

Rafał Latawiec
Holcim Polska S.A.

Wydruk pierwszego na świecie zbiornika na wodę pitną w technologii druku 3D betonu w Polsce

Globally first 3D-printed concrete drinking water tank in Poland

Streszczenie

Na jesień 2024 Holcim Polska S.A. we współpracy z partnerami: polską firmą Globtank sp. z o.o., duńską firmą COBOD International zrealizował pierwszy w Polsce obiekt budowlany wydrukowany z betonu w technologii 3D. Jest to pierwszy na świecie zbiornik drukowany z betonu na wodę pitną o wymiarach: 7 metrów wysokości i 7,64 metra średnicy.

Artykuł przedstawia proces realizacji pierwszego w Polsce obiektu budowlanego wykonanego w technologii druku betonu 3D. Opisano praktyczne aspekty związane z wdrożeniem tej innowacyjnej technologii, począwszy od projektowania konstrukcji, przez wybór i testy mieszanki betonowej, aż po sam proces drukowania i finalne prace wykończeniowe. Szczególną uwagę poświęcono wyzwaniom związanym z parametrami technologicznymi, takimi jak czas wiązania betonu, kontrola konsystencji mieszanki oraz dostosowanie sprzętu do lokalnych warunków budowy. Omówiono także kwestie optymalizacji geometrii konstrukcji pod kątem efektywności materiałowej i stabilności strukturalnej. W artykule zaprezentowano również doświadczenia z fazy testowej, w której analizowano jakość warstwowego układania materiału oraz trwałość powstałych elementów. Przedstawiono wnioski dotyczące potencjalnych zastosowań tej technologii w budownictwie mieszkaniowym i infrastrukturalnym w Polsce. Realizacja projektu dostarczyła cennych wskazówek dotyczących przyszłych wdrożeń technologii druku 3D w betonie, a także przyczyniła się do rozwoju wiedzy na temat nowych możliwości zastosowania betonu w formach niemożliwych do osiągnięcia tradycyjnymi metodami budowlanymi.

Abstract

In the fall of 2024, Holcim Polska S.A., in cooperation with partners: the Polish company Globtank sp. z o.o., the Danish company COBOD International, has completed the first 3D-printed concrete tank in Poland. It is the world's first 3D printed potable water tank that is 7 meter high and 7.64 meter in diameter. The article presents the process of constructing the first building in Poland using 3D concrete printing technology. It covers practical aspects of implementing this innovative approach, from structural design and selection of the concrete mix to the printing process and final finishing works. Special attention is given to technological challenges such as setting time control, maintaining the mix consistency, and adapting equipment to local construction conditions. Optimization of structural geometry for material efficiency and

stability is also discussed. The article highlights experiences from the testing phase, which involved analyzing the quality of layered material deposition and the durability of printed elements. Conclusions are drawn regarding the potential applications of this technology in residential and infrastructural construction in Poland. The project provided valuable insights into future implementations of 3D concrete printing and contributed to expanding knowledge about the new possibilities of concrete use in forms unattainable by traditional construction methods.

1. Dlaczego drukujemy beton?

W obliczu rosnących wyzwań w branży budowlanej — takich jak niedobór wykwalifikowanej siły roboczej, presja na ograniczanie emisji CO₂ oraz potrzeba szybszej i bardziej zrównoważonej realizacji inwestycji — Holcim aktywnie poszukuje innowacyjnych rozwiązań, które odpowiedzą na te potrzeby. Jednym z kierunków rozwoju stała się technologia druku 3D z betonu.

Drukowanie betonu to nie tylko futurystyczna ciekawostka, widać w niej realne narzędzie transformacji branży. Technologia ta pozwala znacząco wpłynąć na konserwatywne procesy budowlane dzięki automatyzacji i robotyzacji, możliwości swobodnego kształtowania geometrii konstrukcji i projektowania ich w sposób zoptymalizowany. Materiał, w tym przypadku beton, może być wykorzystany mądrzej.

Wdrożenie tej technologii w Polsce nie jest pozbawione wyzwań. Poza barierami technologicznymi takimi jak odpowiednio zaprojektowane mieszanki betonowe, projekty konstrukcyjne, drukarki i sposób transport mieszanki betonowej, natrafić można na wyzwania związane z brakiem odpowiednich przepisów, konserwatywnym podejściem rynku i wysokimi kosztami wdrożenia technologii. Przedstawiony projekt stanowi inspirację dla branży i wyjście naprzód tym wyzwaniom, sprawdzając w praktyczny sposób możliwość wykorzystania technologii druku 3D betonu.

Na świecie realizuje się coraz więcej projektów związanych z drukowaniem betonu. W tym zakresie w Polsce zrealizowano relatywnie niewiele projektów, takich jak niekonstrukcyjna wiata śmietnikowa, schody skarpowe, mała architektura i przedstawiony zbiornik. Z wymienionych obiektów tylko przedstawiany zbiornik jest obiektem budowlanym wymagającym pozwolenia na budowę i jest to największy obiekt z wymienionych.

Holcim ma wiele praktycznych doświadczeń i projektów zrealizowanych w technologii druku 3D, z których warto wymienić osiedla domów jednorodzinnych w Afryce, obiekty infrastrukturalne takie jak kładki pieszkie realizowane na pokazy Bienalle w Wenecji czy prefabrykaty betonowe.

2. Znalezienie aplikacji – zbiorniki

Wybór odpowiedniego projektu do pierwszej realizacji obiektu budowlanego w technologii druku 3D z betonu był kluczowym elementem strategii wdrożeniowej. Poszukiwano projektu, który pozwoli wykorzystać potencjał drukowania oraz będzie posiadał relatywnie prostą (do drukowania), ale jednocześnie masywną geometrię. Zbiorniki cylindryczne spełniały te warunki.

Zbiorniki cylindryczne można spotkać wykonane głównie z 2 materiałów – żelbetowe i stalowe. Różnego rodzaju zbiorniki żelbetowe to nieodłączny element infrastruktury wodociągowej, a jednocześnie typ konstrukcji, który w tradycyjnej technologii żelbetowej jest trudny i kosztowny w wykonaniu. Zaokrąglone kształty wymagają pracochłonnego deskowania, precyzyjnego zbrojenia oraz licznych etapów robót ręcznych. Z kolei w technologii druku 3D taka geometria staje się wręcz naturalna do wykonania. Jednocześnie okrągły rzut zbiorników pozwala na wysoki poziom optymalizacji projektowej ze względu na równomiernie rozłożone naprężenia.

Grupa Holcim posiada praktyczne doświadczenie w realizacji obiektów o podobnej geometrii – realizowane wspólnie z firmą General Electric oraz COBOD podstawy wież wiatraków o średnicy około 6 metrów i wysokości około 20 metrów. Wybór zbiornika był więc naturalnym rozwojem tej technologii.

3. Znalezienie inwestora – zamówienie publiczne, szczegóły finansowania

Do projektu została zaproszona firma Globtank sp. z o.o. — polski liderem w zakresie kompleksowego wykonywania zbiorników na ciecze. Globtank, po podpisaniu listu intencyjnego z Holcim, rozpoczął poszukiwania odpowiedniego projektu pilotażowego. Takim projektem okazało się zamówienie publiczne w Barczewku, w ramach którego przebudowywano stację ujęcia wody. W ramach zadania do wybudowania był zbiornik na wodę pitną o objętości około 300m³. Po stronie zamawiającego, Zakładu Wodociągów i Kanalizacji Barczewo, oraz generalnego wykonawcy, firmy Eko-wod Czarneccy z Kętrzyna, panowała otwartość na innowacje, a model „zaprojektuj i zbuduj” pozwalał na zastosowanie niestandardowych rozwiązań. Warto podkreślić, że finansowanie inwestycji pochodziło z Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020, współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich, pod auspicjami Samorządu Województwa Warmińsko-Mazurskiego. Oznaczało to konieczność spełnienia restrykcyjnych wymogów formalnych i jakościowych — technologia druku musiała być nie tylko efektywna, ale także zgodna z wymogami prawa budowlanego, procedur przetargowych i zasad wykorzystania funduszy europejskich.

Z perspektywy wykonawcy i inwestora publicznego, kluczowym czynnikiem umożliwiającym wdrożenie nowatorskiej metody była tożsamość kosztów – koszt wykonania zbiornika drukowanego nie mógł przewyższać kosztów tradycyjnego zbiornika wykonywanego w ramach takiego projektu.

ZWiK Barczewo, jako inwestor, wykazał się wyjątkową otwartością i odwagą decyzyjną. Inwestycja stała się dowodem na to, że także w sektorze zamówień publicznych możliwe jest wdrażanie rozwiązań pionierskich — o ile są one dobrze zaprojektowane, profesjonalnie przygotowane i oparte na rzetelnej analizie kosztowo-funkcjonalnej. Ostateczna akceptacja zastosowania druku 3D była wynikiem dialogu pomiędzy wszystkimi stronami projektu – zamawiającym, wykonawcą, projektantami oraz dostawcami technologii.

4. Projektowanie zbiornika

a. Projekt wstępny

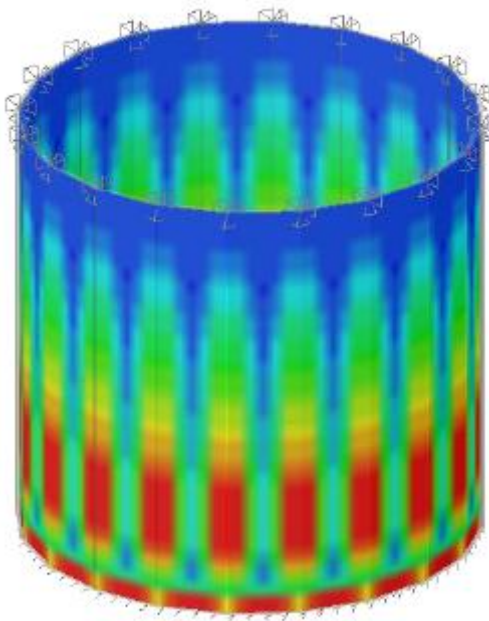
Proces projektowania zbiornika rozpoczął się od etapu koncepcyjnego, realizowanego wspólnie przez zespoły Holcim i Globtank. Głównym celem było szybkie określenie kluczowych wyzwań projektowych oraz przyjęcie wstępnych założeń materiałowych i technologicznych, umożliwiających przeprowadzenie analiz strukturalnych i technologicznych. Za punkt odniesienia posłużył projekt typowego zbiornika o objętości około 300 m³ – jako gotowa dokumentacja projektowa, która odpowiadała wymaganiom inwestora oraz zapisom SIWZ.

Zaprojektowano zbiornik o średnicy wewnętrznej 7,64 metra, wysokości 7 metrów. W celu zapewnienia szczelności w środku zbiornika zastosowano specjalistyczną hydroizolację układaną na warstwie termoizolacji. Technologia uszczelnienia zbiornika została zaprojektowana przez firmę Globtank i jest to standardowe rozwiązanie dla zbiorników na wodę pitną. Warto nadmienić, że technologia zbiornika uzyskała atest PZH, wymagany dla elementów mających styczność z wodą pitną.

Projekt wstępny opierał się na podstawowych parametrach geometrycznych (średnica, wysokość, kształt ścian i dachu), warunków użytkowych (szczelność, dostęp przez drabinę, obecność pokrycia) oraz obciążeniach normowych. Na tym etapie nie zakładano jeszcze zwężenia ścian ku górze – kluczowe było możliwie szybkie uzyskanie pierwszych wyników analizy projektu konstrukcji w celu dalszej analizy materiałowo-technologicznej. Do obliczeń wykorzystano modelowanie metodą elementów skończonych (MES), co pozwoliło na precyzyjne zidentyfikowanie stref krytycznych pod względem naprężeń oraz ocenić zachowanie konstrukcji pod wpływem różnych typów obciążeń – przykłady pokazano na rysunku 1 i 2. Analizowano m.in. ciśnienie hydrostatyczne wody, obciążenia wiatrem, zmiany temperatury w betonie oraz obciążenia eksploatacyjne.

Co istotne, konstrukcja drukowana wymagała uwzględnienia dodatkowych czynników takich jak potencjalne różnice we właściwościach materiału wynikające z technologii warstwowego układania mieszanki. Zidentyfikowano również kluczowe ryzyka związane z procesem druku: obecność zimnych styków, wpływ czasu międzywarstwowego na adhezję oraz możliwą anizotropię materiału. Wymienione czynniki zostały uwzględnione podczas projektowania mając szczególne odzwierciedlenie w założonych parametrach materiału [1].

Już podczas wstępnego projektu konstrukcji założono zastosowanie zbrojenia rozproszonego w celu całkowitego wyeliminowania zbrojenia tradycyjnego. Taki zabieg pozwolił na wyeliminowanie prac zbrojarskich oraz zredukowanie ilości stosowanej stali zbrojeniowej.



Rysunek 1. Model numeryczny zbiornika z rozkładem naprężeń rozciągających

b. Analiza

Po wstępnym zaprojektowaniu zbiornika przystąpiono do szczegółowej analizy w celu określenia kluczowych obszarów z punktu widzenia wykonawstwa, ryzyk związanych z daną technologią oraz możliwych optymalizacji. W proces analityczny włączono firmę COBOD – producenta drukarki – aby dopasować drukarkę pod wymagania projektu. Analiza pozwoliła także na wstępną optymalizację zużycia materiału — na tym etapie zidentyfikowano możliwość redukcji grubości ścian w górnej partii zbiornika, gdzie ciśnienie hydrostatyczne jest niższe. Te założenia przeniesiono do projektu finalnego. Kluczowe wnioski z analizy to:

- sposób przygotowywania mieszanki betonowej oraz jej transportu
- konieczność przygotowania się na przerwy w drukowaniu skutkujące zimnymi stykami pomiędzy następującymi warstwami
- szczegółowa analiza wydajności układu przygotowującego oraz transportującego materiał która musi być potwierdzone praktycznymi testami
- przygotowanie zespołów roboczych realizujących wydruk zbiornika

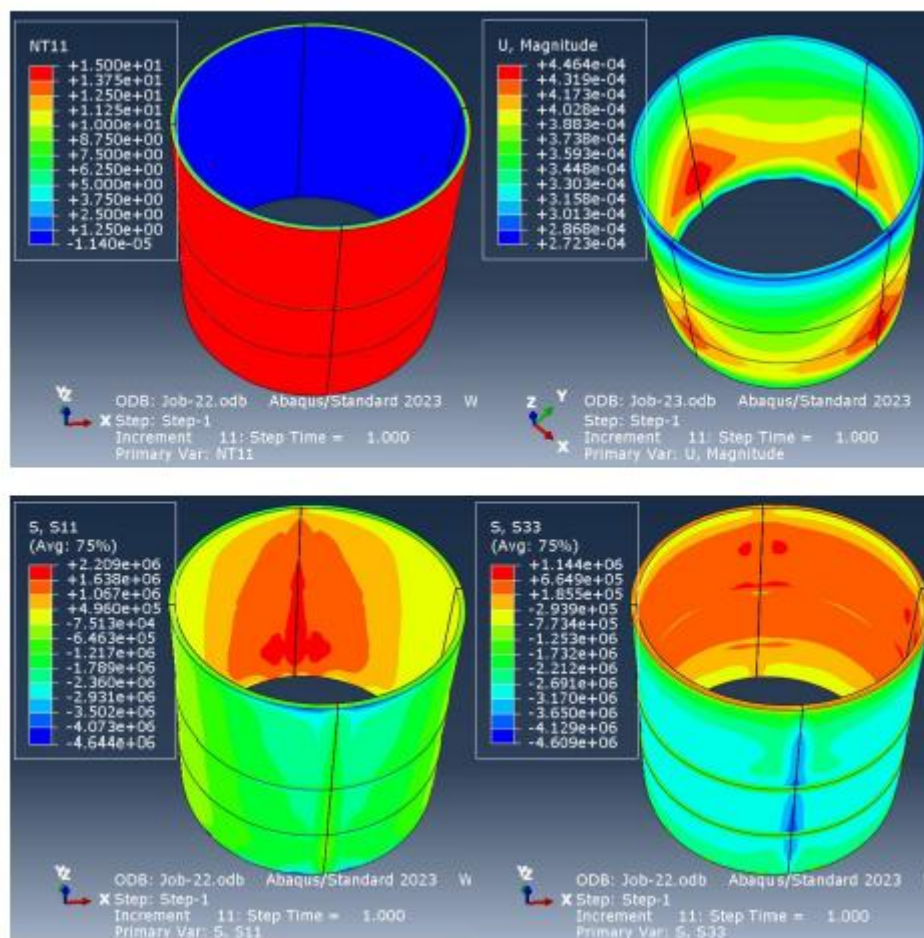
- odpowiednie zaprojektowanie detalu połączenia ścian zbiornika z płytą fundamentową
- wpływ warunków temperaturowo-wilgotnościowych w dniu realizacji na wydruk

W dalszych etapach projektu zweryfikowano oraz przygotowano rozwiązania na wszystkie powyższe wnioski, następnie przystąpiono do sporządzenia projektu wykonawczego.

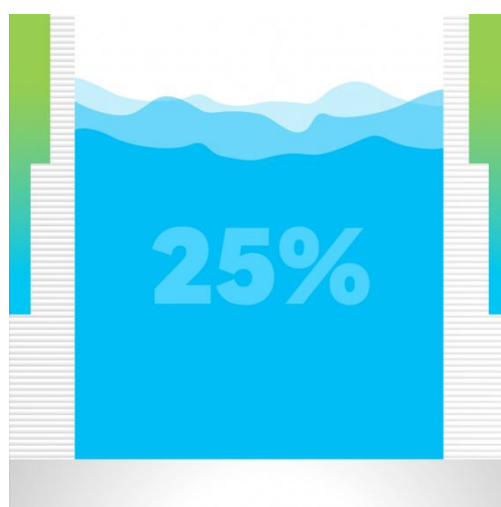
W ramach przeprowadzonych burz mózgów zidentyfikowano kolejny możliwy skok technologiczny dla technologii druku betonu – kiedy możliwe będzie wielkoskalowe drukowanie elementów nadwieszonych, pozwalających na drukowanie kopuł dachowych bez konieczności wykonania szalunku podtrzymującego. Zagadnienie zostało określone jako wymagające szczegółowych badań i wieloletnich przygotowań po stronie badawczo-rozwojowej przez co nie zastosowano go w przedstawionym projekcie.

c. Projekt wykonawczy

Projekt wykonawczy był rezultatem pełnej integracji danych geometrycznych, wyników analiz MES oraz możliwości technologii druku 3D. W ostatecznym rozwiązaniu zdecydowano się na zwężanie ścian ku górze, co umożliwiło znaczną oszczędność materiałową. Grubość ścian wynosiła 25 cm w dolnych 2 metrach konstrukcji, następnie 20 cm w środkowych 2 metrach konstrukcji oraz 15 cm w najwyższych 3 metrach konstrukcji – graficznie pokazano to na rysunku 3. Zastosowane rozwiązanie wpłynęło nie wpłynęło na funkcjonalność i przydatność zbiornika, a pozwoliło na redukcję ilości zastosowanego materiału o 25%.



Rysunek 2. Przykład wizualizacji różnych naprężeń i przemieszczeń w ścianach zbiornika



Rysunek 3. Graficzne przedstawienie zmniejszenia grubości ścian zbiornika

Projekt został wielokrotnie przeliczony, z zachowaniem wyższych niż wymagane współczynników bezpieczeństwa, wynikających z braku masowej skali realizacji podobnych obiektów. Pomimo relatywnie prostej geometrii, konstrukcja została dodatkowo zoptymalizowana tak, by umożliwić szybkie i bezpieczne drukowanie, z uwzględnieniem trajektorii ruchu głowicy drukującej, czasu międzywarstwowego i innych zmiennych procesowych.

Ostateczny projekt zawierał pełną dokumentację inżynierską, opracowaną przez uprawnionego projektanta i zatwierdzoną przez inspektora nadzoru inwestorskiego. Nie zawierał innych drukowanych elementów poza ścianami zbiornika. Złożenie kompletnej dokumentacji trwało około dwóch miesięcy — możliwe było to dzięki wcześniejszym pracom koncepcyjnym oraz sprawnej współpracy wszystkich zaangażowanych stron.

5. Wybór i testy mieszanki betonowej

W technologii druku betonu 3D sukces całego procesu zależy w znacznej mierze od mieszanki — to ona odpowiada za nośność struktury, stabilność geometryczną i możliwość drukowania betonu [3]. Mieszanka do druku musi spełniać jednocześnie kilka wymagań ponad te, którymi charakteryzują się tradycyjne betony — wytłaczalność, drukowalność, jakość druku czy zdolność do przenoszenia obciążeń przed wiązaniem [3]. Jednocześnie mieszanka musi spełniać tradycyjne wymagania stawiane betonom — wytrzymałość, trwałość, pompowalność. Do wydruku zbiornika w Barczewku zastosowano mieszankę Holcim TectorPrint, opracowaną z myślą o technologii 3D i stale rozwijaną przez Holcim. W trakcie analizy wzięto pod uwagę 3 możliwe rozwiązania wytwórcze wykorzystujące ten materiał: gotowa suchej zaprawy, którą trzeba tylko wymieszać z wodą, mieszanka betonowa produkowana na węźle betoniarskim oraz mobilny mieszalnik na terenie budowy wykorzystujący kruszywo lokalne oraz premix spoiwowy. Wybierając konkretne rozwiązanie kierowano się czynnikami materiałowymi, elastycznością rozwiązania, pracochłonnością, wcześniejszymi doświadczeniami oraz gotowością do wdrożenia przemysłowego. System oparty na gotowej zaprawie określono jako zbyt pracochłonny przy wymaganej ilości materiału (ponad 70 ton zaprawy), oparty na kruszywie o relatywnie małej frakcji pomimo wielu wcześniejszych doświadczeń. System mieszanki produkowanej na wytwórni betonowej wyeliminowano ze względu na mniejszą elastyczność przy pierwszym tego typu projekcie — dostawa po kilka m³ w jednej partii. Przyjęte rozwiązanie — wykorzystanie węzła mobilnego na placu budowy pozwalało skorzystać z zalet obu rozwiązań, natomiast miało swoje ograniczenia. Dzięki zastosowaniu tego rozwiązania możliwy był wydruk z betonu o uziarnieniu do 8 mm („prawdziwy” beton), wysoka elastyczność produkcji i możliwość reagowania na zmiany na placu budowy, mieszanka o bardzo wysokiej stabilności parametrów oraz ograniczenie pracochłonności — cała ciężka praca fizyczna była wykonywana przez maszyny.

Analiza, która została przeprowadzona po wstępnym projekcie pozwoliła określić jakie wymagania wytrzymałościowe beton musi spełniać. Ze względu na zastosowane zbrojenie rozproszone, określono wymaganą klasę wytrzymałości na ściskanie betonu oraz resztkową wytrzymałość na zginanie. W ramach wstępnej analizy dostępnych rodzajów zbrojenia rozproszonego analizowano możliwość zastosowania włókien

stalowych lub polimerowych. W ramach projektu zwrócono uwagę na oczywiste parametry takie jak spełnienie wymagań wytrzymałościowych, natomiast zwrócono uwagę także na bardzo nieoczywiste czynniki – zastosowane włókna są wystawione na działanie czynników zewnętrznych, dlatego nie można było zastosować zwykłych włókien stalowych, trzeba było wykorzystać włókna stalowe galwanizowe. Ponadto grupa Holcim przeprowadziła badania wytrzymałościowe różnych typów włókien w betonie drukowanym [2]. Wyniki wykazały najwyższą przydatność włókien stalowych, które wybrano do przedstawianego projektu.

Po doborze składników przystąpiono do projektowania mieszanki betonowej. Specyfikacja obejmowała beton odpowiadający klasom ekspozycji: XC4, XA1, XF1 o klasie wytrzymałości C40/50 oraz wytrzymałości resztkowej $F_{R3} > 5,0$ MPa. Dodatkowo ze względu na drukowanie danego betonu postawiono wymagania związane z tym procesem:

- pompowalność pompą tłokową – konsystencja po 5 minutach od wymieszania materiału mierzona metodą opadu stożka powinna wynosić pomiędzy 150-200 mm.
- wytłaczalność i drukowalność – mieszanka musiała umożliwiać drukowanie w sposób ciągły, tak aby kolejne warstwy łączyły się ze sobą, ta właściwość była na bieżąco kontrolowana w sposób organoleptyczny
- jakość wydruku – szczególnie niedopuszczalne były nieciągłości struktury drukowanego materiału
- zdolność do przenoszenia obciążeń warstw drukowanych wyrażona jako pionowa prędkość drukowania – minimum 0,25 m/godzinę
- czas otwarty mieszanki w 10oC – minimum 45 minut, w tym czasie drukowane na sobie warstwy powinny połączyć się ze sobą bez utworzenia „zimnego styku”
- stabilność mieszanki oraz tolerancje na różnego rodzaju niedoskonałości składników

Wymienione właściwości zostały dodatkowo opisane w następnym rozdziale ze względu na ich ścisłe połączenie z procesem drukowania betonu.

Całość procesu projektowania mieszanki betonowej oraz jej składu nie jest przedstawiony w artykule ze względu na tajemnicę przedsiębiorstwa. Nadmienić można jedynie, że zastosowano układ wieloskładnikowy oparty na spoiwie cementowym, wykorzystujący lokalne kruszywo o uziarnieniu 0/8 mm. Warto dodać, że w obliczu braku norm opisujących metody badawcze tych specyficznych parametrów grupa Holcim zastosowała autorskie metody bazujące na praktycznym wykorzystaniu materiału.

W trakcie testów laboratoryjnych i prób poligonowych analizowano również wpływ warunków atmosferycznych — temperatura i wilgotność mają istotny wpływ na zachowanie świeżego betonu, dlatego procedury robocze były dostosowywane do warunków lokalnych na placu budowy. Przeprowadzono również symulacje awaryjne

— np. zatrzymanie drukowania na określony czas i jego ponowne uruchomienie — aby zweryfikować zachowanie się materiału w przypadku przerw technologicznych.

6. Testy procesu drukowania

Przed rozpoczęciem właściwego wydruku przeprowadzono szereg testów technologicznych, których celem było dopracowanie kluczowych parametrów procesu oraz potwierdzenie wykonalności założeń projektowych w warunkach rzeczywistych. Poza testami laboratoryjnymi przeprowadzono wielkoskalowe testy na pełnym docelowym zestawie, który został następnie wykorzystany na budowie. Testy przeprowadzono w siedzibie dostawcy drukarki, firmie COBOD. Druk 3D z betonu to nie tylko konstrukcja, ale przede wszystkim precyzyjne zarządzanie materiałem, czasem i technologią układania, dlatego testy miały charakter wielowymiarowy i obejmowały:

a. Wydajność

Pierwszym etapem była weryfikacja możliwej do osiągnięcia wydajności wężła mobilnego. Podczas wyboru metody przygotowywania mieszanki betonowej ten aspekt został wskazany jako ograniczający prędkość wydruku całej konstrukcji, dlatego podjęto próby dotyczące zmaksymalizowania go. Standardowy układ mieszający ma wydajność ok. 0,8 m³/godzine, jednak zastosowanie odpowiedniej receptury oraz modyfikacja układu pompującego o powiększenie zbiornika na mieszankę betonową pozwoliło na zwiększenie wydajności do 1,2 m³/godzine. Wiązało się to z jednak z koniecznością przechowywania mieszanki w zbiorniku pośrednim pompy przez około 15 minut. Między innymi z tego powodu czas otwarty mieszanki musiał wynosić minimum 45 minut, a szczególności mieszanka nie mogła wykazywać znaczącej utraty konsystencji w tym czasie. Na przygotowanym wcześniej stanowisku testowym drukowano próbne fragmenty ścian o docelowych wymiarach – szerokości warstwy – do 25 cm i grubości warstwy – około 5 cm.

b. Włókna i reologia mieszanki

Z uwagi na zastosowanie zbrojenia rozproszonego, niezwykle istotnym elementem były testy dotyczące zachowania włókien w mieszance. Badano m.in.:

- jednorodność rozprowadzenia włókien stalowych,
- ich wpływ na reologię i pompowalność materiału,
- ich wpływ na gromadzenie się materiału w strefach martwych głowicy drukującej
- ich wpływ na jakość wydruku w tym wygląd ściany po związaniu

Dzięki testom udało się precyzyjnie określić, że założone dozowanie włókien, wyższe niż standardowe, nie wpływało negatywnie na pompowalność, nie powodowało zatorów w układzie drukującym ani nie wpływało negatywnie na pompowalność i jakość wydruku. Wykazano jednak, że konieczne jest częstsze niż zwykle czyszczenie głowic drukujących, tj. czyszczenie co 2 godziny, a nie standardowe 4-6 godzin.

c. Właściwości mechaniczne wydruku

Kluczowym elementem testów było też badanie wydrukowanych wielkoskalowych elementów w celach wykorzystania do badań wytrzymałościowych. Wydrukowano 3 elementy o wymiarach około 0,6x2,3 metra, z których wycięto 20 belek do badania wytrzymałości resztkowej na zginanie oraz 8 walców do badań modułu sztywności i wytrzymałości na ściskanie. Kluczowym elementem planu badawczego było zasymulowanie dłuższej przerwy roboczej i celowe wytworzenie zimnego styku w celu zamodelowania tego elementu w analizie MES. Badania wytrzymałościowe wykazały, że zaprojektowanie właściwości mechaniczne zostały osiągnięte.

7. Wydruk właściwy

Po przeprowadzeniu analiz, testów, złożeniu projektu i uzyskaniu pozwolenia na budowę, przystąpiono do realizacji projektu. W pierwszym etapie wylano płytę fundamentową, po którym rozpoczęto przygotowaniu do drukowania ścian zbiornika. Drukowanie zaplanowano na okres 21-26.10.2025.

a. Przygotowanie placu budowy oraz prac

Plac budowy został odpowiednio zorganizowany pod kątem logistyki materiałowej i dostępu do infrastruktury technicznej. W bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika zorganizowano:

- strefę załadunku i przygotowania mieszanki,
- system pompowania materiału do głowicy drukującej,
- strefy serwisowe i techniczne dla operatorów oraz zespołu inżynierskiego.

Istotnym elementem przygotowania placu było także stworzenie harmonogramu pracy umożliwiającego ciągłość druku. Ponieważ proces warstwowania wymaga określonych odstępów czasowych między kolejnymi przebiegami, logistyka dostarczania materiału oraz koordynacja personelu musiały być zsynchronizowane z dokładnością co do minuty. Plan pierwotny zakładał wydruk ciągły w systemie trzymianowym 24/7.

b. Rozstawienie drukarki

Proces rozpoczął się od rozstawienia systemu drukującego COBOD BOD2. Drukarka ta składa się z 4 słupów oraz 2 belek, na których zamontowana się głowica drukująca z drugim zbiornikiem pośrednim. Szczegóły tego rozwiązania dostępne są w materiałach COBOD. Każdy ze słupów został ustawiony na prefabrykowanych stopach betonowych rozstawionych dookoła płyty fundamentowej. Drukarka została rozstawiona w ciągu 3 dni, w ciągu których wykonano także pełną kalibrację urządzenia, obejmującą weryfikację geometrii torów prowadzących, kontrolę poziomowania drukarki, test precyzji poruszania się głowicy i zgodności z modelem BIM zbiornika. Obsługa drukarki była prowadzona przez zespół COBOD.

c. Wydruk

Ostateczne testy materiałowe oraz spotkanie zespołu realizującego projekt odbyło się w poniedziałek 21.10.2024. Na miejsce wykonano pierwsze zaroby w docelowym układzie mieszająco-pompującym w celu ostatecznej korekty i weryfikacji przygotowanej receptury. Po przygotowaniu mieszanki betonowej potwierdzono parametry reologiczne oraz parametry wymagane do drukowania.

Właściwy druk ścian zbiornika rozpoczął się 22.10.2024 w godzinach porannych. Wydruk trwał 38 godzin aktywnego druku, zrealizowanego w ciągu 5 dni roboczych. Pierwotny plan zakładający wydruk ciągły 24/7 okazał się trudny do wykonania już pierwszego dnia i odstąpiono od niego. Głównymi przyczynami były początkowy brak zgrania wszystkich zespołów, obciążenie fizyczne i psychiczne pracy w godzinach nocnych dla osób na co dzień nie realizujących tego typu pracy. Szczególnie ostatnie dni drukowania udowodniły jednak, że po zgraniu się zespołów roboczych złożonych ze specjalistów z różnych firm i utrwaleniu schematów postępowania możliwy byłby wydruk w ciągu 2 dni po 2 zmiany.

Zespół roboczy składał się z 5 osób – operatora drukarki (de facto sterującego komputerem), operatora węzła mobilnego i pompy, operatora ładowarki, operatora mieszanki (osoba pełniąca funkcję kontroli jakości mieszanki) oraz wolnego pracownika, który był potrzebny w niektórych momentach wymagających dodatkowych rąk do pracy.

Po zaniechaniu pracy trzymianowej, zdecydowano, aby drukowanie kończyć w momencie koniecznego odpoczynku fizycznego członków zespołu drukującego w danym momencie bez możliwości zmiany na osoby wypoczęte lub poważniejszych problemów z wydrukiem, które skutkowały koniecznością dłuższej przerwy technicznej. Kolejne dni wykazywały ciekawe problemy techniczne, które powodowały konieczność kończenia „dniówki”. Zostały one wskazane poniżej w kolejności chronologicznej i opisane:

- zapchanie systemu pompującego – wydarzyło się poprzez brak przetestowanych w praktyce schematów pomimo przyjętych założeń dotyczących czyszczenia systemu. Przerwa związana z regularnym czyszczeniem dyszy przedłużyła się do ponad godziny, co spowodowało konieczność rozpoczęcia procesu czyszczenia systemu podającego materiał. Dalsze próby wyczyszczenia nie przyniosły pożądanych efektów, co doprowadziło do całkowitego zapchania węży podających mieszankę. Następnego dnia udało się odblokować węże oraz poprawiono schematy czyszczenia systemów. W następnych dniach problem nie wystąpił, a przyjęte działania naprawcze okazały się skuteczne.
- Problem mechaniczny śruby – nastąpiła mechaniczna usterka śruby w głowicy drukującej. Ze względu na porę dnia – wczesne godziny poranne, po całonocnym drukowaniu zdecydowano zakończyć druk w danej sesji i na spokojnie wymienić element następnego dnia.

- Zawartość grubych kamieni w kruszywie o średnicy ok. 50-60 mm – kruszywo dostarczone w bigbagach zawierało pojedyncze kamienie o dużej średnicy, które blokowały się w ekstruderze powodując konieczność dłuższego czyszczenia głowicy. Jako działania przyjęto wolniejsze wsypywanie kruszywa z bigbagów do zasobnika z dokładnym oglądaniem sypiącego się kruszywa.

Poza wskazanymi powyżej problemami technicznymi, w trakcie wydruku nie natrafiono na poważniejsze problemy, które mogły utrudniać drukowanie. Wszystkie problemy zostały skutecznie rozwiązane dzięki obecności zespołów Holcim, COBOD i Globtank na miejscu. Każda sytuacja awaryjna była dokumentowana i analizowana w kontekście przyszłych projektów — co pozwoliło stworzyć solidny zbiór dobrych praktyk do zastosowania przy kolejnych realizacjach. Wydrukowane ściany pokazano na rysunku 4 poniżej.



Rysunek 4. Widok wydrukowanych ścian zbiornika.

Warto nadmienić, że w związku ze zmianą harmonogramu prac z 3-zmianowego na 1-zmianowy ostatni dzień drukowania musiał zostać odłożony o poprzednich o około 2 tygodnie. Pomimo tak długiej przerwy w wydruku i obecności na budowie, ostatniego dnia osiągnięto najbardziej wydajny wydruk, w ocenie pracujących w wyniku lepszego zgrania zespołu oraz wspólnej praktyki.

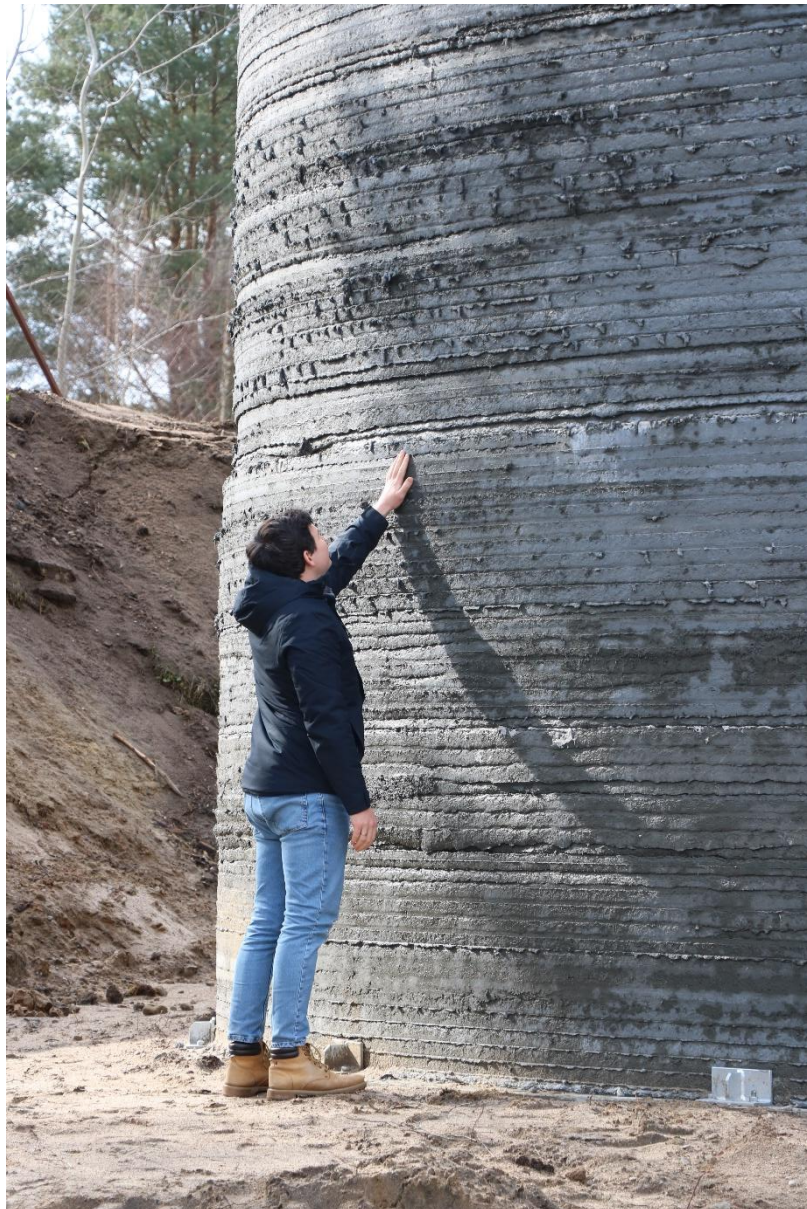
Należy podkreślić opinię, która wydaje się kluczowym elementem drukowania betonu – kiedy drukowanie betonu wydaje się nudne oraz jest uczucie, że nic się nie dzieje, wydruk idzie najsprawniej.

d. Wykończenie zbiornika oraz odbiory

W następujących po wydruku tygodniach zakończono pozostałe prace związane ze zbiornikiem – hydroizolacji i izolacje termiczne, montaż dachu oraz dodatkowych instalacji. Kompletny zbiornik został pokazany na rysunkach 5 i 6. W marcu 2025 zbiornik został zalany wodą, a następnie przeprowadzono testy szczelności. Na podstawie pozytywnych testów zbiornik został odebrany stanowiąc pierwszy obiekt budowlany wydrukowany w technologii druku 3D betonu w Polsce.



Rysunek 5. Wygląd kompletnego zbiornika



Rysunek 6. Zbliżenie na warstwowy układ betonu na ścianach

8. Wnioski z wydruku

a. Oszczędność materiałowa

Jednym z najbardziej mierzalnych efektów wdrożenia technologii druku 3D w projekcie zbiornika była redukcja zużycia materiału. Dzięki analizom MES i elastyczności geometrycznej, jaką daje drukowanie warstwowe, możliwe było **stopniowe zwężenie ścian zbiornika ku górze**, bez utraty nośności konstrukcji. W tradycyjnej technologii tak skomplikowane rozwiązanie jest wysoce trudne do zrealizowania, a przez to nieopłacalne.

Zastosowanie druku umożliwiło precyzyjne dopasowanie grubości ściany do rozkładu ciśnienia hydrostatycznego. Efektem tego była redukcja zużycia mieszanki betonowej o około **25%** w porównaniu do odpowiednika wykonanego metodą konwencjonalną. To nie tylko oszczędność finansowa, ale przede wszystkim **ograniczenie śladu węglowego**, co w kontekście strategii dekarbonizacji budownictwa ma kluczowe znaczenie.

b. Oszczędność czasu

Wydruk zbiornika o wysokości 7 metrów i średnicy 7,64 metra trwał zaledwie **38 godzin aktywnego druku**, rozłożonych na pięć dni roboczych. W porównaniu do czasu wykonania zbiornika żelbetowego o podobnych parametrach, oznacza to potencjalne **skrócenie czasu realizacji o 40–50%**, przy założeniu odpowiedniego tempa organizacji prac towarzyszących. Znaczące skrócenie czasu drukowania nastąpi w przypadku zastosowania mieszanki betonowej produkowanej na stacjonarnym węźle betoniarskim, co umożliwi 4-krotnie szybszy wydruk. W trakcie wydruku ostatnich warstw, gdy nie było konieczności oczekiwania na kolejną partię materiału wyprodukowanego na węźle mobilnym, potwierdzono możliwość 4-krotnie szybszego wydruku. Czynnikiem ograniczającym była wydajność węzła mobilnego.

Szybszy proces nie oznaczał obniżenia jakości – automatyzacja zapewniła stały poziom precyzji, powtarzalność każdej warstwy oraz pełną kontrolę nad przebiegiem procesu. Czas zaoszczędzony na pracach szalunkowych, zbrojeniowych i betoniarskich przełożył się bezpośrednio na szybsze udostępnienie obiektu do dalszych prac.

c. Zaangażowanie siły roboczej

Jednym z głównych wyzwań w dzisiejszym budownictwie jest malejąca dostępność wykwalifikowanej kadry wykonawczej. Technologia druku 3D minimalizuje to ryzyko, ponieważ proces budowy odbywa się z wysokim udziałem automatyzacji. Na opisywanym projekcie, 1 brygada robocza składała się z 5 osób. Dodatkowy potencjał zastosowania betonu z typowego węzła betoniarskiego pozwoliłby ograniczyć ilość osób do 3 – operatora drukarki, operatora mieszanki (kontrola jakości dostarczanej mieszanki) i pompy oraz wolnego pracownika.

Dzięki temu ograniczono udział typowych prac fizycznych — takich jak montaż szalunków czy ręczne układanie betonu — do absolutnego minimum. To kierunek, który wpisuje się w potrzeby rynku: **mniej ludzi na budowie, więcej wartości w technologii**.

d. Koszty wydruku

Przedstawiony projekt nie był tak efektywny kosztowo jak rozwiązanie tradycyjne. Łączne koszty wykonania zbiornika były prawie dwukrotnie wyższe niż technologii tradycyjnej. W tą różnicę składało się wiele czynników, które wynikały z prototypowego rodzaju inwestycji. Realizacja danego projektu pozwoliła jednak oszacować koszt

takich projektów w przyszłości, po przejściu na model codziennej pracy z drukowaniem betonu. Główne czynniki, które wpłynęły na wyższy wynik kosztowy to: zaangażowanie niewykorzystanych 3 zmian, wykorzystanie węzła mobilnego, który wymagał dodatkowo 2 osób do obsługi, model biznesowy wynajmu drukarki (a nie zakup/leasing), wydajność węzła mobilnego, który można zamienić na beton z tradycyjnego betoniarni. Analiza modelu zakładającego rozwiązania powyższych punktów pozwala oszacować koszty realizacji zbiorników betonowych na podobnym poziomie do metody tradycyjnej.

e. Przyszłość

Zrealizowany projekt stanowi punkt zwrotny dla wdrożenia technologii druku betonu 3D w Polsce. Pokazaliśmy, że możliwe jest wykonanie w pełni funkcjonalnego, dużego obiektu infrastrukturalnego przy zachowaniu wszystkich norm jakości, szczelności i trwałości. Co najważniejsze — nie był to projekt demonstracyjny, ale realna konstrukcja użytkowa, zrealizowana w prawie zamówień publicznych.

Na podstawie doświadczeń z Barczewka planowany jest dalszy rozwój technologii w trzech kierunkach:

1. **Skalowanie** – realizacja większych obiektów, w tym zbiorników retencyjnych, zbiorników na biogaz.
2. **Optymalizacja** – dalsze redukcowanie ilości prac oraz zaangażowanych pracowników poprzez zastosowanie materiału z tradycyjnego węzła betoniarskiego
3. **Komercjalizacja** – budowanie modelu ofertowego, który pozwoli klientom publicznym i prywatnym zamawiać obiekty drukowane w sposób tak samo naturalny, jak dziś zamawiają konstrukcje żelbetowe.

Zbiornik w Barczewku to dowód, że **druk 3D w betonie to nie przyszłość – to już teraźniejszość**. Holcim, jako lider tej technologii w Polsce, otwiera nowy rozdział w sposobie myślenia o budownictwie: szybszym, inteligentniejszym i bardziej zrównoważonym.

Bibliografia

[1] Baz, B. A., Nana, W., Regnault de la Mothe, L., Florentin, J., Ouedraogo, K. A. J., Cardia, G., ... & Lombois-Burger, H. (2024). Structural behavior of 3D printed load bearing elements. Digital Concrete 2024-Supplementary Proceedings, 2024.

[2] Nana, W. S. A., Baz, B. A., Blachier, C., Peraud, M., Regnault de la Mothe, L., Zhang, Q., & Lombois-Burger, H. (2024). Mechanical performance of 3D Printed fiber reinforced concrete. In D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, & F. Herding (Eds.), Digital Concrete 2024 - Supplementary Proceedings. Digital Concrete 2024. 4th RILEM

International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 4th to 6th September 2024 - Munich, Germany.

[3] Zieliński, A., & Skibicki, S. Wpływ składu kompozytów cementowych wykonanych w technologii druku 3D na rozwój odkształceń skurczowych. Dni Betonu 2023, 2023.