

## BETON (NIE)OCZYWISTY: OD PUNKTU DO OBIEKTU

Oliwia Łach, Maria Jawor

Studenckie Koło Naukowe BIM – Projektowania Numerycznego Struktur Architektonicznych

### Streszczenie

Praca koncentruje się na opracowaniu spójnego procesu technologicznego, umożliwiającego druk 3D średniogabarytowych elementów małej architektury z mieszanek betonowych bez użycia tradycyjnych szalunków. Głównym celem jest określenie zasad precyzyjnego przejścia od parametrycznego modelu cyfrowego do stabilnego obiektu fizycznego. Analizie poddano algorytmiczne metody generowania geometrii w środowisku Rhinoceros

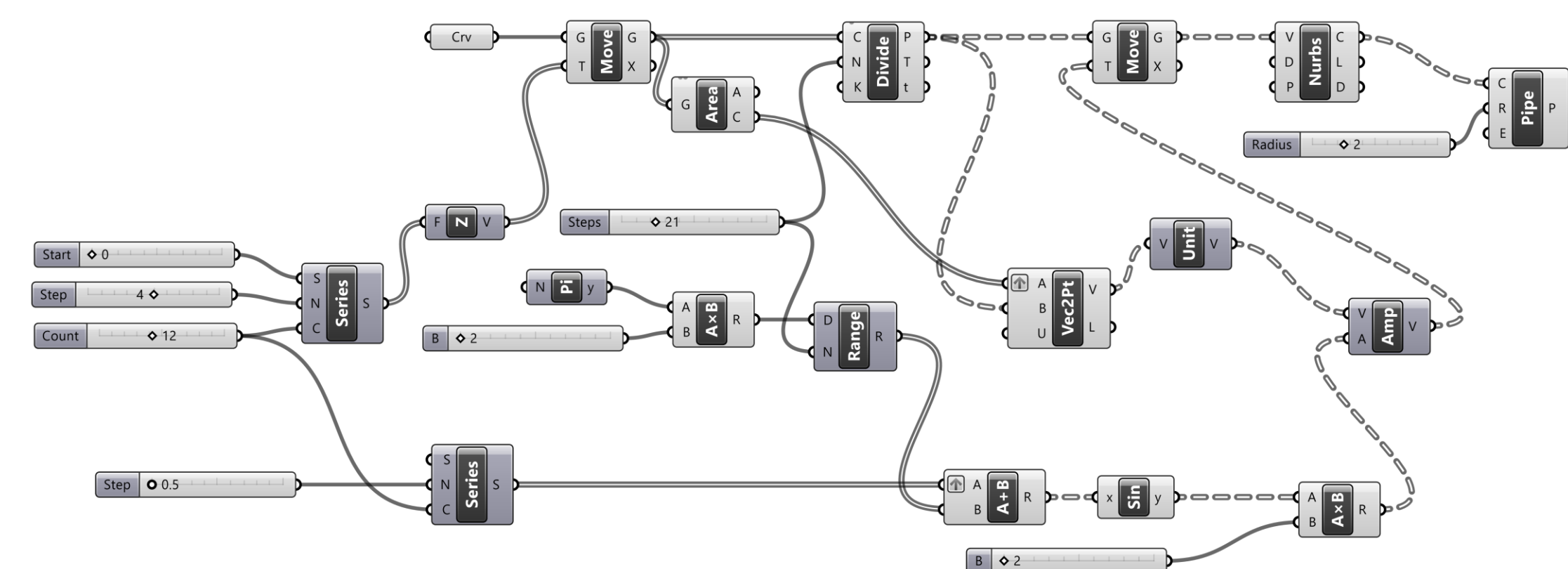
i Grasshopper, możliwość wariantowania przy użyciu zmiennych takich parametrów jak: ilość punktów, skręt bryły i wygięcia oraz podstawowe składy mieszanek, które są niezbędne do utrzymania narzuconego kształtu warstw podczas procesu ekstruzji. Rozwinięte zostały dwa projekty gotowe do wydruku z betonu posiadające: parametryczny model, przygotowane pliki STL oraz testowe wydruki PLA pozwalające na weryfikacje geometrii. W celu przedstawienia projektów stworzone zostały wizualizacje obiektów w przykładowych otoczeniach użytkowych.

### WPROWADZENIE

Druk 3D z betonu stanowi jedną z najbardziej perspektywicznych technologii we współczesnym budownictwie, oferującą realną alternatywę dla tradycyjnych technik odlewniczych. Całkowita rezygnacja z deskowań pozwala na swobodne kształtowanie płynnych, organicznych i zindywidualizowanych form. Istotnym zapleczem dla rozwoju tej dziedziny jest metodyka BIM oraz zintegrowane środowiska projektowania numerycznego. Powiązanie cyfrowego modelu z technologią druku zapewnia płynny przepływ informacji od koncepcji po fizyczną realizację na stacjonarnych drukarkach. Skupienie się na obiektach o umiarkowanych gabarytach znacząco optymalizuje proces prefabrykacji w warunkach warsztatowych oraz ułatwia późniejszą logistykę i montaż elementów w przestrzeni publicznej.

### Metodologia – generowanie geometrii

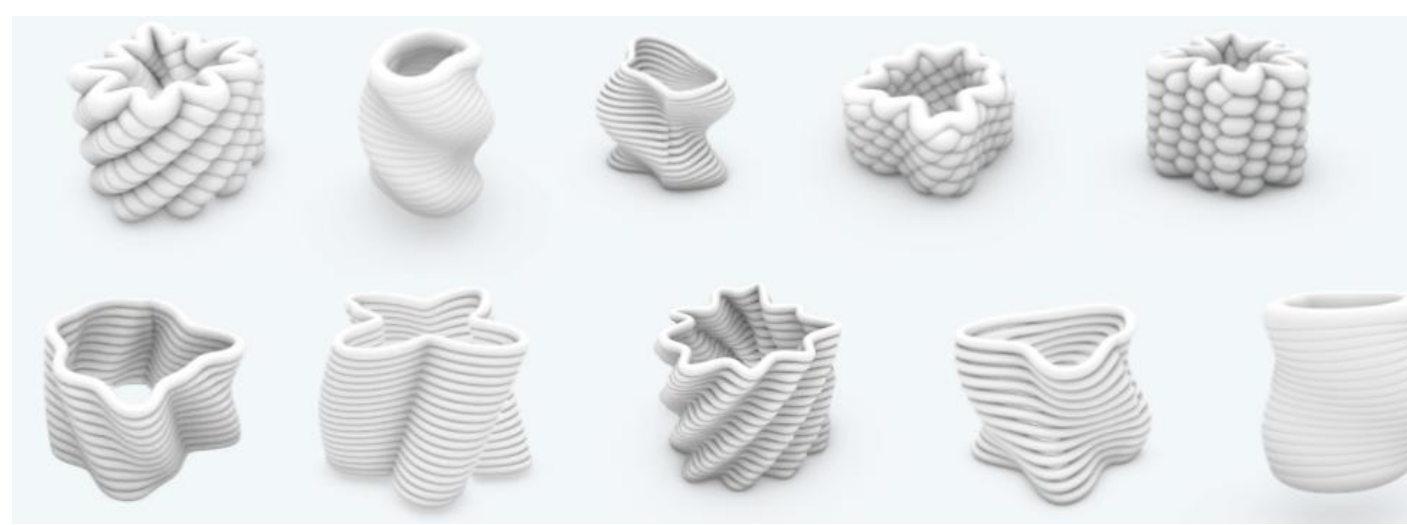
Architektura informacji całego projektu opiera się na zaawansowanych algorytmach wizualnych tworzonych w programie Grasshopper, będącym integralną częścią środowiska Rhinoceros. Konstruowanie cyfrowego modelu rozpoczyna się od zdefiniowania bazowej, płaskiej krzywej. Wygenerowany obrys jest następnie sukcesywnie powielany wzdłuż osi pionowej Z, co stanowi bezpośrednią cyfrową symulację przyrostu kolejnych warstw materiału nakładanych przez dyszę drukującą. Tak zbudowany wirtualny stos krzywych podlega gęstemu próbkowaniu na zbiór punktów kontrolnych. Z każdego węzła wyprowadzane są wektory promieniowe, które określają kierunek i siłę przyszłej deformacji. Wprowadzając do skryptu modulacje oparte na funkcjach trygonometrycznych, takich jak sinusoida, oraz modyfikując kształt poprzez krzywe NURBS, projektant otrzymuje w pełni mierzalne narzędzie do płynnego falowania i rzeźbienia zewnętrznej powłoki bryły. Finałem tego algorytmicznego łańcucha jest materializacja wygenerowanej ścieżki za pomocą komponentu Pipe, co pozwala wizualnie ocenić grubość strugi betonu i wykryć ewentualne kolizje.



### Badanie formy i zmienność parametryczna

Zastosowanie parametrycznego środowiska pracy uwalnia proces twórczy od konieczności ręcznego modelowania każdego wariantu z osobna, zapewniając ogromne możliwości analityczne. Zmiana podstawowych wartości liczbowych na wirtualnych suwakach – sterujących chociażby zagęszczeniem punktów, globalnym kątem skrętu całej bryły czy też amplitudą lokalnych wygięć – powoduje natychmiastową przebudowę całego modelu. Dzięki tej elastyczności wygenerowano szeroki katalog zróżnicowanych form morfologicznych: od obiektów o głębokich, przypominających draperie pofałdowaniach, aż po gładkie i minimalistyczne donice. Należy podkreślić, że każda cyfrowa iteracja kształtu wymaga weryfikacji pod kątem praw fizyki. Ścisła kontrola wychyleń środka ciężkości oraz

rygorystyczne przestrzeganie maksymalnych kątów przewieszeń są absolutnie kluczowe. Świeżo wytłoczona mieszanka betonowa, pozbawiona jakichkolwiek podpór szalunkowych, musi być w stanie samodzielnie przenieść obciążenia wyższych partii struktury jeszcze przed ostatecznym stwardnieniem.

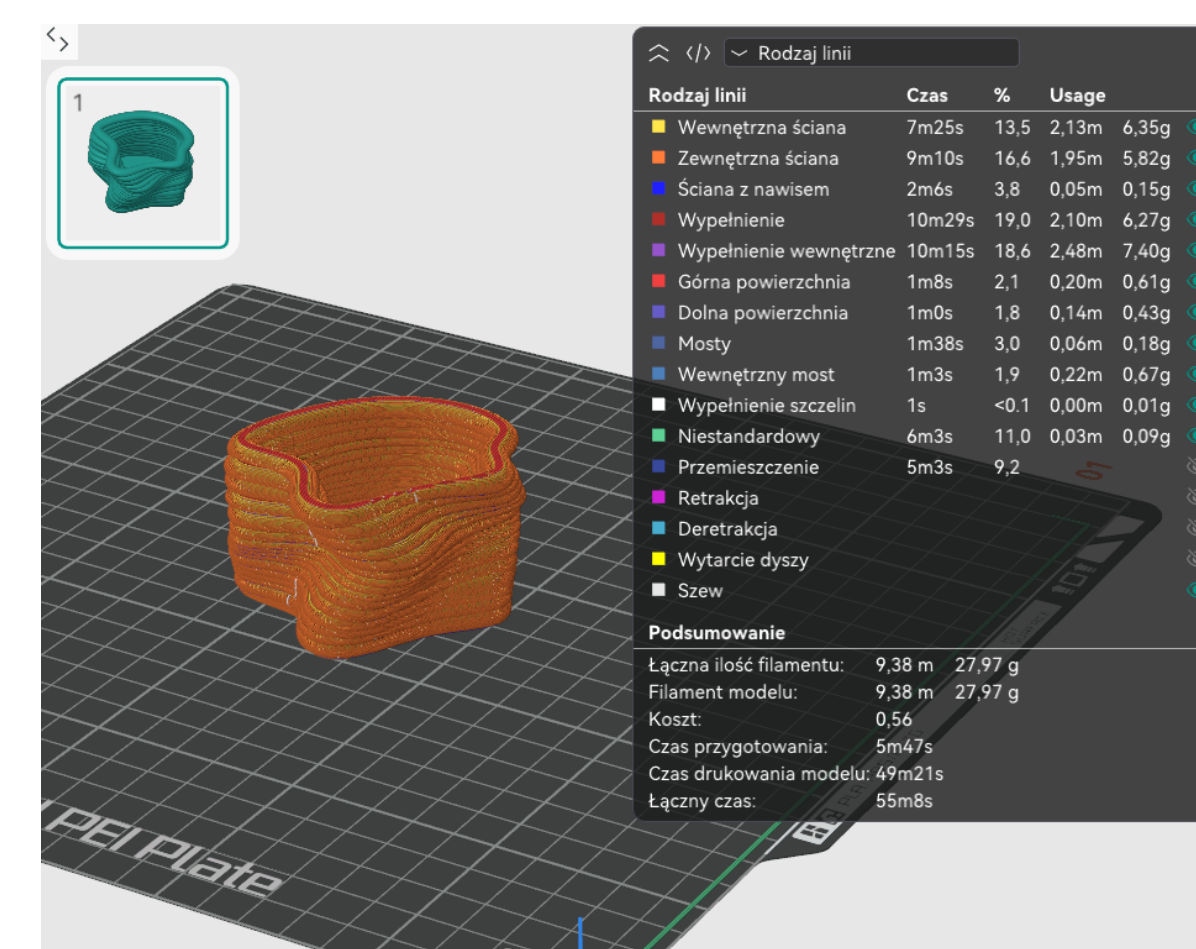


### Specyfikacja mieszanek materiałowych

Skupiając się na optymalizacji cyfrowego przepływu informacji i architekturze formy, udana realizacja całego przedsięwzięcia nie byłaby możliwa bez uwzględnienia fizykochemicznych uwarunkowań tworzywa. Zdolność do natychmiastowego zagęszczenia się zaraz po opuszczeniu głowicy to najistotniejsza cecha betonu do druku 3D. Na podstawie przeglądu literatury branżowej wyselekcjonowano trzy główne kierunki materiałowe, które mogą sprostać tym wymaganiom. Pierwszym z nich jest mieszanka standardowa, stanowiąca najczęstszy punkt wyjścia. Wykorzystuje ona lokalnie dostępne spoiwa – cement portlandzki oraz popiół lotny, który skutecznie zagęszcza strukturę i zwiększa jej wytrzymałość. Tam, gdzie potrzebna jest wyższa odporność na pęknięcie i gwarancja, że warstwy nie ulegną zapadnięciu, stosuje się mieszankę wysokowydajną. Wzbogacenie jej o pył krzemionkowy i włókna polipropylenowe, wraz z odpowiednimi modyfikatorami lepkości, drastycznie zwiększa granicę płynięcia betonu. Trzecią, wysoce ekologiczną alternatywą jest mieszanka geopolimerowa, całkowicie pozbawiona tradycyjnego cementu. Opiera się ona na aktywowanym alkalicznie zużu i popiołach, a dzięki dodatkowi tiksotropowym (np. nanoglince) wykazuje ogromny potencjał w kształtowaniu dekoracyjnych form. Niezależnie od wybranego wariantu, odpowiednio skomponowana chemia budowlana pełni tu rolę niezbędnego fundamentu technologicznego. To ona ostatecznie gwarantuje, że skomplikowana geometria, wygenerowana z poziomu skryptu Grasshoppera, zostanie wiernie i trwale odwzorowana w rzeczywistym, bezszalunkowym obiekcie.

### Przygotowanie do druku

Zwężeniem cyfrowej części projektu jest konieczność przekształcenia rzeźbiarskiej bryły na precyzyjne komendy maszynowe, czyli tak zwany G-code. Translacja ta odbywa się w zaawansowanych programach tnących (slicerach), na przykład w aplikacji Orca Slicer.



### Wizualizacja obiektów końcowych

Bezpośrednim dowodem na skuteczność opracowanej metodyki są finalne projekty obiektów małej architektury, przygotowane do realnego wdrożenia w przestrzeni miejskiej. Pierwszym przykładem jest zindywidualizowana donica o wysoce złożonej, przypominającej ażurową plecionkę strukturze. Obiekt ten, zlokalizowany w kontekście prywatnego ogrodu, doskonale ukazuje estetyczny potencjał gęsto próbkowanej geometrii algorytmicznej. Drugim przykładem jest masywniejszy element pełniący funkcję siedziska połączonego z miejskim kwietnikiem, osadzonego w scenarii zielonego parku.

### Summary in English

This research outlines a comprehensive technological workflow for the formwork-free 3D printing of mid-sized concrete urban furniture. The core objective is to establish a precise transition from a generative digital model to a stable physical object, leveraging computational design rather than traditional casting methods. By utilizing parametric modeling tools, specifically Rhinoceros and Grasshopper, the project demonstrates how complex, organic, and highly customized architectural forms can be efficiently developed and manufactured. The digital geometry generation relies on advanced visual scripting. The process begins with a base curve that is vertically duplicated to simulate material layers. This virtual stack is sampled into control points, from which radial vectors dictate the deformation of the shape. By applying trigonometric functions, such as sine waves, alongside NURBS curves, designers can effortlessly sculpt and fold the object's exterior. This parametric environment allows for the rapid generation of diverse morphological variations—ranging from openwork woven structures to deeply folded, massive forms. Crucially, this setup enables immediate structural evaluation to control the center of gravity and overhang angles, which are vital for self-supporting extrusion. Successful fabrication also requires an understanding of material properties. The study reviews three specific concrete mixtures—standard cementitious, high-performance, and eco-friendly geopolymers—capable of retaining their shape immediately after leaving the nozzle. Before final concrete extrusion, the digital models are translated into machine G-code using slicing software and validated through scaled PLA test prints. Ultimately, the project presents two fully developed urban elements: an intricate garden planter and an organic park seat, proving the immense potential of integrating parametric design with additive manufacturing.

Płynne, organiczne i głębokie pofałdowania jego zewnętrznej powłoki są namacalnym przykładem tego, jak technologia druku 3D potrafi całkowicie wyzwolić formę z kanciastych i topornych rygorów narzucanych przez tradycyjne płyty szalunkowe. Wykonane wizualizacje są idealnym punktem wyjściowym do rozmów z inwestorami umożliwiającym ukazanie proponowanych projektów w realistycznym środowisku



Bryła 1



Bryła 2

### Podsumowanie

Przeprowadzone prace projektowe jednoznacznie dowodzą, że integracja środowiska projektowania parametrycznego Rhinoceros/Grasshopper z technologią ekstruzji betonu to wysoce efektywne rozwiązanie dla architektury. Elastyczność skryptów algorytmicznych nie tylko drastycznie skraca czas poszukiwania formy, ale przede wszystkim pozwala tworzyć rzeźbiarskie obiekty, których produkcja dawnymi metodami byłaby nierentowna. Wypracowany proces udowadnia, że innowacyjne podejście od punktu do finalnego obiektu otwiera nowy, bezszalunkowy rozdział w projektowaniu wyposażenia naszych miast.

### Bibliografia

1. Boswell, R.A., Leal da Silva, W.R., Bos, F.P., Schipper, H.R., Lonka, D., Hack, N., Klotz, H., Mechtcherine, V., Wangler, T., Rossetti, N. (2020). A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. Cement and Concrete Research, 134, 106068. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106068>
2. Boswell, R.A., Leal da Silva, W.R., Jones, S.Z., Dirvenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research, 112, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
3. Wolffs, R.J.M., Bos, F.P., Saleh, T.A.M. (2018). Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. Cement and Concrete Research, 106, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.010>
4. Rehinan, A.U., Kim, J.-H. (2021). 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. Materials, 14(14), 3800. <https://doi.org/10.3390/ma14143800>
5. Ziejewska, C., Marczyk, J., Korniejko, K., Bednarz, S., Sroczynski, P., Łach, M., Mikula, J., Figliola, B., Szechynska-Hebda, M., Hebda, M. (2022). 3D Printing of Concrete-Geopolymer Hybrid. Materials, 15(8), 2815. <https://doi.org/10.3390/ma15082815>
6. Vantghem, G., Ooms, T., De Corte, W. (2021). VoxelPrint: A Grasshopper plug-in for voxel-based numerical simulation of concrete printing. Automation in Construction, 122, 103469. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103469>

**SKN BIM – Projektowania Numerycznego Struktur Architektonicznych**  
**Wydział Architektury Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki**  
**Katedra Projektowania Architektonicznego A-6**  
**Opiekun: dr inż. arch. Wojciech Ciepłucha**

