadzony. Dokumentacja taka, czyli Projekt Technologiczno-Organizacyjny (POR), z zawartym w niej Programem Zapewnienia Jakości (PZJ), musi obejmować zakres prac przygotowawczych, zasadnicze procesy układania i zagęszczania betonu, a następnie zagadnienia związane z prawidłowo prowadzoną pielęgnacją, szczególnie tą termiczną. Zawierać musi także zagadnienia dotyczące kontroli jakości dostaw betonu oraz kryteria ich akceptacji. Takie przygotowanie zapewnia prawidłową organizację poszczególnych procesów. Z punktu widzenia znaczenia konstrukcyjnego takich elementów oraz nakładów związanych z ich wykonaniem, nie można sobie pozwolić nawet na odrobinę improwizacji, bo szkody z niej wynikające mogą się okazać bardzo kosztowne. Dlatego konieczne jest kompetentne, subtelne, ciągle nadzorowanie procesu realizacji, począwszy do etapu przygotowywana dokumentacji, aż do zakończenia zabiegów pielęgnacyjnych. Nadzór taki ma charakter naukowo-badawczy, gdyż oprócz czynności standardowych, wymaga stałego reagowania na zmieniające się warunki wykonawstwa i pielęgnacji, a tych nie da się precyzyjnie zaprognozować w perspektywie długoterminowej (2–4 tygodni).

## 2. Dokumentacja wykonawcza

Betonowanie masywnych wielkogabarytowych elementów konstrukcyjnych bezwzględnie wymaga przygotowania dokumentacji wykonawczej. Wynika to wprost z zapisów normy PN-EN 13670 [1] dotyczącej wykonywania konstrukcji betonowych, która powiązana jest bezpośrednio z normami do projektowania, czyli Eurokodami 2 i 4 [2, 3], oraz normą dotyczącą betonu jako materiału konstrukcyjnego PN-EN 206 [4].

Norma ta [1] ogólnie zakłada, że każde wykonawstwo konstrukcji betonowej ma być realizowane na podstawie kompletnego projektu konstrukcji (specyfikacji wykonawczej). Proponuje przy tym do wyboru, w zależności od znaczenia elementu (konstrukcji) z punktu widzenia bezpieczeństwa, dobór klasy wykonania spośród trzech:

- klasa wykonania 1,
- klasa wykonania 2,
- klasa wykonania 3.

Narzucają one wymagania dotyczące zarządzania jakością, przy czym zakres wymagań wzrasta od klasy 1 do klasy 3. Przewidywana do zastosowania klasa wykonania powinna być określona w specyfikacji wykonawczej.

**Klasa wykonania 1** może być stosowana jedynie dla konstrukcji, dla których konsekwencje awarii są małe lub pomijalne.

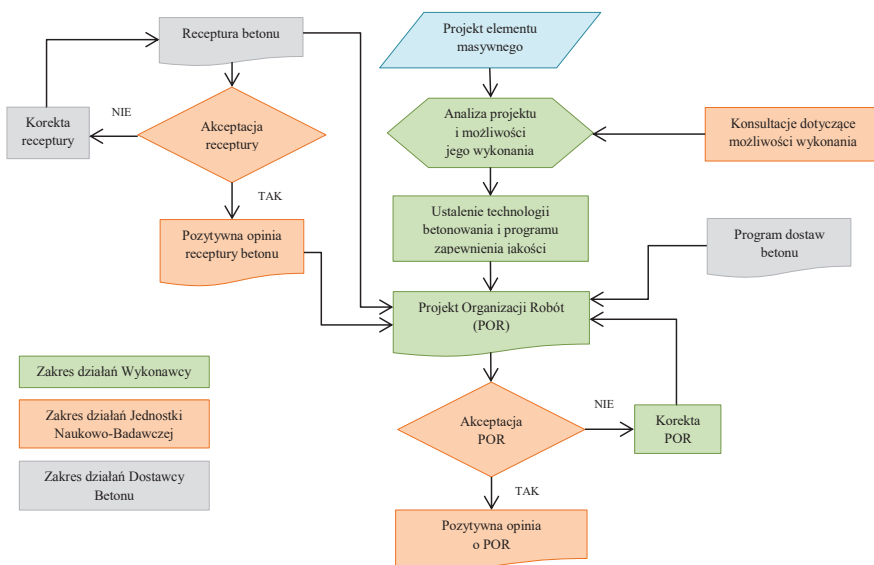
**Klasa wykonania 2** obejmuje ważne elementy konstrukcyjne. Ten poziom wykonania spełnia założenia projektowe normy PN-EN 1992 [3] w zakresie częściowych współczynników materiałowych.

**Klasa wykonania 3** powinna być dobierana dla robót betonowych mających znaczenie dla nośności i trwałości konstrukcji.

Analizując powyższe kryteria wyboru właściwej dla danej konstrukcji klasy wykonania można zdecydowanie stwierdzić, że elementy masowe przeważnie są tymi, które **mają znaczenie dla nośności i trwałości**, najczęściej bardzo istotne. Wniosek stąd prosty – należy wskazywać dla nich w specyfikacji klasę wykonania 3.

Adekwatnie do ustalonej klasy wykonania prowadzona jest w konsekwencji kontrola na odpowiednim poziomie. W klasie wykonania 1 – wystarczająca jest samokontrola wykonawcy, w klasie 2 – wystarczająca jest systematyczna kontrola wewnętrzna, natomiast w klasie 3 – wspomagana jest zewnętrzną kontrolą niezależną.

Istotą zarządzania jakością jest zapewnienie wykonywania konstrukcji zgodnie ze specyfikacją wykonawczą. Dlatego tak ważna jest dobrze i precyzyjnie przygotowana dokumentacja, by wszystkie detale mające wpływ na oczekiwany efekt końcowy były jasno zdefiniowane. Tylko wtedy można łatwo dysponować zadania bezpośrednim wykonawcom robót i prowadzić przejrzystą bieżącą kontrolę jakości – bo można egzekwować tylko to, co zostało wcześniej ustalone w specyfikacji. Na taki zakres robót jest też nastawiony wykonawca, bo ustalając warunki finansowe kontraktu, bazował na założeniach ze specyfikacji. Wtedy wszystkie roboty dodatkowe lub zmiana poziomu jakości stają się podstawą roszczeń ze strony wykonawcy.



Rys. 1. Schemat decyzyjny akceptacji POR

„Projekt Technologii i Organizacji Betonowania” konstrukcji masywnej jest elementem dokumentacji wykonawczej i w zasadzie powinien być przygotowany przez wykonawcę robót, a później zatwierdzony przez nadzór. Jeśli przygotowuje go wykonawca robót, to

można oczekiwać, że będzie on zawierał rozwiązania optymalne, adekwatne do jego możliwości sprzętowo-osobowych. Każdy taki projekt, oprócz informacji formalnych i ogólnych dotyczących konstrukcji, powinien zawierać rozdziały dotyczące:

- technologii betonowania konstrukcji (elementu),
- monitoringu temperatury,
- pielęgnacji betonu,
- kontroli jakości mieszanki betonowej i betonu.

**Rozdział dotyczący technologii betonowania** powinien opisywać wszystkie operacje, czynniki i ograniczenia związane z prawidłowym procesem prowadzenia robót. Dlatego, powinien zawierać ustalenia odnośnie:

- **receptury betonu**, z potwierdzonymi badaniami wstępnymi właściwościami – zarówno mieszanki betonowej, jak i betonu stwardniałego. Receptura ta powinna podlegać osobnemu, wcześniejszemu, zatwierdzeniu przez nadzór. Głównym zagrożeniem w wykonawstwie masywnych elementów betonowych jest termika w trakcie dojrzewania, w związku z tym w recepturze musi być podana informacja o wartości ciepła hydratacji zastosowanego cementu. Na podstawie tych informacji ma być wyliczony przewidywany wzrost temperatury  $\Delta t$  wewnątrz dojrzewającego elementu oraz oszacowana temperatura maksymalna  $t_{max}$ , po uwzględnieniu przewidywanych temperatur wbudowywanej mieszanki betonowej oraz przewidywanych temperatur otoczenia wykonanej konstrukcji. Uwzględniając gabaryty elementu masywnego powinien być określony czas  $T_{t,max}$  [w dobach] wystąpienia maksymalnej temperatury od momentu rozpoczęcia betonowania. Informacje te pozwolą na zaprogramowanie właściwej pielęgnacji termicznej dojrzewającego w elemencie betonu. Istotnym parametrem mieszanki betonowej jest jej czas przerobu, który może być dość szeroko i jednocześnie dość precyzyjnie sterowany dozowaniem domieszki opóźniającej – w szczególnych przypadkach można (lub trzeba) go wydłużyć nawet do kilkudziesięciu godzin. Zapobiega się wtedy problemom związanym z wydłużonym czasem transportu (np. korki w godzinach szczytu), przestojami związanymi z awariami, eliminując możliwość powstania zimnych styków pomiędzy poszczególnymi warstwami wbudowywanej mieszanki. Znacząco można w ten sposób wspomóc zabiegi pielęgnacji termicznej, gdyż odsuwa się w czasie moment wystąpienia maksymalnej temperatury w elemencie, przy jednoczesnym jej niewielkim obniżeniu.
- **produkcji i dostarczania mieszanki betonowej na budowę**, gdzie powinna być ustalona szczegółowa logistyka dostaw betonu. Ta część projektu w zasadzie powinna być opracowana przez dostawcę betonu. Uwzględniając jego możliwości produkcyjne oraz możliwości w zakresie tempa wbudowywania mieszanki betonowej na obiekcie, ustala się ilość węzłów betoniarskich biorących udział w dostawie. Informacje muszą zawierać dane techniczne węzłów, a w szczególności ich realne wydajności ustalone na podstawie założeń technologicznych dotyczących wymaganego czasu mieszanka składników betonu. Ustalone mają być trasy dojazdu betonowozów na budowę oraz czas ich trwania, z uwzględnieniem zmieniającego się natężenia ruchu drogowego w ciągu doby – niekiedy w przedsięwzięciu bierze udział kilka węzłów (np. 6), a trasy dojazdu osiągają dystans kilkudziesięciu kilometrów. Adekwatnie do wydajności każdego węzła musi być dla niego dobrana odpowiednia liczba betonowozów, aby zapewnić zaplanowaną ciągłość dostaw. Harmonogram pracy węzłów ma być skoordynowany w taki sposób, aby konieczne przerwy konserwacyjno-obsługowe nie pokrywały się i nie powodowały nieciągłości dostaw na budowę. Zawsze, oprócz sprzętu i środków zaangażowanych bezpośrednio w dostawy, powinny być przewidziane zapasowe

węzły produkcyjne i zapasowe środki transportu, z określonym możliwym czasem włączenia ich w normalny obieg technologiczny (np. do 2 godzin).

- transportu betonu w obrębie budowy, który wymaga ustalenia rodzaju i ilości sprzętu transportującego oraz jego ustawienia względem betonowanej konstrukcji. Ta część projektu z reguły opracowywana jest przez dostawcę betonu w ścisłym porozumieniu z wykonawcą robót, z uwagi na konieczność skoordynowania dostępności powierzchni potrzebnych do ustawienia pomp oraz możliwości wykorzystania dróg wewnętrznych budowy. Z uwagi na olbrzymie ilości wbudowywanego betonu, zasadniczo do przemieszczania mieszanki betonowej po rozładowaniu betonowozów używa się pomp. Nie zawsze jednak, pomimo dysponowania już pompami o wysięgu 72 m i więcej, możliwe jest ogarnięcie całej powierzchni betonowanego elementu – często ma na to wpływ także brak możliwości ustawienia pompy blisko wykonywanej konstrukcji. „Martwe pola” wysięgników pomp muszą być wyznaczone, a w tych miejscach można się wspomagać rurociągami, podajnikami pośrednimi (tzw. pajakami) lub kosztami podawanymi przy użyciu żurawi – wydajność robót jednak w tych przypadkach znacząco spada.
- technologii betonowania, obejmującej procesy bezpośredniego rozkładania, układania, wbudowywania i zagęszczania mieszanki betonowej w formowanym elemencie. Na podstawie właściwości reologicznych mieszanki betonowej (urabialność, utrata urabialności w czasie, czas przerobu, początek wiązania) ustala się sposób jej układania w kolejnych warstwach oraz kolejność układania w obrębie każdej warstwy. Grubość każdej warstwy nie może być większa niż 40 cm. Ustala się także kolejność włączania do pracy poszczególnych pomp, a z końcem betonowania kolejność ich wyłączenia z pracy. Podczas wpompowywania mieszanki betonowej należy określić maksymalne odległości od poszczególnych miejsc wprowadzenia węża pompy – przeważnie 2,5 do 3,0 m (aby zapobiec niekontrolowanemu przepływowi mieszanki), oraz maksymalną wysokość swobodnego spadania mieszanki betonowej do formowanej powierzchni – nie więcej niż 1,0 m. Wąż pompy powinien być swobodnie wprowadzany pod zbrojenie górne poprzez wcześniej przygotowane i oznakowane farbą jaskrawego koloru otwory pomiędzy prętami górnej siatki. W projekcie musi być podany sposób zagęszczania oraz sprzęt potrzebny do jego realizacji. Najczęściej wskazuje się do użycia wibratory wgłębne buławowe w ilości po dwie sztuki na pompę, z rezerwą co najmniej jednego. Przy elementach bardzo wysokich o skomplikowanym kształcie (powyżej 4 m) można dodatkowo zadysponować wibratory przyczepne mocowane do deskowania. Zagłębianie buławy wibratora powinno być prowadzone systematycznie w odległościach 50 do 70 cm na głębokość zapewniającą penetrację we wcześniej ułożoną warstwę co najmniej 10 do 15 cm. Wprowadzenie buławy w mieszankę powinno nastąpić szybko, natomiast wyciąganie wolno i jednostajnie, bez ponownego zagłębiania. Nie wolno używać wibratora do rozkładania mieszanki betonowej, dlatego zagęszczanie powinno być prowadzone dopiero po przestawieniu pompy do kolejnego miejsca i rozpoczęciu podawania mieszanki. Czas wibrowania należy określić doświadczalnie poprzez obserwację efektów zagęszczania – na tyle długo by przestały wydobywać się pęcherzyki powietrza, ale nie dłużej niż początek segregacji mieszanki. Przy konsystencjach ciekłych przeważnie wystarczający czas to 7 do 15 sekund. Należy unikać zetknięcia się buławy ze zbrojeniem lub powierzchnią deskowania. Wbudowywanie mieszanki betonowej powinno być zakończone wyrównaniem powierzchni, a w momencie rozpoczęcia procesu wiązania zatarciem – unika się wtedy efektów skurczu plastycznego betonu w postaci zarysowań powierzchniowych.



- warunków wbudowywania mieszanki betonowej w konstrukcję, określających brzegowe warunki atmosferyczne, przy których proces betonowania może być rozpoczęty, a następnie prowadzony, a także minimalną wymaganą temperaturę wbudowywanej mieszanki betonowej. W przypadku przewidywanych robót betonowych w okresie zimowym, na podstawie długoterminowych prognoz pogody, należy ustalić akceptowalny poziom minimalnych temperatur pozwalających na ich rozpoczęcie. Dla betonowań masywnych konstrukcji należy unikać konieczności dostawy podgrzewanej mieszanki betonowej. Żaden węzeł betoniarski, praktycznie pracujący na maksymalnej wydajności, nie jest w stanie dostarczać w sposób ciągły podgrzewanej mieszanki o jednorodnej i ustabilizowanej temperaturze. Jako minimalna temperatura mieszanki betonowej w momencie dostawy powinna być ustalona wartość podawana przez normę PN-EN 13670 [1], czyli 5°C. Z punktu widzenia problemów termicznych w dojrzewającym betonie, wartość tę można uznać za optymalną – im bliższa 5°C temperatura mieszanki w trakcie wbudowywania, tym lepsze startowe warunki termiczne w wykonywanym elemencie. Dlatego najlepszym okresem realizacji konstrukcji masywnych jest pora wiosenna lub jesienna. Z kolei w przypadku przewidywanych robót betonowych w okresie letnim, a zwłaszcza upalnym, powinny być zdefiniowane wartości maksymalnych temperatur zarówno otoczenia, jak i mieszanki betonowej. Odnośnie maksymalnej temperatury mieszanki betonowej – wartość 25°C należy uznać za graniczną, aczkolwiek jest możliwe zmodyfikowanie właściwości mieszanki domieszkami w taki sposób, aby była wystarczająco urabialna i dostatecznie długo przerabialna przy temperaturach wyższych. Oprócz warunków temperaturowych prowadzenia robót należy przeanalizować zagrożenia od innych czynników atmosferycznych – intensywnych opadów (deszczu, śniegu), silnych wiatrów, oblodzenia, możliwość wystąpienia burz – „wada” betonowania wielkogabarytowych elementów masywnych jest to, że jak się zaczyna betonowanie, to bez przerw roboczych trzeba je kontynuować, nawet przez 6 do 7 dni.
- niezbędnych zasobów ludzkich i sprzętowych, zapewniających ciągły, nieprzerwany proces wbudowywania mieszanki betonowej na każdym ze stanowisk, na którym się już rozpoczął. Dla każdej pompy do betonu (lub stanowiska betonowania) powinna być przypisana oddzielna brygada, w której wyznaczone mają być osoby do rozkładania (minimum 2) i zagęszczania (minimum 3) betonu. Każda brygada powinna być wyposażona w 2 wibratory + jeden zapasowy. Wspólnie, dla obsługi wszystkich brygad, trzeba wyznaczyć osoby (minimum 2) do stałego czyszczenia przy pomocy ostrych, twardych szczotek górnej siatki zbrojenia z przyklejonych porcji mieszanki betonowej. Stały dyżur musi pełnić też elektryk odpowiedzialny za bezawaryjne zasilanie wszystkich stanowisk roboczych. Front robót musi być właściwie oświetlony przez cały czas trwania betonowania. Wymiana osób na poszczególnych stanowiskach roboczych ma przebiegać w sposób płynny, także w czasie przerw na posiłki. Po rozłożeniu ostatniej warstwy zadania brygad rozkładających i zagęszczających mieszankę płynnie przechodzą w zadania związane z zacieraniem betonu i jego pielęgnacją – rozkładanie folii, izolacji termicznej, zraszanie betonu wodą.
- nadzoru, którego zadaniem jest kontrola prawidłowości przebiegu wszystkich operacji technologicznych, ale też przede wszystkim pomoc w korygowaniu nieprawidłowości i przy rozwiązywaniu pojawiających się problemów technicznych. Projekt powinien zawierać schemat organizacyjny powiązań pomiędzy wykonawcami, podwykonawcami, dostawcami i nadzorem (w tym laboratoryjnym) na poszczególnych szczeblach zarządzania realizacją zadania. Wszystkie osoby odpowiedzialne za wykonawstwo



i nadzór nad nim powinny być wymienione wraz z danymi kontaktowymi w celu zapewnienia prawidłowej komunikacji pomiędzy nimi. Schemat ma zawierać pełny skład obsady osób zarządzających i nadzorujących na każdej zmianie roboczej w trakcie betonowania konstrukcji.

**Rozdział projektu dotyczący monitoringu temperatury** ma zawierać szkic usytuowania sond pomiarowych. Liczba miejsc pomiarowych, jak również liczba czujników zainstalowanych w poszczególnych miejscach uzależnione są od wymiarów elementu w planie oraz jego grubości. Zależy też od planowanego czasu trwania betonowania i jego technologii. Jako minimalną liczbę miejsc pomiarowych należy przyjąć trzy. Pierwsze – w środkowej części elementu, najlepiej w maksymalnej grubości, gdzie należy się spodziewać najwyższej maksymalnej temperatury jaka zostanie wygenerowana od reakcji hydratacji cementu w całym elemencie. Drugie – w pobliżu boku elementu (do ok. 50 cm od płaszczyzny deskowania), gdzie dochodzi do wychładzania betonu poprzez dodatkową ekspozycję powierzchni bocznej deskowania. Trzecie – w pobliżu naroża elementu – gdzie wychładzanie następuje poprzez dwie boczne ściany deskowania. Z kolei w każdym z tych miejsc powinny znajdować się co najmniej trzy czujniki temperatury na grubości elementu – jeden pośrodku (maksymalna temperatura w tym miejscu pomiarowym), jeden blisko powierzchni (do ok. 15 cm od powierzchni górnej – emisja ciepła przez powierzchnię górną) oraz jeden blisko powierzchni dolnej (do ok. 15 cm od powierzchni dolnej – emisja ciepła do gruntu lub przez powierzchnię dolną do otoczenia, jeśli element nie jest fundamentem). W przypadku bardzo grubych elementów (powyżej 2,5 m) zagęszcza się czujniki w środkowej części. Z reguły, zwłaszcza w betonowaniach zimowych, umieszcza się dodatkowy czujnik na powierzchni betonu, a pod izolacją termiczną. Oczywiście zawsze jest jeden dodatkowy czujnik do rejestracji temperatury otoczenia elementu.

W przypadku elementów, których betonowanie trwa dłużej niż dwie doby konieczne staje się instalowanie sond pomiarowych w większej ilości miejsc, bo konieczna jest informacja o osiągnięciu maksymalnych temperatur w poszczególnych częściach elementu. Z kolei w przypadku elementów ażurowych, może być konieczne zainstalowanie dodatkowych sond w miejscach newralgicznych – grubsze/cieńsze elementy belkowe, wyeksponowane na emisję ciepła w każdym kierunku, mogą być narażone na szybsze wychładzanie.

Częstotliwość pomiarów w przypadku rejestracji automatycznej przyjmowana jest z reguły co 30 minut, z analizą wyników do momentu osiągnięcia maksymalnej temperatury 3 do 4 razy dziennie, a później 2 do 3 razy dziennie. W przypadku odczytów ręcznych, częstotliwość rejestracji temperatur pokrywa się z częstotliwością analizy wyników pomiarów. Jeśli wokół dojrzewającego elementu panują ustabilizowane warunki pogodowe, to można częstotliwość powyższe zmniejszyć.

**Rozdział dotyczący pielęgnacji betonu** ustala zasady prawidłowego przebiegu procesu dojrzewania wbudowanego betonu. Pielęgnacja wilgotnościowa ma zapewnić prawidłowy przebieg procesów hydratacji cementu, natomiast pielęgnacja termiczna ma zapewnić równomierne rozłożenie pól temperatur, tak by nie dopuścić do powstania zbyt dużych różnic temperatury wewnątrz elementu. Kryteriami prawidłowego rozkładu temperatury są graniczne wartości gradientu pomiędzy punktami, w których prowadzone są pomiary temperatury, wyrażone w stopniach na metr odległości. Gradienty o wartości  $\leq 15^{\circ}\text{C}/\text{m}$  uważa się za doskonałe, większe od 15 a  $\leq 20^{\circ}\text{C}/\text{m}$  jako dobre z małym ryzykiem uszkodzeń termicznych, większe od 20 a  $\leq 25^{\circ}\text{C}/\text{m}$  dopuszczalne z dużym ryzykiem uszkodzeń termicznych, natomiast większe od  $25^{\circ}\text{C}/\text{m}$  jako krytyczne, mogące wywołać

zarysowania i spękania lub pęknięcia elementu konstrukcyjnego. W celu zapobiegania powstawania zbyt dużych gradientów, najczęściej ostatnio stosowaną metodą jest maksymalne możliwe zredukowanie ciepła hydratacji betonu poprzez wypracowanie odpowiedniej receptury, dla której ta właściwość powinna być priorytetowa. Następnie tak steruje się zatrzymywaniem i wypuszczaniem ciepła emitowanego przez powierzchnie zewnętrzne elementu, aby doprowadzić do zrównania temperatur w poszczególnych miejscach elementu. Realizuje się to przez osłanianie i odkrywanie poszczególnych partii powierzchni betonu wierzchniego, lub także deskowań bocznych, materiałem izolacji termicznej (najczęściej styropianem, folią bąbelkową, rzadziej wełną mineralną). Optymalną grubością płyt styropianowych, niezależnie od pory roku, jest 5 cm. Jest to grubość wystarczająca do ochrony termicznej, a jej zaletą jest możliwość wielokrotnego użycia. Przy cieńszych płytach, z reguły ulegają uszkodzeniu w trakcie pielęgnacji elementu. Powierzchnie boczne betonu, osłonięte deskowaniem, trudno jest docieplić materiałem izolacyjnym. Dlatego częściej zaleca się wykonanie osłon brezentowych w postaci namiotów i podgrzewanie tych stref przy użyciu nagrzewnic.

Sterowanie i podejmowanie decyzji związanych z osłanianiem betonu bądź jego odkrywaniem, włączaniem nagrzewnic bądź ich wyłączeniem, prowadzone ma być przez osoby odpowiedzialne za nadzór nad pielęgnacją. Prowadzi się ją na podstawie analizy przebiegu temperatur w poszczególnych punktach pomiarowych. Najbardziej odpowiedzialny okres pielęgnacji to czas do osiągnięcia maksymalnej temperatury w elemencie. Jest on szczególnie ważny, gdyż – po pierwsze: w tym czasie zmiany temperatur zachodzą najbardziej dynamicznie, po drugie: beton w tym okresie jest najsłabszy, więc najbardziej podatny na uszkodzenia wywołane naprężeniami wewnętrznymi. Ogólny czas trwania nadzoru nad nagrzewaniem i chłodzeniem elementu jest uzależniony od wielu czynników, w tym od warunków temperaturowych otoczenia. Przeważnie trwa od 2 do 4 tygodni. Decyzję o zakończeniu pielęgnacji termicznej podejmuje nadzór odpowiedzialny za jej przebieg.

Projekt powinien też określać sposób i czas prowadzenia pielęgnacji wilgotnościowej. Dobiera się je na podstawie zapisów normy PN-EN 13670 [1], a rozpoczyna się od zdefiniowania klasy pielęgnacji. Tak jak wyżej opisano, z uwagi na ważność takich elementów masywnych dobiera się najwyższą klasę wykonawstwa, jak również dobiera się również najwyższą klasę pielęgnacji, czyli klasę 4. Dla niej, na podstawie tabeli normowej (tabela 1), ustala się czas jej trwania. Jeśli chodzi o sposób prowadzenia ochrony betonu przed utratą wilgoci, najlepiej jest przykryć powierzchnie nieosłonięte deskowaniem włókniną igłowaną i folią polietylenową. W zasadzie to powinno być wystarczające, bo i tak na wierzchu jest dodatkowa warstwa osłaniająca z materiału termoizolacyjnego. Jeśli jest konieczne nawilżanie powierzchni, zwłaszcza w początkowym okresie dojrzewania, to należy to wykonywać poprzez zraszanie, a nie polewanie, by nie dopuścić do uszkodzeń powierzchni szokiem termicznym od zimnej wody. Różnica temperatury wody do zraszania i powierzchni betonu nie powinna być większa niż 10°C.

Tabela 1. Minimalny czas pielęgnacji betonu dla klasy pielęgnacji 2 {3} [4] – odpowiadający przyrostowi przypowierzchniowej wytrzymałości betonu równemu 35% [50%] [70%] projektowanej 28-dniowej wytrzymałości charakterystycznej (wg PN-EN 13670 [1])

Temperatura powierzchni betonu $t$ (°C)	Minimalny czas pielęgnacji betonu (dni)		
	Rozwój wytrzymałości betonu		
	$r = (f_{cm2}/f_{cm28})$		
	szybki $r \geq 0,50$	średni $0,50 \geq r \geq 0,30$	wolny $0,30 \geq r \geq 0,15$
$t \geq 25$	1,0 {1,5} [3]	1,5 {2,5} [5]	2,5 {3, 5} [6]
$25 > t \geq 15$	1,0 {2,0} [5]	2,5 {4} [9]	5 {7} [12]
$15 > t \geq 10$	1,5 {2,5} [7]	4 {7} [13]	8 {12} [21]
$10 > t \geq 5$	2,0 {3,5} [9]	5 {9}[18]	11 {18} [30]

**Rozdział projektu dotyczący kontroli jakości mieszanki betonowej i betonu** powinien precyzyjnie określać zakres badanych właściwości mieszanki betonowej i betonu, częstotliwość badań oraz kryteria oceny. Najważniejsze jest w nim rozróżnienie kompetencji w zakresie prowadzonych badań. Bezwzględnie obowiązkowe są badania wykonywane przez producenta betonu w ramach prowadzonej przez niego kontroli zgodności. Zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 206 [4] powinny one być realizowane w miejscu dostawy i z częstotliwością określoną w normie.

Badania wykonywane przez odbiorcę betonu (wykonawcę robót, podwykonawcę, nadzór) z punktu widzenia normy PN-EN 206 [4] nie są obowiązkowe, ale uwzględniając przyjętą najwyższą klasę wykonawstwa 3 według PN-EN 13670 [1] stają się obowiązkowe, gdyż konieczny jest w tej klasie nadzór i kontrola niezależna. Ten rodzaj badań (wykonywanych nie przez producenta) określony jest w normie PN-EN 206 [4] jako badania identyczności. Wymagają one ustalenia programu badań oraz wskazania kryteriów oceny, gdyż te zależą od rodzaju nadzoru nad produkcją betonu – certyfikowana/niecertyfikowana. Te badania także wykonuje się w miejscu dostawy, a najlepiej gdy realizowane są przez laboratorium o kompetencjach potwierdzonych certyfikatem akredytacji.

Ustalając program badań identyczności w zakresie wytrzymałości na ściskanie trzeba zwrócić uwagę, że ocenie podlega określona partia dostawy, którą trzeba w projekcie zdefiniować. Istotną różnicą w pobieraniu próbek w stosunku do oceny zgodności jest definicja wyniku stanowiącego podstawę oceny – każdy wynik jest średnią z badania co najmniej dwóch próbek.

W zależności od ważności wykonywanego elementu, oraz liczby zaangażowanych podmiotów w jego realizację, badanie identyczności może być prowadzone przez więcej niż jedną stronę i każde z nich może być badaniem niezależnym – np. przez generalnego wykonawcę, podwykonawcę, laboratorium zaangażowane przez nadzór inwestorski.

### 3. Roboty przygotowawcze

Przed rozpoczęciem betonowania elementu masywnego muszą zostać zakończone wszystkie roboty związane z montażem deskowania oraz zbrojenia wraz z markami i elementami wyposażenia konstrukcji na stałe wbudowywanymi w beton. W deskowaniu mogą zostać wymontowane (po wcześniejszym dopasowaniu) elementy tworzące otwory technologiczne, np. komunikacyjne lub ułatwiające wyprowadzenie nadmiaru wody zbierającej się na powierzchni formowanego elementu. Deskowanie i zbrojenie powinno być oczyszczone z wszelkich materiałów odpadowych i śmieci. W warunkach zimowego betonowania trzeba zapewnić usunięcie pozostałości lodu, śniegu, nie można układać betonu na zamrzniętym podłożu. W warunkach z kolei letniego betonowania konieczne jest bieżące zwilżanie deskowania i zbrojenia. Na zbrojeniu powinny być rozłożone ścieżki komunikacyjne z desek lub sklejki.

W górnym zbrojeniu muszą być przygotowane otwory umożliwiające wprowadzenie węża pompy, tak aby mieszanka betonowa nie spadała z większej wysokości niż 1 m. Należy je wykonać poprzez poluzowanie prętów, które przed betonowaniem ostatniej warstwy zostaną ostatecznie dowiązane. Światło otworów najlepiej sprawdzić przy pomocy rury o średnicy równej co najmniej średnicy węża pompy. Otwory powinny być rozmieszczone w miarę możliwości regularnie, w odstępach nie większych niż 3 m. Należy je trwale oznaczyć jaskrawą farbą, by były wyraźnie widoczne także w nocy, aż do betonowania ostatniej warstwy. W przypadku występowania zagęszczenia prętów poziomych lub ukośnych wewnątrz elementu, należy unikać takiego sytuowania otworów, by mieszanka musiała pokonywać tak gęstą siatkę zbrojenia – trzeba zapewnić by mieszanka betonowa najpierw miała w tych miejscach możliwość podplynięcia z boku i od spodu zbrojenia.



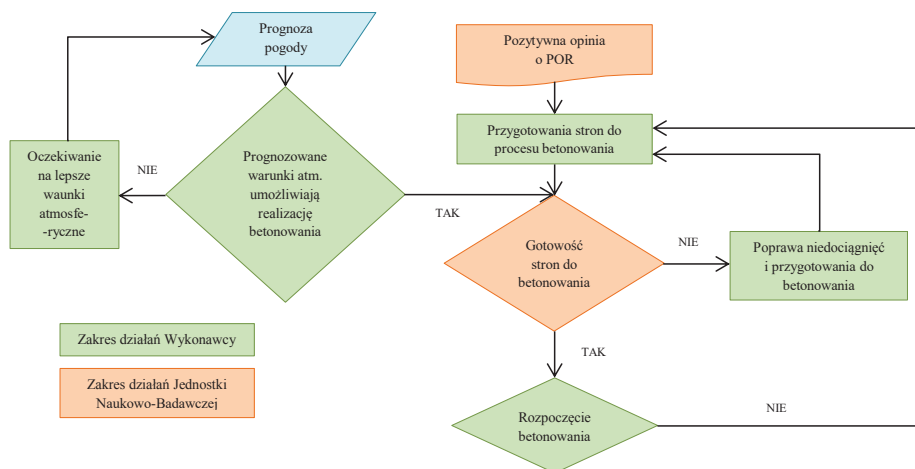
Fot. 1. Konieczność przygotowania miejsc do wprowadzenia węża pompy

W odległościach kilkunastometrowych na prętach pionowych zbrojenia konieczne jest zaznaczenie przy pomocy farby lub taśmy samoprzylepnej poziomów poszczególnych warstw zabudowy mieszanki betonowej ustalonych w projekcie wykonawczym.

W ramach robót przygotowawczych konieczne jest skompletowanie właściwych ilości sprzętu (wraz z zapasowym) – od pomp poczynając, poprzez wibratory, listwy

wibracyjne, zacieraczki mechaniczne, instalację wody do zabiegów pielęgnacyjnych wraz z końcówkami do zraszania, lampy do oświetlenia nocnego. Zgromadzony ma być także w wystarczających ilościach materiał do zabiegów pielęgnacyjnych – folia, włóknina, styropian lub wełna mineralna.

Stanowisko laboratoryjne (stanowiska, jeśli jest więcej niezależnych dróg dojazdowych) powinno być zlokalizowane w takim miejscu, aby po badaniach każdego betonowozu i akceptacji dostawy, następowało z tego miejsca zadysponowanie rozładunku na poszczególne stanowiska pomp.

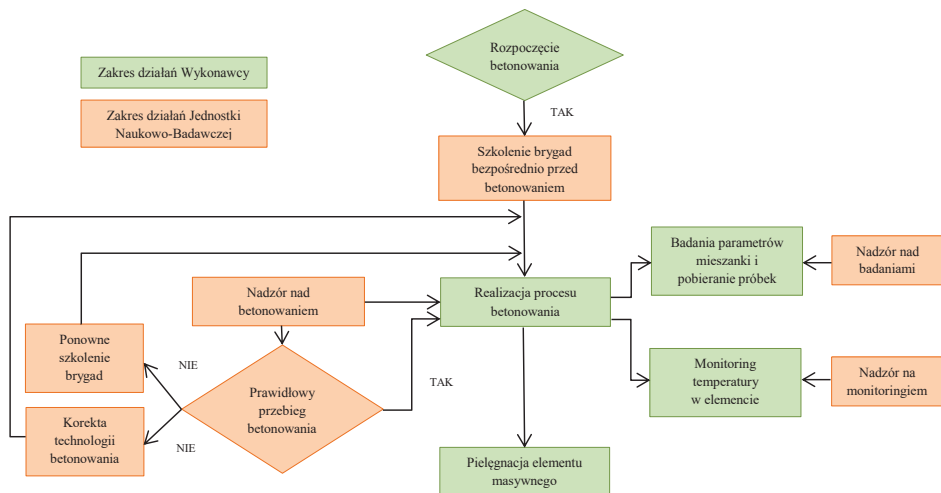


Rys. 2. Schemat decyzyjny dla robót przygotowawczych

Bezpośrednio przed rozpoczęciem betonowania powinno być przeprowadzone szkolenie stanowiskowe wszystkich brygad. Celem jest ostateczne zapoznanie z aktualnym planem betonowania, przypomnienie podstawowych zasad technologicznych obejmujących rozkładanie i zagęszczanie mieszanki betonowej, a także przypomnienie podstawowych zasad bhp w trakcie prowadzenia robót. Uczestniczyć w nim powinni także operatorzy pomp oraz bezpośredni nadzór ze strony wykonawcy robót.

## 4. Wbudowywanie betonu i wykańczanie powierzchni

Wbudowywanie mieszanki betonowej powinno się odbywać ściśle według kolejności i zasad przedstawionych w projekcie wykonawczym. Pozornie wydaje się to zadanie proste, ale obserwacja układanych pasm i warstw z dystansu kilku metrów grubości elementu, zakłócona dodatkowo widokiem przeplatających się prętów zbrojenia lub cieniami w porze nocnej, przysparza wiele kłopotów. Jest to szczególnie trudne przy formowaniu pierwszych warstw betonu. Dlatego najlepiej, dla zachowania jednakowej grubości warstw, trzymać się zasady, by rozładunek jednego betonowozu podzielony był na mniej więcej trzy równe części. Przy rozstawie otworów wprowadzania węża pompy co ok. 3 m, zapewnią to zabudowę warstwy o grubości ok. 30 do 40 cm.



Rys. 3. Schemat decyzyjny realizacji betonowania

Dużym utrudnieniem w kontroli równomiernego rozkładania mieszanki betonowej jest też zachowanie się mieszanki betonowej. Obecnie, z reguły stosuje się mieszanki bardzo ciekłe, upłynnione superplastyfikatorami polikarboksyłanowymi o długim czasie działania, a dodatkowo jeszcze opóźnione domieszkami opóźniającymi do nawet 20–30 godzin. Efekt jest taki, że mieszanka wbudowywana w kolejne wyższe warstwy ma skłonności do płynięcia. Tym bardziej jeśli wzbudzona jest energią od uderzeń wpompowywanych porcji mieszanki lub energią od wibratorów. Do takich przepływów nie można absolutnie dopuszczać, by nie doprowadzić do segregacji składników betonu. Niestety, ta właściwość mieszanki często prowokuje betoniarzy do „ułatwienia” sobie pracy i wpompowywania dużych ilości mieszanki w jedno miejsce, bo przecież ona sama się rozplynie. Zdarza się nawet, że wspomagają to płynięcie wibratorami umieszczonymi w miejscu wbudowywania mieszanki – a przecież wibratory służą wyłącznie do jej zagęszczania, a nie do rozkładania.

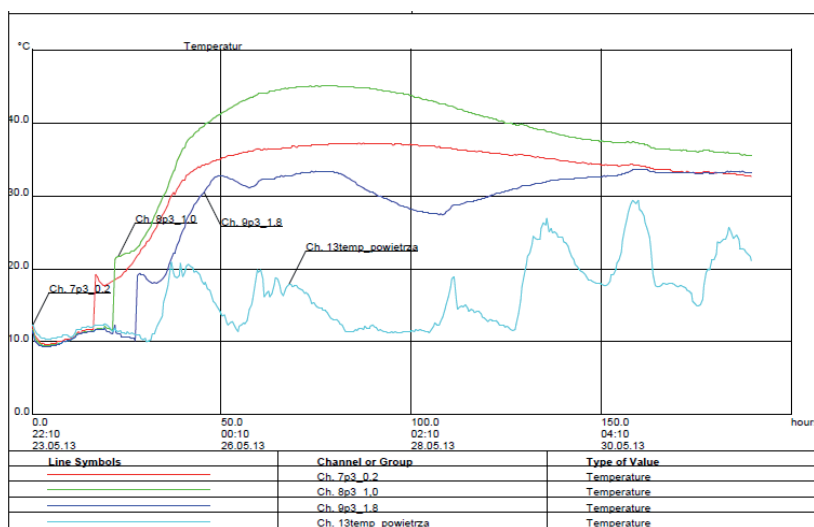
Wskazane jest nieco opóźnić układanie ostatniej warstwy (uwzględniając możliwości mieszanki betonowej), by pozwolić na osiadnięcie warstw wcześniejszych – zmniejszony zostanie skurcz plastyczny powodowany wyciskaniem wody zarobowej z warstw głębszych. Po zabudowie warstwy ostatniej, wierzchniej, należy ją wyrównać przy pomocy łąt wibracyjnych, a po odczekaniu do momentu jej tężenia, przystąpić do zacierania mechanicznego. Możliwość zacierania potwierdzona jest tzw. „testem buta” – jeśli pod naciskiem buta nie następuje jego tonięcie w mieszance, a jedynie pozostawia ślad zagłębienia od bieżnika. Zatarcie powierzchni betonu nie jest zabiegiem maskującym zarysowania skurczu plastycznego, ale go eliminującym.

Na zatartej, twardej powierzchni elementu niezwłocznie rozkłada się włókninę, nasącza ją wodą o odpowiedniej temperaturze, przykrywa folią i przystępuje do prowadzenia pielęgnacji termicznej. W przypadku betonowań zimowych z reguły od razu pokrywa się warstwą izolacji termicznej, w okresie letnim można to zrobić z małym opóźnieniem.



## 5. Pielęgnacja temperaturowa i wilgotnościowa

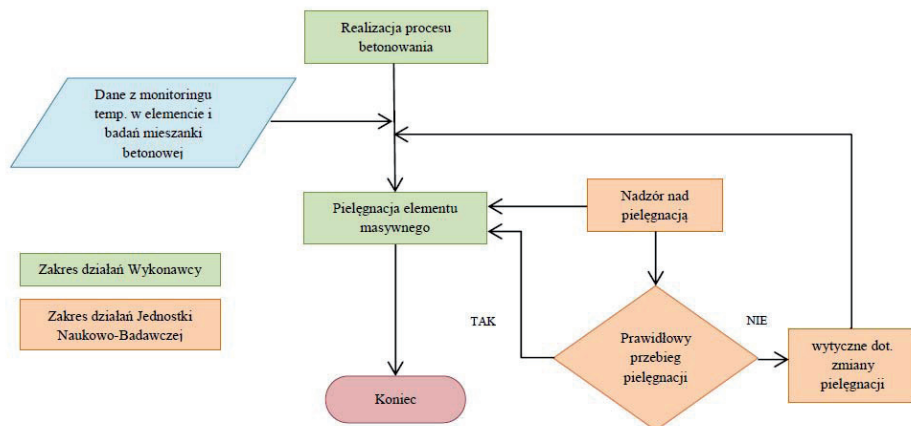
Uzyskiwane z monitoringu temperatur (w różnych miejscach elementu i w różnych punktach jego przekroju) dane (rys. 4) są podstawą do podejmowania decyzji w zakresie docieplania lub odsłaniania poszczególnych stref powierzchni elementu. Celem tych operacji jest w początkowej fazie zrównoważenie temperatur wewnątrz dojrzewającego elementu. Energia cieplna wyzwalana w wyniku reakcji chemicznych procesu hydratacji cementu ogrzewa element od środka. W miarę podwyższania się temperatury zwiększa się ilość wyzwalanego ciepła. W tym samym czasie następuje powierzchniowe wychładzanie elementu – bezpośrednio z powierzchni górnej (ograniczone izolacją), poprzez materiał deskowania ścian bocznych (ograniczone izolacyjnością deskowania, w dół do gruntu (lub deskowania). Ograniczenie tej emisji ciepła materiałem izolacyjnym powoduje wyrównywanie się temperatur w poszczególnych częściach elementu. Właśnie to sterowanie izolacyjnością powierzchni emitujących ciepło ma być prowadzone w taki sposób i w takim zakresie, by nie dopuścić do powstania gradientu temperatury większego niż dopuszczony projektem wykonawczym.



Rys. 4. Przykład rzeczywistych danych z monitoringu temperatury w jednym miejscu pomiarowym, na różnych wysokościach przekroju elementu

Po osiągnięciu temperatury maksymalnej (po 3 do 7 dniach w zależności od kształtu i gabarytów elementu, a także receptury betonu) rozpoczyna się proces wychładzania, który w dalszym ciągu musi być kontrolowany w zakresie gradientów temperatury. Z czasem jednak zagrożenie jest coraz mniejsze, gdyż również z czasem narasta wytrzymałość betonu – staje się on coraz bardziej odporny na naprężenia rozciągające wywołane zjawiskami termicznymi wewnątrz elementu. Pielęgnację termiczną prowadzi się do momentu eliminacji zagrożenia wystąpienia nadmiernego gradientu temperatur. W zależności od kształtu i gabarytów elementu, składu betonu, warunków zewnętrznych, może ona trwać nawet do trzech tygodni.





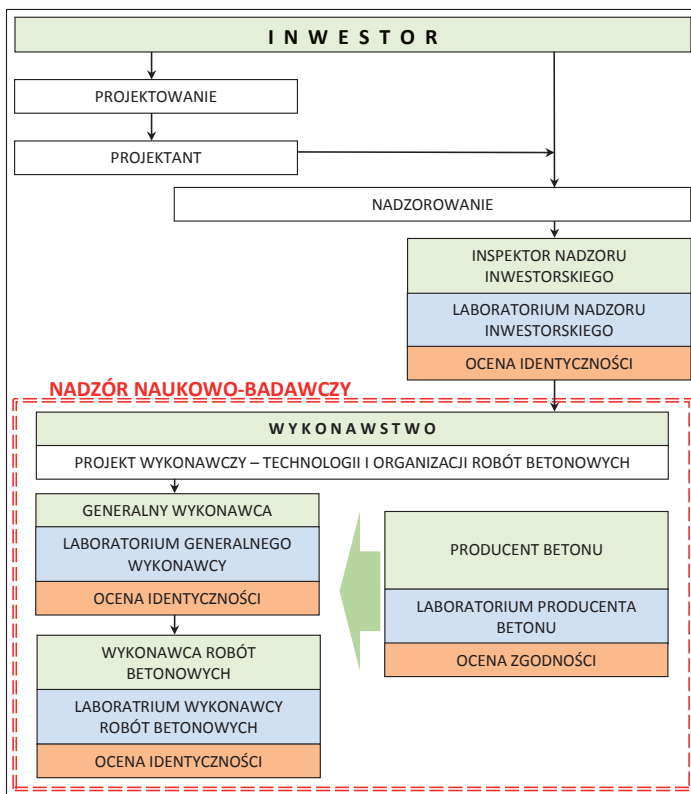
Rys. 5. Schemat decyzyjny nadzoru nad pielęgnacją

Pielęgnacja wilgotnościowa ma być prowadzona ściśle według zaleceń ustalonych w projekcie. W pierwszym okresie dojrzewania dotyczy ona górnych powierzchni betonu, bo pozostałe chronione są deskowaniem. Po demontażu deskowania, również powierzchnie formowane wymagają stałego nawilżania. Szczególnie ważnym momentem w pielęgnacji jest czas operacji związanych z usuwaniem blatów deskowania. Nie można wtedy dopuścić do gwałtownych zmian warunków dojrzewania powierzchniowych warstw betonu. Najpierw powinno nastąpić powolne poluzowanie przylegających do powierzchni betonu blatów by nie nastąpiło gwałtowne przesuszanie i odparowywanie wody z odsłoniętego betonu, po czym powinna nastąpić szybka wymiana deskowania na włókninę (folię) i pełne nasycenie powierzchni wodą. W takim stanie nasycenia beton powinien być utrzymywany do momentu zakończenia pielęgnacji.

## 6. Model nadzoru przy betonowaniu wielkogabarytowych masywnych konstrukcji betonowych

Ze względu na znaczenie konstrukcyjne masywnych elementów betonowych oraz poziom złożoności procesów technologicznych przy ich wykonywaniu, konieczne staje się też szczególne nadzorowanie począwszy od momentu definiowania założeń technologicznych, aż po zakończenie zabiegów pielęgnacyjnych. Oprócz standardowego nadzoru własnego wykonawcy robót betonowych i nadzoru inwestorskiego, gdzie każdy odpowiedzialny jest za pewien wycinek zadań, potrzebny jest nadzór o charakterze ogólnym i całościowym. Można go zdefiniować jako nadzór naukowo-badawczy, zapewniający koordynację wszystkich czynności kontrolnych i doradczych. Nawet najlepiej i najbardziej szczegółowo przygotowany projekt wykonawczy nie jest w stanie objąć wszystkich zmieniających się warunków technologicznych w trakcie trwania realizacji zadania. Potrzebne są wtedy szybkie, merytorycznie uzasadnione decyzje, które wyeliminują lub zminimalizują ryzyko powstania jakichkolwiek wad wykonawczych. Schemat wzajemnych powiązań nadzoru przedstawiono na rys. 6.

Podczas trwania betonowania bardzo istotne jest „panowanie” nad wiekiem poszczególnych warstw betonu – tylko znając wiek każdej z warstw można mieć pewność, że nie dopuszczono do powstania zimnych styków. Co prawda tworząc i akceptując technologię betonowania zakłada się przykrycie kolejnych warstw (z uwzględnieniem odpowiedniego zapasu czasowego) przed upływem czasu wiązania mieszanki betonowej, jednak z uwagi na możliwość awarii sprzętu na budowie i dłuższych nieplanowanych przestojuw w przykrywaniu warstw, konieczna jest szczegółowa wiedza na temat wieku warstw w każdym miejscu i każdym czasie trwania betonowania. Aby zapewnić spełnienie tego wymagania konieczna jest stała (całodobowa) obecność nadzoru na budowie.



Rys. 6. Zakres nadzoru naukowo-badawczego przy realizacji masywnych konstrukcji betonowych (klasa wykonania 3, klasa pielęgnacji 4, pielęgnacja termiczna)

## Literatura

- [1] PN-EN 13670:2011 Wykonywanie konstrukcji betonowych
- [2] PN-EN 1992 – Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu
- [3] PN-EN 1994 – Eurokod 4 Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych
- [4] PN-EN 206:2014-04 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność