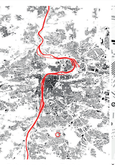
Architektonicko - urbanistická studie území Štúrova - Zálesí Praha 4

Bc. Ondřej Sedlák, Bc. Michal Talabishka, Bc. Michal Rešetár,
ČVUT, 129AMG2, ZS 2020/2021
doc. Ing. arch. Luboš Knytl, Ing. arch Petr Lédl, Ph.D.



Schwarzplan - Praha

Řešené území se nachází v jihovýchodní části Prahy, konkrétně v katastrálním území Krč, které je součástí městské část Praha 4.

Širší vztahy

Řešené území má rozlohu 65 914 m² a v kontextu širších vztahů je ze západní strany ohraničené lesem Velký Háj a z východní strany Kunratickým lesem. Na této hranici se také nachází Thomayerova nemocnice. Území je ze severu a z jihu obklopeno oblastí rodinných domů a jihovýchodně od řešeného území se nachází oblíbená Krč. Z analýzy občanské vybavenosti je zřejmý nedostatek kvalitního veřejného prostranství a kulturních staveb. Důležitou doprovodnou linkou je plánovaná jižní spojka a blízká železniční trať. V blízké budoucnosti bude dotčené území také dostupné novou linkou D pražského metra.

- Trasa metra D
- Jižní spojka
- Železniční trať Branik - Kačerov
- Hlavní komunikace
- Východ - Kunratický les
- Západ - Velký háj
- Oblast rodinných domů
- Oblast bytových domů
- Thomayerova nemocnice
- Školství
- Sport
- Zdravotnictví
- Náměstí
- Obchod
- Administrativa
- Veřejné stavby
- Sociální služby

Současný stav a Nová Krč

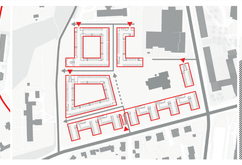
Území ohraničuje ze severu domov pro osoby se zdravotním postižením Domov Sulická, ze západu ulice Sulická, Velký háj a bytová domova pro seniory KVC, z jihu ulice Zálesí a navazující rozsáhlá zástavba rodinných domů, a z východu ulice Štúrova s budoucím developerským plánem Nová Krč. Nová Krč bude dojmově napojena na novou stanici plánovaného metra D - Nemocnice Krč. Na severovýchodě se nachází bytový dům s 186 podzemními, který v území představuje nevítanou výškovou dominantu. Na prostoru se nachází vodárenský objekt a teplárna Krč.

Koncept

Návrh vychází ze 2 hlavních kompozičních os. Osa S-J navazuje na existující ulici V Plání a směřuje na fasádu Domovu Sulická. Osa V-Z směřuje na fasádu budovy domova pro seniory KVC a na nárožní výškovou dominantu čtvrti Nová Krč. Doprostřed řešeného území je navržena nové náměstí s teplárnou a jejím novým kulturním využitím. Západní zástavba bytových domů se otevírá do lesa Velký háj. Jižní hranice administrativních budov reaguje na zástavbu rodinných domů svou mortalitou. Nové výškové budovy v severní části kopírují nedalekou výškově dominantní stávající bytovou domu.

Dopravní řešení

Z jižní a východní strany je řešené území ohraničené dopravně zatěženými ulicemi Zálesí a Štúrova. Z toho důvodu je hlavní dopravní napojení a obslužnost území navržený z ulice Sulická, která je v současné době používaná pouze pro obslužnost domu pro seniory a Domov Sulická. Priority v území mají chodci a cyklisté. Parkovací stání se nachází v podzemních garážích pod objekty a jsou doplněna podélným stáním na povrchu. Zastávky autobusové MHD v ulici Štúrova budou v rámci projektu zachovány. Nová zastávka plánovaného metra D zlepší dopravní obslužnu celé oblasti.



Podzemní parkování

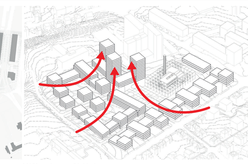
Podzemní garážová stání pod objekty jsou doplněna podélným a příčným návštěvnickým stáním na povrchu. Podzemní parkování je navrženo tak, aby kapacitně vyhovělo pro potřeby obyvatel a návštěvníků. Umístění vjezdů do podzemních garáží vychází z podmínek pozemku a jeho svažitosti. Každý ze dvou bytových bloků s mírnějšky na severovýchodě řešeného pozemku má své oddělené podzemní parkování.

Prostranství

Centrálním veřejným prostorem území je náměstí se zrekonstruovanou teplárnou. Může se zde odehrávat velké množství kulturních akcí, kterých je v okolí nedostatek. Vnitrobloky jsou koncipovány jako polovřené zelené prostory s dětským a multifunkčním hřištěm. Za výškovými budovami v severovýchodní části území se nachází dětské a workout-ové hřiště. Dalším veřejným prostory v území jsou vstupní předprostory administrativních budov, které jsou součástí měkkého hraničního přechodu mezi stávajícími rodinnými domů a řešeným územím.

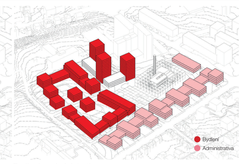
Zeleň v území

Vzhledem ke stále důležitějšímu tématu městské zeleně v Praze představuje řešení zelených ploch důležitou součást urbanistického návrhu, ze kterého vedlejší důraz na zakomponování zeleně do uličních profilů, kde stromy představují důležitý kompoziční prvek. V rámci náměstí je navržen bosket, který dotváří prostor náměstí a v letních měsících poskytuje žádoucí stín a zastoupení efektní. Stejně tak jsou bohaté zelené plochy navržené v prostorech vnitrobloků, kde zeleň nenarušuje na blízký les Velký háj. Další krok v budování zeleň v území dopňuje veliká protierozní.



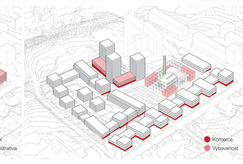
Výškové uspořádání

Výškové budovy navržny v severovýchodní části řešeného území jasně konkurují nedalekou výškově dominantní stávajícího bytového domu. Snahou urbanistického návrhu je přesunout pozornost na novou dominantu a vytvořit nekonzistentní výškové uspořádání budov v území. Postupná výšková gradace budov má za úkol jemnění přechodů do zelené a okolní výstavby na hraničních území a ekonomovat dominanty tam, kde je to potřeba.



Bydlení a administrativa

Obytné budovy jsou v návrhu umístěny hlouběji v území, blíže ke klidnému prostředí lesa Velký háj a zároveň dále od hluku z dopravně vytížených ulic Zálesí a Štúrova. Ve vnitrobloků jsou bydlí v přízemí doplněny předzahrádkami. K bydlení jsou určeny také tři dominantní výškové budovy v severovýchodní části území. Administrativní budovy na jihozápadní hranici oblasti reagují svým umístěním a morfologií na okolí a zároveň tvoří hlukovou bariéru pro bytovou zástavbu za nimi. Jižní pás administrativních budov je ukončen vyšším dominantami, které doplňují chybějící nárožíí v křižovatkách.



Komerce a vybavenost

Plochy komerce můžeme najít v přízemí administrativních budov a v přízemí vybraných bytových objektů. Tyto plochy jsou orientovány do nitra území, do dětských hřišť a směrem na náměstí. Ve výchozí části nemělo se nachází stávající budova teplárny Krč, která projde v rámci projektu rozsáhlou rekonstrukcí. Chod teplárny je zachována a doplněn novým kulturním využitím. V nových prostorách můžeme nalézt galerii či skatepark. Další prostory jakými jsou například posilovna, či knihovna se nacházejí ve druhém a třetím podlaží v budově mezi vidlemi.

Řešené území	Plocha
Výměra pozemku	65 914 m²
Zastavěná plocha	26 740 m²
Hrubá podlažní plocha	83 792 m²
Zeleň	19 654 m²

42 677 m² hrubé podlažní plochy

22 400 m² hrubé podlažní plochy

14 195 m² hrubé podlažní plochy

4 320 m² hrubé podlažní plochy

5.NP +16.500
3.NP +9.500
6.NP +20.000
4.NP +17.000
4.NP +18.000
4.NP +20.000
6.NP +23.000
4.NP +12.000
13.NP +43.500
15.NP +54.000
3.NP +21.000
4.NP +21.000
4.NP +22.000
6.NP +21.000
3.NP +17.500
5.NP +22.500
4.NP +21.500
3.NP +18.000
4.NP +19.000
4.NP +20.000
4.NP +11.000
3.NP +21.500
5.NP +19.500
4.NP +20.500
3.NP +21.000
4.NP +19.000
4.NP +18.000
4.NP +17.000
4.NP +21.000
4.NP +22.000
6.NP +21.000
3.NP +17.000
4.NP +18

ARCHITEKTÚRA 3D TLAČE

ARCHITEKTÚRA 3D TLAČE

České vysoké učení technické v Praze
Fakulty stavební ČVUT
Architektura a stavitelství
129AMG2

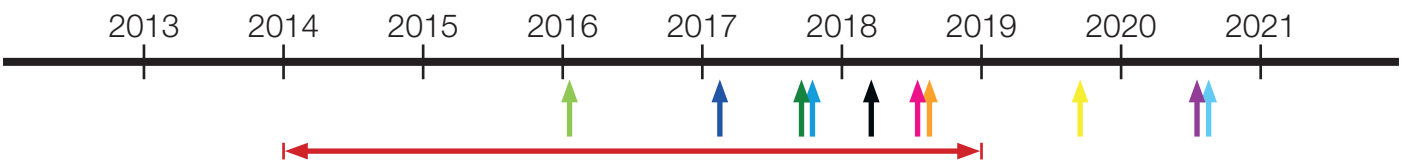
Autor:
Bc. Michal Rešetár

Konzultanti:
Ing. arch. Kateřina Nováková, Ph.D.
Ing. arch. Jiří Vele

Vedúci práce:
doc. Ing. arch. Luboš Knytl
Ing. arch Petr Lédl, Ph.D.

Obsah

01	3D vytlačený betónový most	01
02	Gaia	05
03	Yhnova House	09
04	Be More 3D House	12
05	Kamp C 3D House	15
06	3D Housing 05	18
07	Apis Cor 3D House	22
08	Le Pavillon	25
09	Prvok	29
10	Office of the Future	33
11	Project Milestone - vízia	37
12	NASA Centennial Challenge: 3D-Printed Habitat	41
13	SEArch+, Apis Cor	42
14	Foster+Partners, Branch Technology	44
15	Pennsylvania State University	46
16	AI SpaceFactory	48
17	Ďalšie príklady	50
18	Použité zdroje	53



obr. 01 Poloha analyzovaných stavieb

Predslov

Technológia 3D tlače

Stavebný priemysel čelí v dnešnej dobe čoraz väčším výzvam v súvislosti s rastúcou populáciou a zväčšujúcou sa urbanizáciou. Nízka produktivita a vysoký dopad na životné prostredie, ktoré sú pre stavebný priemysel charakteristické, sa môžu zmeniť s príchodom digitalizácie. Tá v stavebnom sektore stále zaostáva. Dôkazom je iba zlomok predaných robotov v stavebnom priemysle v porovnaní s inými odvetviami ako napríklad v prípade automobilového či poľnohospodárskeho priemyslu. Je potrebné prijať nové výrobné postupy, akým je napríklad 3D tlač z betónu, ktoré by čelili týmto novým výzvam.

3D tlač z betónu redukuje množstvo použitého materiálu v porovnaní s tradičnými formami výstavby. Dochádza tým k znižovaniu finančných nákladov na stavbu a negatívnych dopadov na životné prostredie. Na vytvorenie objektu pomocou tejto inovatívnej technológie nie je potrebné použitie debnenia, ktoré v praxi predstavuje nemalé finančné náklady. Množstvo pracovnej sily v procese výstavby je redukované vďaka automatizovanej výrobnej technike. 3D tlač ponúka nové možnosti rôznych geometrických tvarov, ktoré boli doposiaľ ťažko realizovateľné. Pre architektov, stavebných inžinierov a dizajnérov predstavuje táto technológia úplne nové možnosti. Sami sme svedkami toho, že čoraz častejšie pribúdajú po celom svete nové a nové projekty, ktoré dokazujú potenciál 3D tlače.

S novou technológiou tak odlišnou od tradičného procesu výstavby však prichádzajú aj nové výzvy. Aby sa dosiahol správny súlad v procese tlače, bude potrebné stanoviť vhodné zloženie materiálu, definovať zásady vystužovania a stratégie montáže. Taktiež bude nutné presne určiť stavebné predpisy, podľa ktorých sa budú navrhovať konštrukcie vytvorené 3D tlačou [0.1].

V tejto práci môžeme nájsť niekoľko úspešne realizovaných projektov zo sveta, ktoré sú príkladom použitia tejto technológie budúcnosti. Práca sa zameriava na základný opis, technologickú a materiálovú stránku jednotlivých projektov.

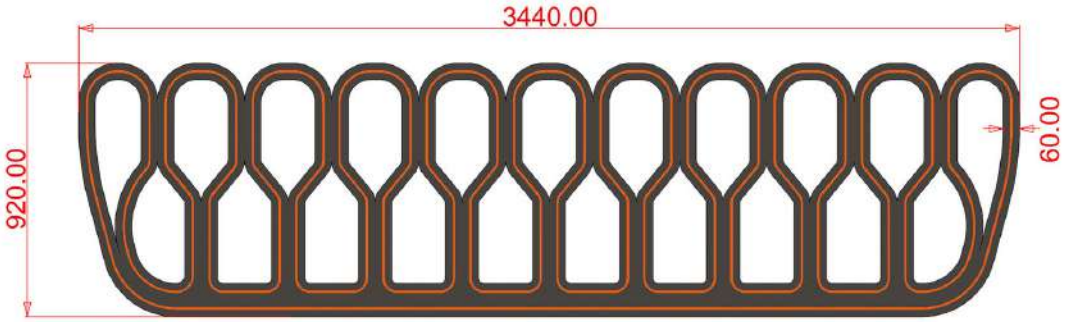
obr. 02 Most vytlačený technológiou 3D tlače z betónu

01 3D vytlačený betónový most

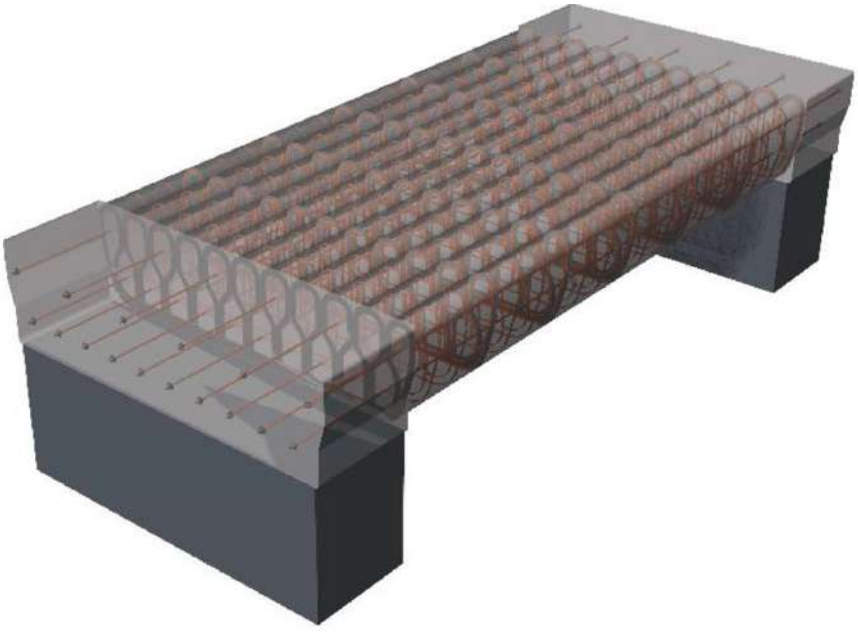
Rok	2017
Poloha	Gemert, Holandsko
Spoločnosť	BAM Infra, Eindhoven University of Technology
Rozmery	6,5 x 3,5m

Tento unikátny most vytvorený 3D betónovou tlačou môžeme nájsť v holandskom meste Gemert. Most je súčasťou cyklistickej trasy nazvanej Lieve Vrouwensteeg a prechádza cez malý kanál Peelse Loop [1.1]. Vznikol v spolupráci medzi Technologickou univerzitou v Eindhovene a stavebnou firmou Bam Infra. Na vytvorenie mostu technológiou 3D tlače z betónu bolo použité menšie množstvo materiálu v porovnaní s bežnými metódami výstavby [1.2].

Most sa skladá zo šiestich samostatne vytlačených častí (prierez rozmerov 3440 x 920mm), ktoré tvoria v jednom celku približne 800 vrstiev betónu. Určité časti mosta boli počas procesu tlače vystužené vysokopevnostným oceľovým drôtom, aby sa zabránilo krehkej poruche pri krútení konštrukcie. Týmto spôsobom pôsobia tieto vystužené časti podobne ako bežné betónové konštrukcie vystužené šmykovými strmeňmi. Šesť samostatne vytlačených častí mosta bolo následne spojených a most bol v dutinách v pozdĺžnom smere predpätý oceľovou výstužou na počiatočné zaťaženie 150kN. Výstuž je možné v budúcnosti opäť napnúť, ak dotvarovanie a zmršťovanie materiálu prekročí uvažované hodnoty. Rovnomerne rozložené návrhové zaťaženie bolo stanovené na 5.0kN/m^2. Stavba tohto jedinečného 3D vytlačeného betónového mosta trvala približne tri mesiace [1.1].



obr. 03 Prierez 3D vytlačeného mostu



obr. 04 Schéma mostu so zobrazenou výstužou

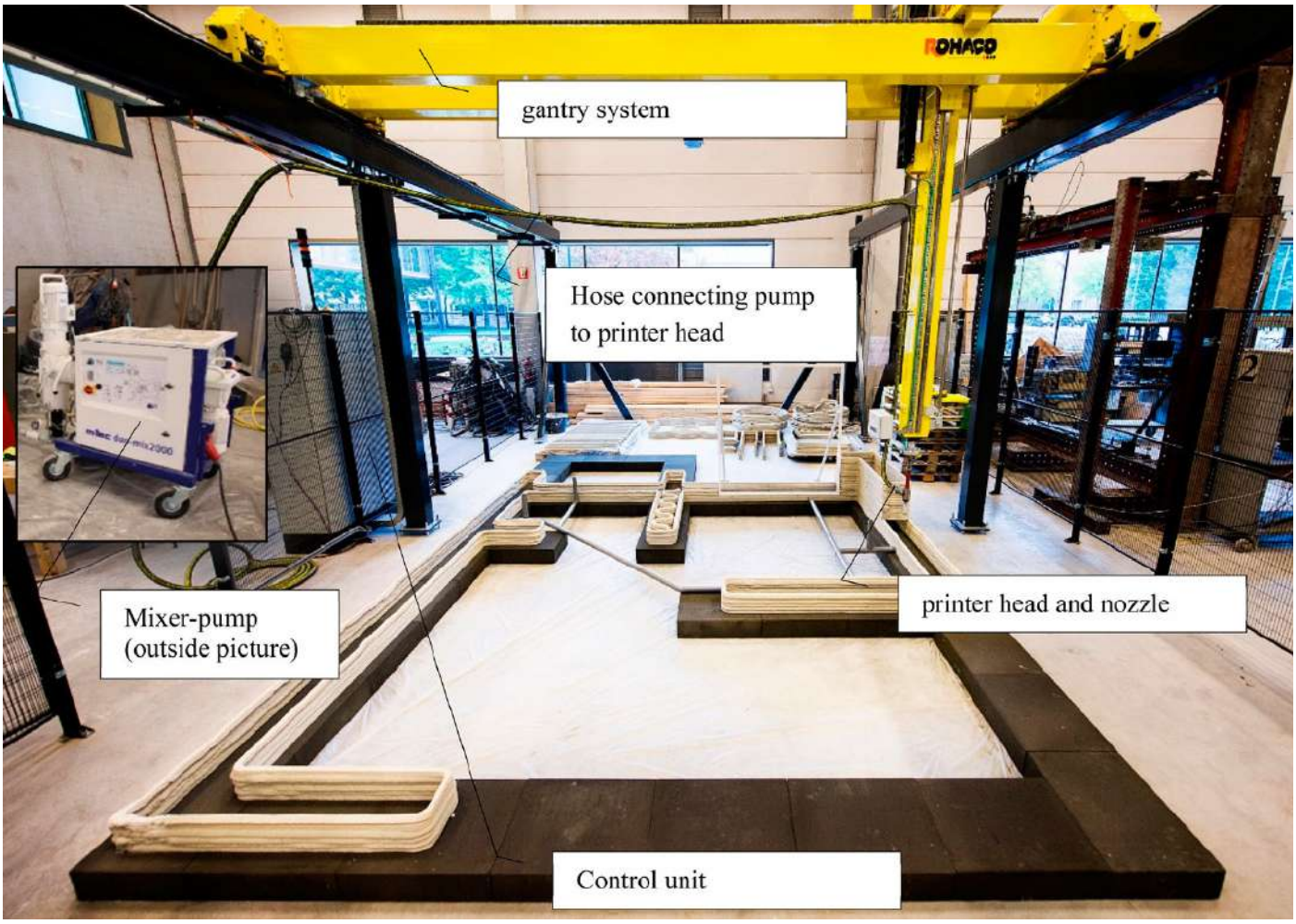
obr. 05 Vizualizácia mostu

Technológia

Na vytlačenie mostu bola použitá tlačiareň, ktorú môžeme nájsť v útrobách Technologickej univerzity v Eindhovene. Jedná sa o portálového robota, ktorý disponuje pracovným priestorom 9 x 4,5 x 2,8m. Vedľa portálovej konštrukcie robota sa nachádza zariadenie na miešanie a pumpovanie. Betónová zmes je tu zmiešaná s vodou a ďalej hadicou pumpovaná do hlavy tlačiarne, ktorá sa nachádza na konci vertikálneho ramena. Pohyb hlavy tlačiarne je riadený kontrolnou jednotkou. Tento portálový robot má štyri stupne voľnosti [1.3].

Počas procesu vývoja mosta bol navrhnutý nový tvar trysky. Nová tryska umožňovala počas tlače vystužiť vrstvy betónu oceľovým drôtom bez toho, aby drôt poškodil betónovú vrstvu. Na vytvorenie správnej konzistencie betónového filamentu bolo potrebné presne definovať rozmer filamentu v reze, rýchlosť tlače a tlak pumpy. Všetky tri parametre sú medzi sebou úzko prepojené a sú závislé na viskozite betónu. Bola stanovená frekvencia motora pumpy na 150rpm, ktorá kontroluje tlak pumpy. Predvolená rýchlosť tlačiarne je 100mm/s avšak v tomto projekte bola rýchlosť tlače nastavená na 80mm/s. Tlačiareň je schopná počas tlače redukovať rýchlosť a frekvenciu v závislosti na rádiuse krivky tlače. Dochádza tak k rovnomernému rozloženiu filamentu v ostrých krivkách a rohoch. Geometriu a vlastnosti vytlačeného produktu ovplyvňuje aj výška hlavy tlačiarne nad tlačeným povrchom.

Vytlačenie jednej vrstvy trvalo 5 minút a 20 sekúnd. Vytlačenie všetkých častí mosta trvalo 48 hodín. Počas tlače mosta dochádzalo každé dve hodiny k striedaniu dvoch „vlhkých“ časti systému vrátane dvoch miešacích zariadení a dvoch púmp. Tým sa zabránilo vytváraniu suchých spojov v systéme, ktoré by mohli spôsobiť poškodenie systému alebo zníženie kvality vytlačeného materiálu [1.1].



obr. 06 Portálová 3D tlačiareň v priestoroch Technologickej univerzity v Eindhovene

Materiál

Na vytlačenie mostu bol použitý materiál s názvom Weber 3D 115-1. Tento na mieru navrhnutý materiál prirodzene nevyhovuje štandardnému označeniu betónu (C30/37, atď.). Univerzita a dodávateľ materiálu (spoločnosť Saint-Gobain Weber Beamix) realizovali rozsiahli publikovaný a nepublikovaný výskum zaoberajúci sa vlastnosťami materiálu [1.1]. Zmes tvorí portlandský cement (CEM I 52,5 R), kremičitý agregát s optimalizovanou distribúciou veľkosti častíc a maximálnou veľkosťou častíc 1mm, vápencové plnivo, špecifické prísady pre ľahšie čerpanie, modifikátory reológie na získanie tixotropného správania čerstvej malty a malé množstvo polypropylénových vlákien na zníženie tvorby trhlín v dôsledku skorého tvrdnutia [1.3].

Aby most spĺňal holandské stavebné predpisy, prešiel niekoľkými skúškami. Rovnako tak samotný materiál mostu bol rozsiahle testovaný. V rámci výskumu prebehol deštruktívny test modelu mosta v mierke 1:2 a neskôr zaťažovací test skutočnej konštrukcie. Most bol po osadení na svoje miesto zaťažený desiatimi kontajnermi naplnenými 500l vody. Celkové zaťaženie mostu predstavovalo 57kN [1.1].

Table 1. Structural properties of Weber 3D 115-1 print mortar, as used in the structural design of the bridge.

Property	Dir.	Age	Symbol	Value
Density		28 days	P	2,000 kg/m^3
Modulus of elasticity		28 days	E	19,000 MPa
Average compressive strength	*u*	28 days	$f_{ck,u}$	23.2 MPa
	v	28 days	$f_{ck,v}$	21.5 MPa
	w	28 days	$f_{ck,w}$	21.0 MPa
Average tensile strength (also used for flexural tension)	*u*	28 days	$f_{ck,u}$	1.9 MPa
	v	28 days	$f_{ck,v}$	1.6 MPa
	w	28 days	$f_{ck,w}$	1.3 MPa
Creep factor[a]		7 days	φ_7	1.0
		14 days	φ_{14}	2.5
		56 days	φ_{56}	3.0
Shrinkage		7 days	ε_7	0.6
		14 days	ε_{14}	1.2
		56 days	ε_{56}	1.5

[a]After 28 days.

Notes: For the directional dependency, a relative orientation of axis *u*, *v*, *w* is used (Bos *et al.*, 2016), indicating the direction parallel to the print in the horizontal plane, perpendicular to the print direction in the horizontal plane, and vertically perpendicular to the print direction (or parallel to the robot arm), respectively.

obr. 07 Štrukturálne vlastnosti materiálu Weber 3D 115-1

obr. 08 Vystužovanie vysokopevnostným oceľovým drôtom počas procesu tlače

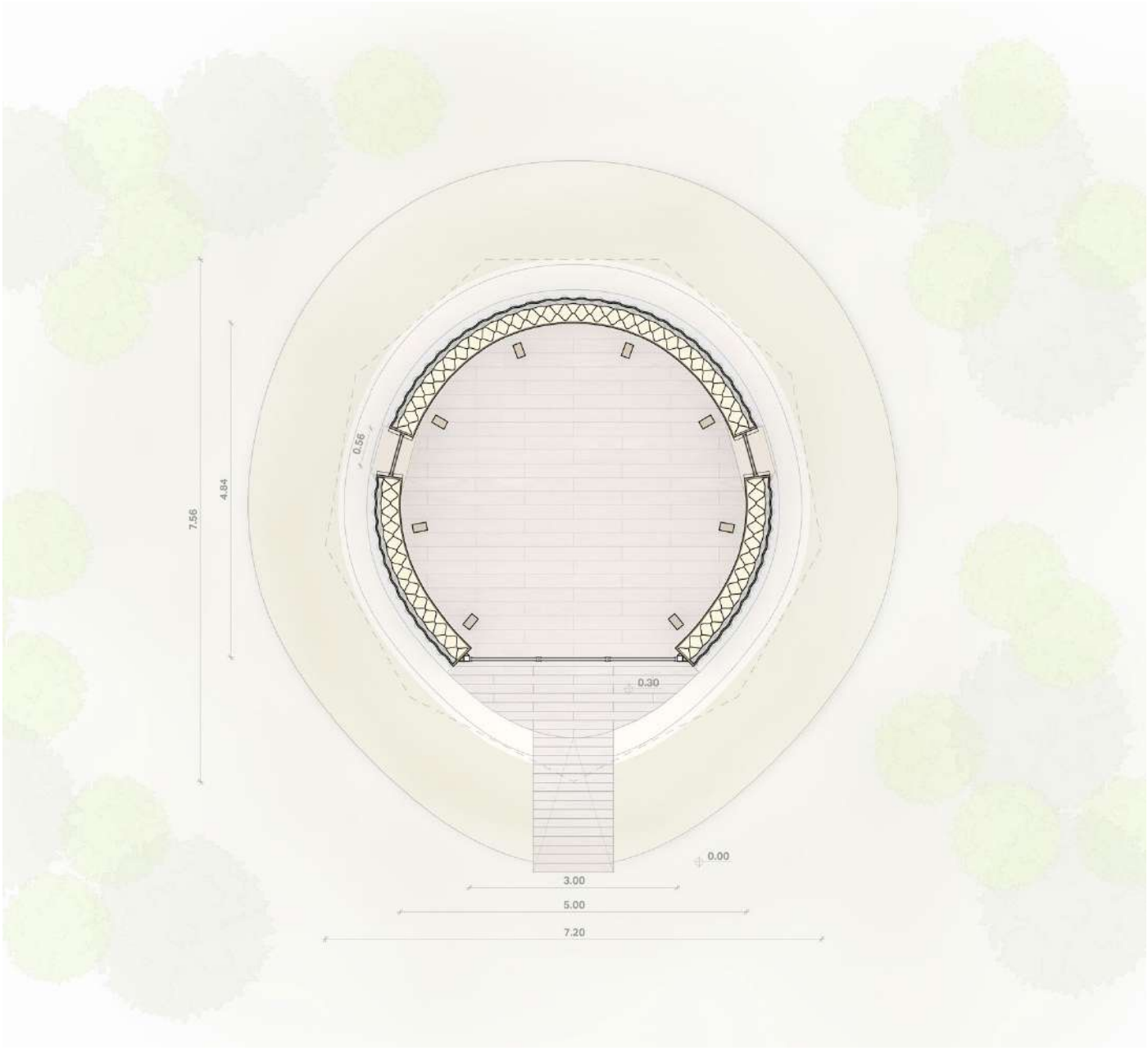
obr. 09 3D vytlačený dom Gaia

02 Gaia

Rok	2018
Poloha	Massa Lombarda, Taliansko
Spoločnosť	WASP
Plocha	30 m^2

Surová zemina je považovaná za jednu z najstarších stavebných materiálov na zemi a dodnes sa s ňou môžeme stretnúť na staveniskách v krajinách tretieho sveta. Ryža je jedným z hlavných zdrojov obživy pre viac ako polovicu populácie. Pri jej pestovaní je vyprodukované veľké množstvo bio odpadu. Práve vďaka spojeniu zeminy a ryže bol vytvorený prvý dom 3D vytlačený z hliny s názvom Gaia [2.1]. Stavbu vytvorila talianska firma WASP. Aktuálnym cieľom spoločnosti je spraviť proces 3D tlače dostupnejším, aby bolo možné tlačiť lacné konštrukcie z miestnych materiálov priamo na stavenisku v krajinách tretieho sveta. V budúcnosti môže napríklad z 1ha obrábaného ryžového poľa vzniknúť materiál na 100m^2 zastavaného prostredia [2.2].

Vytlačiť steny domu Gaia trvalo približne 100 hodín pri celkovom použitom množstve 9m^3 materiálu, ktorý predstavoval 22km filamentu. Výsledná stavba je celá bio rozložiteľná. Celkové materiálové náklady 3D vytlačených stien dosiahli sumu 900€. Dom poskytuje svojim obyvateľom zdravé vnútorné prostredie a energetickú efektivitu. Vďaka použitým materiálom a premyslenému návrhu nie je potrebné vnútorný priestor vykurovať či klimatizovať. Gaia predstavuje inovatívny, ekonomický, ekologický a udržateľný architektonický model, ktorý môže fungovať v krajinách po celom svete [2.1].



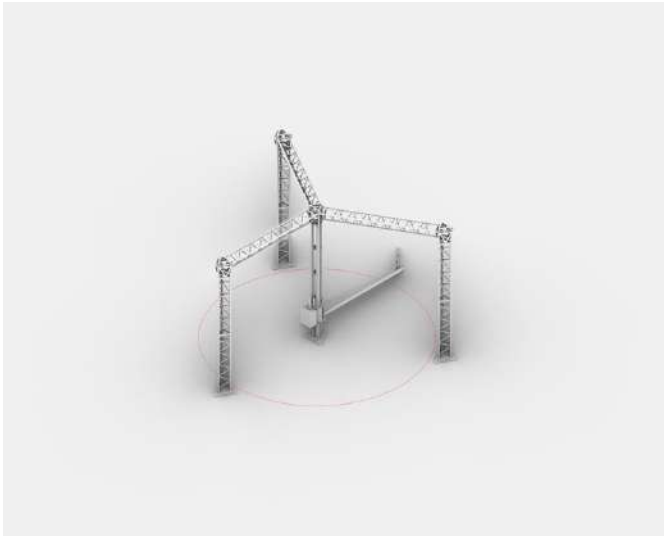
obr. 10 Pôdorys budovy Gaia

obr. 11 Rez budovou Gaia

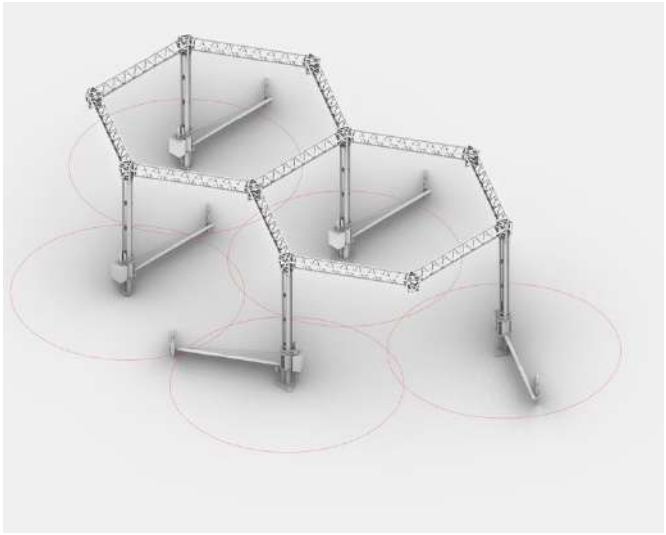
Technológia

Na stavbu domu bola použitá tlačiareň s názvom Crane WASP, ktorá predstavuje princíp klasického stavebného žeriavu upraveného pre potreby digitálnej výroby. Jedná sa o modulárny systém, ktorý môže byť zostavený v rôznych konfiguráciách v závislosti na rozmeroch tlačeného objektu. Jednotlivé moduly je možné navzájom prepojiť a vytvoriť tak nekonečný digitálny výrobný systém. Zariadenie môže tlačiť objekty z materiálov na báze zeminy, betónu či geopolymérov. Základný modul tlačiarne je tvorený troma stĺpmi výšky 4,05m a troma ramenami dlhými 3,3m [2.3]. Jednotka 3D tlačiarne pozostáva zo zvislého priehradového stĺpu a z radiálneho horizontálneho priehradového nosníku, ktorý sa otáča okolo vertikálnej osi [2.2].

- Priestor tlače zákl. modulu: Ø 6,3x(V) 3m
- Minimálna výška vrstvy: 9mm
- Priemer trysky: od 18 do 30mm
- Maximálna rýchlosť tlače: 300mm/s
- Maximálna rýchlosť jazdy: 500mm/s
- Zrýchlenie: 20mm/s^2
- Hmotnosť: 150kg
- Input: 220/240V; 50/60Hz
- Príkon: 1,5kW [2.3]



obr. 12 Základná konfigurácia tlačiarne Crane WASP



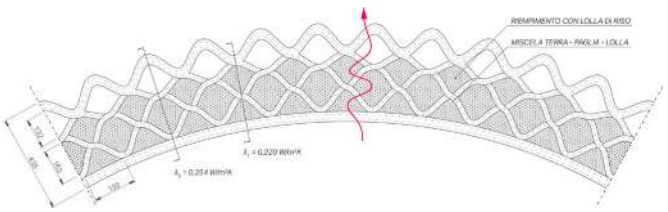
obr. 13 Modulárny systém tlačiarne Crane WASP umožňuje zväčšiť priestor tlače

obr. 14 Proces tlače domu Gaia pomocou tlačiarne Crane WASP

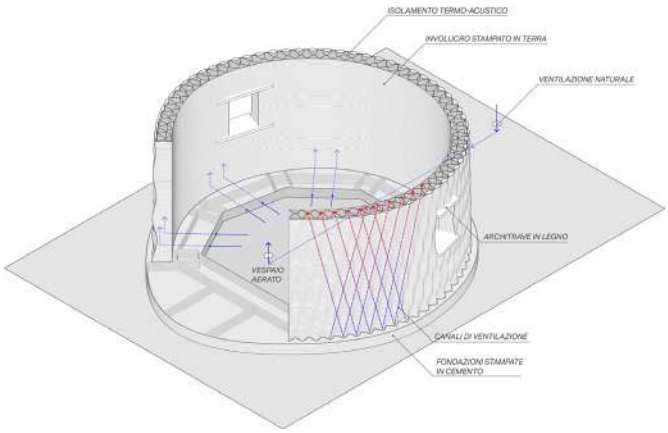
Materiál

Na stavbu domu Gaia boli použité prírodné miestne materiály, vďaka ktorým má stavba takmer nulový dopad na životné prostredie. Na realizáciu domu dodala spoločnosť RiceHouse rastlinné vlákna. Spoločnosť WASP vytvorila filament, ktorý je tvorený z 25% miestnou zeminou (30% íl, 40% bahno a 30% piesok), zo 40% nasekanou ryžovou slamou, z 25% ryžovou plevou a z 10% hydraulickým vápnom [2.1]. Hustota vytlačeného materiálu dosahuje 1400-1500kg/m^3. Precedená suchá zemina sa zmieša s vodou (42l na 100kg suchej zeminy) a surovými vláknami vo vlhkom panvovom mlyne. Po dosiahnutí správnej konzistencie prebieha extrudovanie materiálu pri konštantnom tlaku 2bar [2.2].

Vďaka parametrickým softvérom, ktoré boli použité pri návrhu domu, bolo možné navrhnúť komplikovaný vlnitý profil steny [2.1]. Stena je tvorená zo siedmych vytlačených plášťov (vrstiev) s celkovou hrúbkou 40cm s cieľom integrovať tepelno-akustickú izoláciu (pomocou ryžových pliev) a prirodzenú ventiláciu vzduchu do obálky budovy [2.2]. Ryžové plevy boli taktiež použité pri výrobe vnútorných omietok a pri výrobe tepelno izolačnej vrstvy strechy. Gaia ponúka inovatívne riešenie a predstavuje úspešný príklad v oblasti zelených budov [2.4].



obr. 15 Súčiniteľ prestupu tepla 3D vytlačenou stenou bol stanovený na U=0,249W/m^2*K [2.2]



obr. 16 Návrh tvaru steny je založený na sínusovej matematickej funkcii [2.2]

obr. 17 3D vytlačená stena bola tepelne izolovaná 20cm hrubou vrstvou ryžových pliev vo vnútorných dutinách steny [2.2]

obr. 18 Fotografia 3D vytlačeného domu Yhnova

03 Yhnova House

Rok	2017
Poloha	Nantes, Francúzsko
Spoločnosť	TICA architecture, Batiprint3D
Plocha	95 m^2

Prvá rodina na svete, ktorá sa nasťahovala do domu vytvoreného 3D tlačou, je dôkazom toho, že kombinácia otázky sociálneho bývania a 3D tlače môže v praxi fungovať. 3D vytlačený dom sa nachádza v meste Nantes na západe Francúzska [3.1].

Ústav Laboratory of Digital Sciences of Nantes spolu s Research Institute in Civil and Mechanical Engineering začali výskumný projekt v oblasti autonómnych konštrukčných systémov. Po spolupráci s Nantes Métropole, Nantes Métropole Habitat, SATT West Valorisation, architektonickým štúdiom TICA architecture a radou stavebných firiem vznikol dom s názvom Yhnova o ploche 95m^2 [3.2]. V dome môžeme nájsť štyri spálne, dve kúpelne a priestrannú obývaciu miestnosť s kuchyňou uprostred dispozície [3.3]. Steny tohto domu boli vytvorené technikou Batiprint3D™. Jedná sa o steny, ktoré sú tvorené dvoma vrstvami polyuretánovej peny, medzi ktorými je uložený samozhutniteľný betón. Táto technológia umožňuje vytvoriť naraz nosnú konštrukciu s tepelnou izoláciou [3.2]. Výhodou tejto technológie je absencia dokazovania bezpečnosti konštrukcie ako to je v prípade konštrukcie tvorenej z 3D vytlačených betónových stien, keďže sa v tomto prípade jedná o betónovú stenu veľmi podobnú stenám, ktoré sú postavené tradičnou metódou pomocou klasického debnenia [3.4].

Technológia

Tlačiareň pozostáva z dvoch robotov. Viac kĺbové rameno od firmy Stäubli (PAA) a Automatický Vedené Vozidlo od firmy BA Systèmes (AGV). Hlavný robot (PAA) má na starosti ukladanie polyuretánovej vrstvy na presne určené miesto. Je pripojený na miešacie zariadenie, v ktorom sa mieša izokyanát a polyol [3.4]. Robotické rameno rovnako tak ukladá aj betón medzi vrstvy PU peny, proces je tak plne automatizovaný [3.2]. Sekundárny robot (AGV) zabezpečuje pohyb primárneho robota (PAA) v rovine xy po betónovej základovej doske. Robot AGV je schopný pohybovať sa po stavenisku a lokalizovať svoju polohu s presnosťou na 1mm vďaka systému laserov a senzorov [3.4]. Vďaka použitému systému sú obmedzenia v pohybe veľmi malé, avšak kvôli technologickému riešeniu debnenia betónu z PU peny, ktoré musí odolávať tlaku čerstvého betónu, je nutné zachovať lineárny vertikálny pohyb. Znamená to, že každá vrstva musí byť uložená presne na predchádzajúcu vrstvu bez možnosti vykonzolovania. Vzhľadom na to, že PU steny nie sú dostatočne silné na to, aby odolávali väčšiemu tlaku čerstvého betónu, je nutné ukladať betón v určitých intervaloch. Tento interval bol stanovený na každých 300mm výšky steny. Na zabezpečenie polohy PU debnenia počas procesu ukladania betónu boli použité akrylové spony, umiestnené v rovine vrstvy steny každých 250mm. Na vystuženie určitých častí stavby bola použitá bežná stavebná výstuž v betónovej vrstve steny. Konštrukcia domu bola počas celého procesu stavby dočasne zakrytá stanom, ktorý chránil prístroje pred nepriaznivými poveternostnými vplyvmi.

- Výška vytlačenej vrstvy: 50mm
- Rýchlosť tlače: 200mm/s
- Veľkosť tlačiarne: približne 1,5x2x1m
- Obsluha: 1 osoba
- Presnosť pohybu robota: 1mm [3.2]

obr. 19 Proces 3D tlače stien domu pomocou robotického ramena

Materiál

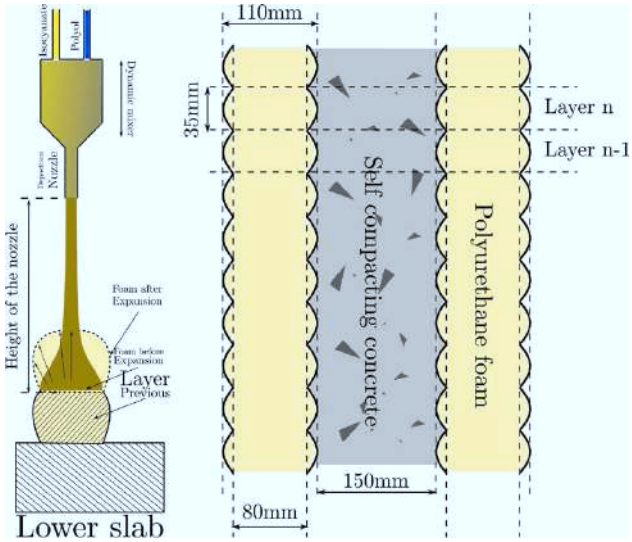
Obvodová stena domu je tvorená dvoma vrstvami polyuretánovej peny, medzi ktorými je uložený samozhutniteľný betón.

Polyuretánová pena

Polyuretán je polymér - dvojzložkový materiál získaný zmesou izokyanátu a polyolu. Materiál na vzduchu expanduje v priebehu 3 sekúnd a tvrdosť dosiahne za 45 sekúnd v závislosti na teplote zmesi a reaktivite. Hustota materiálu je rovná 35kg/m^3, súčiniteľ tepelnej vodivosti je 0,027W/m*K a Youngov modul pružnosti je 7MPa. Konštrukcia steny tvorená dvoma vrstvami PU peny a vrstvou betónu, má tepelný odpor rovný približne 6,5m^2*K/W [3.4]. Výška vrstvy dosahuje 50mm, avšak šírka sa mení v rozmedzí približne od 80mm do 150mm [3.2].

Betón

Samozhutniteľný betón je tvorený zmesou cementu CEM III 42,5, vápencovým plnivom, pieskom (0-4mm), kamenivom (4-10mm), vodou a urýchľovačom tvrdnutia. Vzhľadom na to, že debnenie je vytvorené z PUR peny je nutné, aby teplo uvolnené pri hydratácii betónu nebolo príliš veľké. V prípade nad mieru vyššej teplote môže dôjsť k poškodeniu steny [3.4].



obr. 20 Schéma vertikálneho rezu stenou

obr. 21 Skutočný rez stenou

obr. 22 Akrylátové spony umiestnené v rovine vrstvy steny

obr. 23 Prvý 3D vytlačený dom z betónu v Španielsku

04 Be More 3D House

Rok	2018
Poloha	Valencia, Španielsko
Spoločnosť	Bemore3D
Plocha	24 m^2

Prvý dom v Španielsku postavený pomocou technológie 3D tlače z betónu sa nachádza v kampuse Universitat Politècnica de València a bol vytlačený spoločnosťou Bemore3D. Tento start-up vznikol v roku 2015 v podnikateľskom prostredí univerzity [4.1]. Skupina študentov z univerzity strávila tri roky výskumom a vývojom 3D betónovej tlačiarne a betónovej zmesi.

Zámerom projektu bolo vytvoriť technológiu, ktorá by bola schopná vymodelovať akýkoľvek typ objektu pomocou FDM technológie (FDM= Fused filament fabrication). Hlavným cieľom projektu bolo znížiť súčasné náklady na konvenčné budovy o 35%, vytlačiť nosnú konštrukciu budovy a nenosné priečky na mieste stavby za menej ako 24 hodín, vytvoriť nové formy a tvary bez navýšenia nákladov, zredukovať množstvo odpadu, hluku, prachu, emisií a prispôsobiť sa potrebám a vkusu klienta [4.2]. Tento jednoduchý dom je vybavený kúpeľňou, obývacou izbou a spálňou. Náklady na stavbu domu dosiahli predpokladanú výšku 50 000 eur. Proces tlače trval dokopy 15 hodín, rozdelených do siedmych dní.

Spoločnosť by sa v budúcnosti chcela zamerať na pomoc osobám, ktoré sa nachádzajú v ťažkých životných situáciach. V priebehu piatich hodín by bolo možné vytlačiť jednoduchý prístrešok pre ľudí, ktorí boli postihnutí prírodnou katastrofou či vojnovým konfliktom [4.3].

Technológia

Tlačiareň s názvom BEM PRO sa radí k portálovým robotom a bola navrhnutá ako mobilný modulový systém. Jednotlivé nosné časti tlačiarne tvoria hliníkové priehradové nosníky. Horizontálne a rovnako tak vertikálne časti môžu byť upravené v závislosti na tlačenom objekte. Keďže sú vertikálne nosníky portálovej tlačiarne osadené na kolesách, môže sa tlačiareň pohybovať po jednej osi (os y) na betónovej základovej doske staveniska. Hlava tlačiarne sa pohybuje po horizontálnom hliníkovom nosníku (os x), ktorý sa celý pohybuje hore a dole (os z) [4.4]. Vo svojej základnej konfigurácii je portál 5m vysoký a 7m široký, avšak šírka môže byť navýšená až na 11,5m [4.5]. Iba traja pracovníci dokážu vďaka tomuto dizajnu postaviť tlačiareň bez pomoci žeriavu za menej ako štyri hodiny.

- Priestor tlače: Konfigurovateľný
- Priemerná plocha tlače: 170m^2
- Výška vytlačenej vrstvy: 10-50mm
- Priemerná rýchlosť tlače: 50mm/s
- Objem zloženej tlačiarne: 3,5m^3
- Váha: 800kg
- Celkový elektrický príkon: 6kW
- Napätie: 380V (trojfázové)
- Frekvencia: 50Hz
- Obsluha: 3 osoby [4.4]

obr. 24 Portálová tlačiareň BEM PRO

obr. 25 Tlačiareň BEM PRO pripravená na betónovej základovej doske

obr. 26 Proces 3D tlače portálovou tlačiarňou BEM PRO

Materiál

Pri vývoji použitej betónovej zmesi (mikro betón) poskytla spoločnosť Cemex spoločnosti Bemore3D potrebné prísady, sivý a biely cement [4.6]. Predovšetkým boli sledované vlastnosti materiálu ako sú optimálna trvanlivosť, vysoká počiatočná odolnosť, tekutosť materiálu, konzistencia materiálu a ich vzájomný pomer. V prípade 3D betónovej tlače je dôležitou vlastnosťou priľnavosť jednotlivých vrstiev betónu. Počas bližšieho skúmania skúšobných vzoriek betónu bolo zistené, že sa medzi vrstvami nenachádza žiaden spoj, bola vytvorená súvislá masa betónu. Reologické vlastnosti betónu sú v súčasnosti predmetom štúdia. Odolnosť vyvíjaného betónu bola preukázaná skúškami odolnosti na vzorkách starých 24 hodín, 3 dni, 7 dní a 28 dní. Štandardná vzorka o rozmere 10x10x10cm dosiahla pevnosť 29,86Mpa; 48,22MPa; 56,48MPa; 61MPa. 3D vytlačená vzorka z rovnakého materiálu dosiala pevnosť 22,4MPa; 41,76MPa; 44,5MPa; 46,8MPa. V rámci materiálového testovania bol vytlačený priehradový nosník s epoxy výstužou zabudovanou počas tlače, ktorý bol namáhaný v trojbodovom ohybe. Podrobnejšie technické údaje o materiáli neboli zistené, vzhľadom na to, že informácie spadajú pod výrobné tajomstvo [4.2].

obr. 27 Medzi jednotlivými vrstvami bola vytvorená súvislá masa betónu

obr. 28 Betónová zmes ukladaná v jednotlivých vrstvách

obr. 29 Hrubá stavba 3D vytlačenej konštrukcie domu

obr. 30 Fotografia 3D vytlačeného domu z betónu od organizácie Kamp C

05 Kamp C 3D House

Rok	2020
Poloha	Westerlo, Belgicko
Spoločnosť	Kamp C, COBOD
Plocha	90 m^2

Tento neobyčajný dom sa nachádza na severe Belgicka v meste Westerlo v oblasti s názvom Kamp C. Na tomto mieste môžu stavebné spoločnosti experimentovať s 3D tlačou spolu s výskumnými a vzdelávacími inštitúciami. Dom je prvou dvojpodlažnou 3D stavbou v Európe, ktorá bola vytlačená priamo na stavenisku v jednom celku. Tento prototyp bol navrhnutý tak, aby čo v najväčšej miere reprezentoval metódy a možnosti technológie 3D tlače z betónu. Dom bude fungovať ako nízkoenergetická stavba, ktorá zahŕňa podlahové a stropné vykurovanie, špeciálne fasádne solárne panely a tepelné čerpadlo. Napriek neobvyklej obálke budovy boli v rámci projektu vyriešené nežiadúce tepelné mosty.

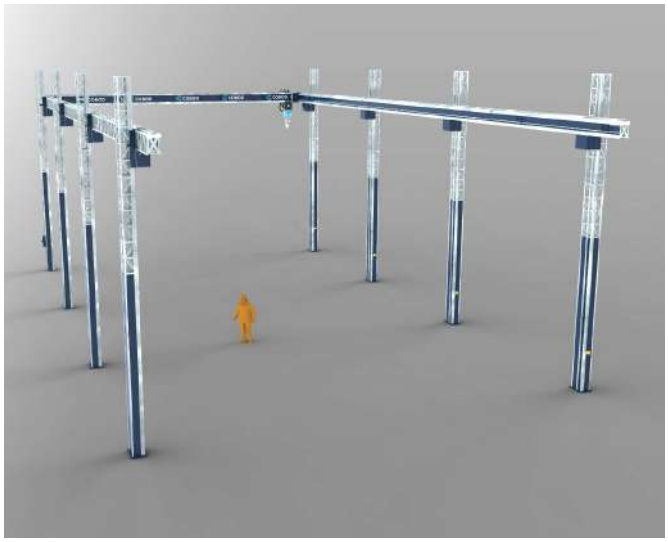
Dom bol vytlačený v rámci európskeho projektu C3PO (Co-creation 3D printing with companies) s finančnou podporou Európskeho fondu pre regionálny rozvoj a provincie Antwerp. Projekt C3PO ma za úlohu zrýchliť nástup inovatívnej technológie vo Flámskom regióne. Osem inštitúcii (Ghent University, Thomas More University, Van Roey, Beneens, Trias architekti, ETIB nv/ CONCRETE HOUSE a ViCre) spojilo sily pod vedením organizácie Kamp C (the provincial Center for Sustainability and Innovation in construction) s cieľom výmeny potrebných informácií a spolupráce. Dom je príkladom úspešnej realizácie, ktorá pomôže motivovať stavebný priemysel čoraz viac používať technológiu 3D tlače z betónu v praxi [5.1].

Technológia

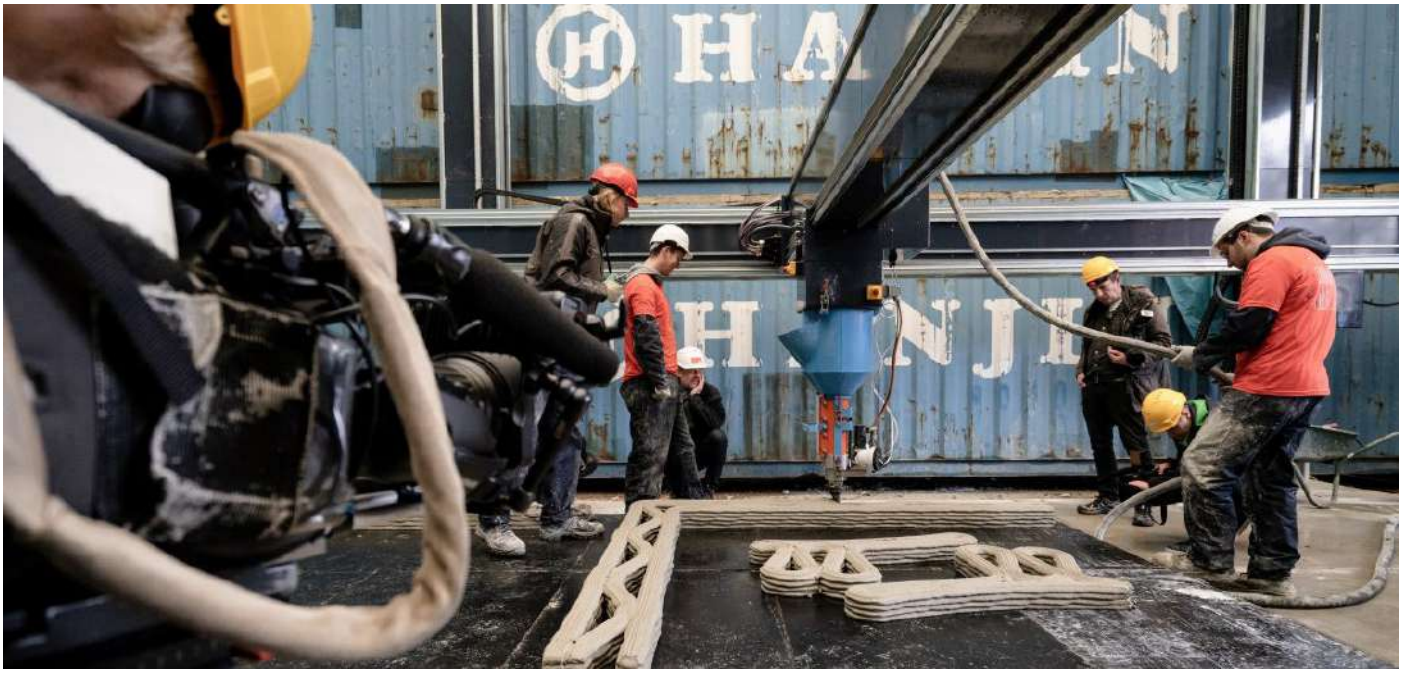
Dom bol vytlačený pomocou tlačiarne s označením BOD2. Jedná sa o modulovú portálovú tlačiareň tvorenú priehradovými nosníkmi, ktorej jeden modul meria 2,5m. Tlačiareň sa vďaka tomuto konštrukčnému riešeniu môže prispôsobiť rôznym veľkostiam projektu. Jednotlivé stĺpy portálovej tlačiarne môžu byť prichytené do betónového podkladu stavby alebo do prefabrikovaných železobetónových pätiek. Tlačiareň okrem kovových trysiek používa aj trysky vytlačené z PET-G plastu. Vďaka tangenciálnemu pohybu trysky a bočným klapkám má vytlačená stena hladší povrch. Nad tryskou tlačiarne sa nachádza násypka s kapacitou 20-30kg materiálu, ktorá umožňuje presnú kontrolu vytláčania materiálu a zároveň umožňuje jednoduchšie prerušovať proces tlače. Hlava (tryska) tlačiarne je pomocou hadice napojená na zásobovací systém materiálu. Tlačiareň je navrhnutá tak, aby bolo možné použiť rôzne materiály z lokálnych zdrojov.

- Priestor tlače (VxŠxD): 8,1x14,6x(rôzne)m
- Výška vytlačenej vrstvy: 5-30mm
- Šírka vytlačenej vrstvy: 30-300mm
- Maximálna rýchlosť tlače: 1000mm/s
- Napájanie: 32A, 400V (trojfázové)
- Obsluha: 2 osoby [5.2]

obr. 31 Základná konfigurácia tlačiarne BOD2



obr. 32 Modulové riešenie tlačiarne BOD2



obr. 33 Tlačiareň BOD2 pripravená na 3D tlač domu

Materiál

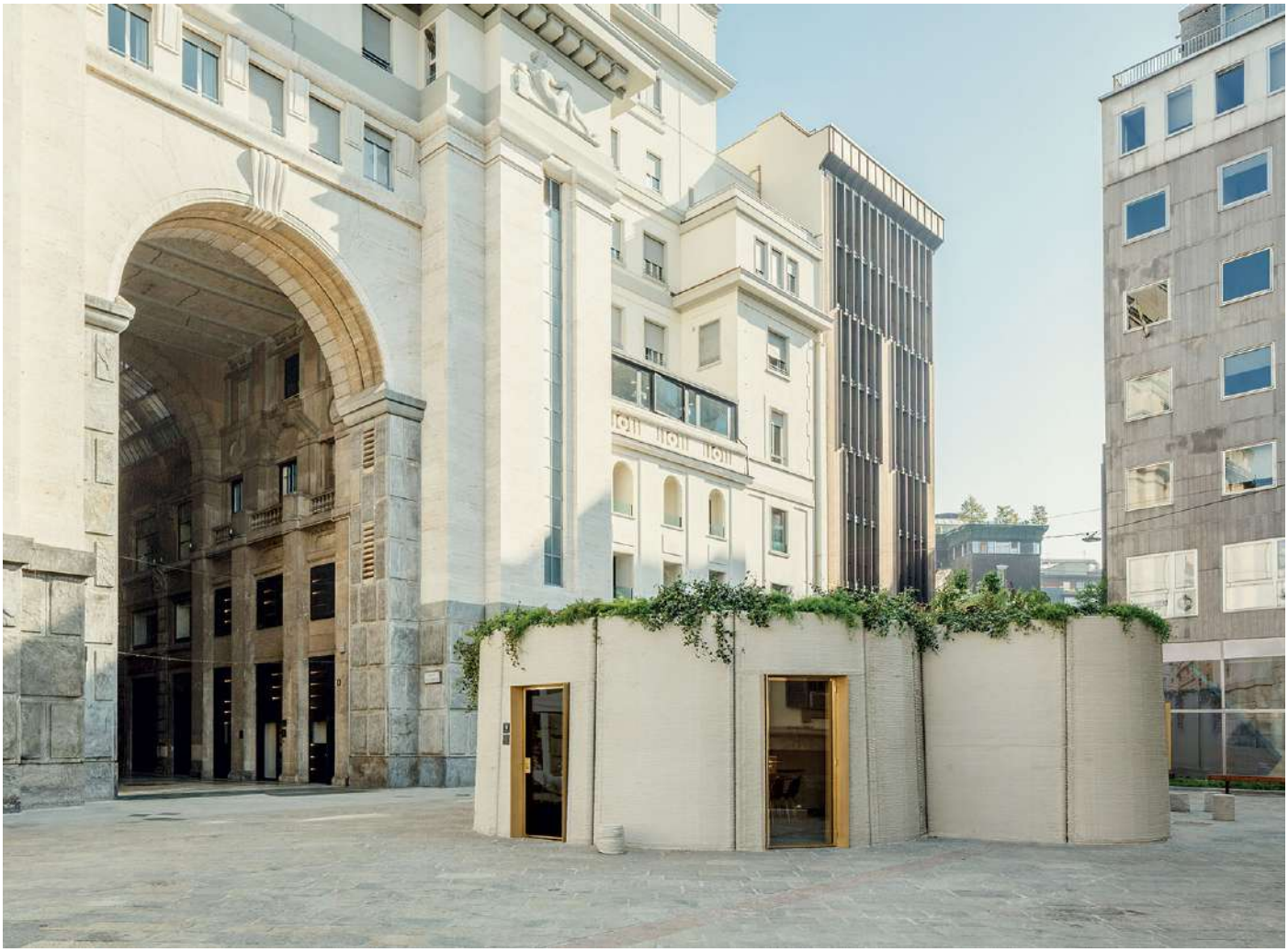
Na vytlačenie domu bol použitý materiál od spoločnosti Saint-Gobain Weber Beamix [5.3]. Samotná betónová zmes obsahuje špeciálne vlákna, ktoré znižujú riziko tvorby trhlín počas vysychania betónu. V konštrukcii domu bola použitá konštrukčná výstuž iba na niektorých kľúčových miestach, ako napríklad nad stavebnými otvormi. Tepelná obálka budovy je navrhnutá tak, aby nedochádzalo k tvorbe tepelných mostov. Obvodové steny domu sú tvorené dvoma typmi stien. Prvý typ predstavuje dutú stenu, do ktorej bola nafúkaná tepelná izolácia. V druhom type steny je tepelná izolácia aplikovaná štandardne z exteriéru [5.4].

Stavbe domu predchádzal výskum, ktorý porovnával štrukturálne vlastnosti 3D vytlačených a tradične zhotovených konštrukčných prvkov. 3D vytlačená dutá stena s fúkanou tepelnou izoláciou a stena s tepelnou izoláciou z exteriéru bola testovaná na pevnosť v tlaku. Ďalej prebehla skúška pevnosti v 3-bodovom ohybe, pri ktorej boli testované dva typy výstuže (tyčová výstuž a výstužná sieť) v 3D vytlačenom okennom preklade. Navrhované 3D vytlačené prvky mali vo výsledku lepšiu únosnosť. Pri tomto výskume bol použitý materiál Weber 145-1 vyvinutý spoločnosťou Saint-Gobain Weber Beamix [5.5].

obr. 34 Textúra vrstiev steny priznaná v interiéri stavby

obr. 35 Čisté napojenie jednotlivých materiálov v interiéri

obr. 36 3D tlač betónovej steny



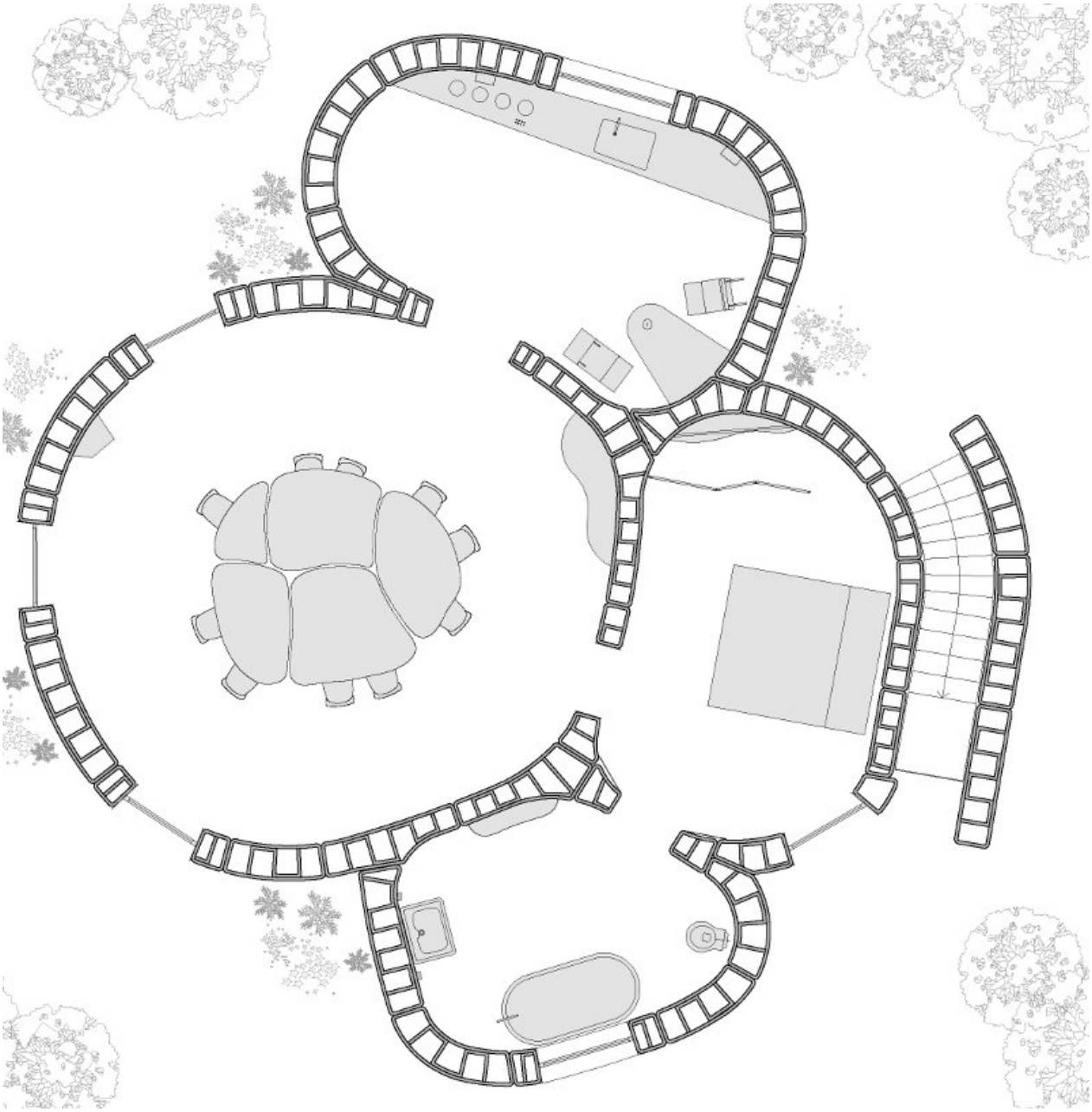
obr. 37 Fotografia 3D vytlačeného domu z betónu v centre Milána

06 3D Housing 05

Rok	2018
Poloha	Miláno, Taliansko
Spoločnosť	CLS Architetti, Arup, CyBe
Plocha	100 m^2

Projekt s názvom 3D Housing 05 predstavuje prvý 3D vytlačený dom z betónu v Európe [6.1]. Architekt Massimiliano Locatelli, ktorý je členom talianského architektonického ateliéru CLS Architetti v spolupráci so spoločnosťami Italcementi Heidelberg Cement Group, Arup a CyBe spoločne prezentovali túto unikátnu 3D stavbu počas Milano Design Week 2018 v centre mesta na námestí Piazza Cesare Beccaria [6.2]. Dom bol vytlačený dokopy za 48 hodín a bol vytvorený z 35 samostatných modulov, pričom každý modul vážil v priemere 1400kg. Na vytlačenie jednotlivých modulov bolo potrebných v priemere približne 60-90 minút. Dom bol navrhnutý tak, aby mohol byť rozobratý a premiestnený na iné miesto [6.1].

V designovom na mieru navrhnutom interiéri domu môžeme nájsť vedľa seba silné a nadčasové materiály, akým sú betón, ktorý predstavuje základný konštrukčný materiál stavby, mosadz, sklo, mramor, hliník, zlato, železo a iné. V dome sa nachádza obývacia miestnosť s priestranným jedálenským stolom, kuchyňa, spálňa, kúpeľňa a strešná terasa, ktorá predstavuje akúsi mestskú záhradu. Revolučná technológia 3D tlače z betónu umožnila navrhnúť dom v novom architektonickom jazyku. Kľúčovými hodnotami projektu bola kreativita, udržateľnosť, flexibilita, dostupnosť a rýchlosť [6.2].



obr. 38 Pôdorys 3D vytlačenej budovy

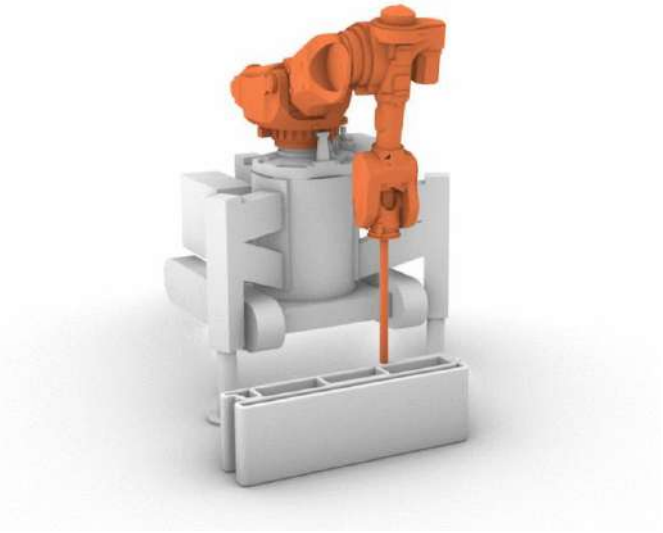
obr. 39 Interiér obývacej miestnosti s jedálenským stolom

obr. 40 Interiér spálne

Technológia

Na stavbu domu bol použitý robot s označením CyBe RC 3Dp. Tento model predstavuje mobilnú, 7-osovú verziu 3D betónovej tlačiarne od firmy CyBe. Robot pozostáva z robotického ramena ABB, ktoré je upevnené na pohyblivom pásovom podvozku. Toto technické riešenie umožňuje robotovi pohyb a manipuláciu aj v náročnom teréne. Hydraulické podpery, ktoré sa vysúvajú z podvozku, zabezpečujú stabilitu robota počas tlače a zvyšujú dosah ramena. Tryska tlačiarne umiestnená na konci robotického ramena vytláča materiál na naprogramované miesto. Materiál je k tryske štandardne privádzaný hadicou, ktorá je napojená na pumpu a mixovacie zariadenie [6.3]. Robot je ovládaný kontrolnou jednotkou so softvérom CyBe (CHYSEL, ARTYSAN) [6.4].

- Priestor tlače (VxŠxD): 4x5x2,5m
- Maximálna výška tlače: 2,65m-3,5m (v závislosti na manipulátore)
- Výška vytlačenej vrstvy: 10-50mm
- Šírka vytlačenej vrstvy: 40mm (štandard)
- Rýchlosť tlače: 50-600mm/s
- Rýchlosť pohybu podvozku: 3km/h
- Váha: 4,5t
- Napájanie: 200-600V, 50-60Hz
- Obsluha: 2 osoby
- Presnosť tlače: 1mm [6.3]



obr. 41 Schéma robotického ramena ABB na pásovom podvozku

obr. 42 Robot CyBe RC 3Dp počas procesu tlače

obr. 43 Robot CyBe RC 3Dp počas tlače budovy s názvom „La Sphère“ v Normandii

Materiál

Oddelenie inovácie produktov spoločnosti HeidelbergCement (HeidelbergCement's Global Product Innovation department) úzko spolupracovalo so spoločnosťou CyBe, aby zabezpečilo optimálne zloženie betónu vzhľadom na použitú technológiu [6.5].

Na vytlačenie domu bol použitý materiál s názvom CyBe MORTAR od spoločnosti CyBe. Zmes je nekovová a obsahuje veľmi nízke hodnoty chloridov a síranov. Tento špeciálne vyvinutý materiál tuhne behom 3 minút a štruktúrnu pevnosť dosiahne za 1 hodinu. Materiál umožňuje tlač do maximálnej rýchlosti 600m/s a do výšky vrstvy 50mm, pričom štandardný rozmer vrstvy je (VxŠ) 20x40mm. Vrstvy je na seba možné ukladať už v 10 sekundových intervaloch. Materiál je možné použiť pri teplotách v rozmedzí od +5 do +30°C. Hustota stvrdnutého materiálu sa pohybuje približne v hodnote 2100-2200kg/m³. 5,3% z objemu materiálu tvoria vzduchové dutiny. Hĺbka prieniku vody do štruktúry materiálu predstavuje 23mm a pH predstavuje hodnotu 12. V porovnaní s portlandským cementom je pri výrobe materiálu CyBe MORTAR vyprodukovaných o 60% menej CO_2, čo umožňuje znížiť uhlíkovú stopu [6.6].

Compressive strength (f_{ck})	after 5h after 1d after 7d after 28d	approx. 20 N/mm² approx. 25 N/mm² approx. 30 N/mm² approx. 40 N/mm²	*DIN/BS EN 12390-13* *DIN/BS EN 1015-11* *DIN/BS EN 12504-1*
Tensile/Bond strength (f_{ctm}) *Parallel to layer : //* *Perpendicular to layer : ⊥*	after 1d after 28d	$f_{ctk,//}$ = approx. 2,4 N/mm² $f_{ctk,\perp}$ = approx. 2,4 N/mm² $f_{ctk,//}$ = approx. 4 N/mm² $f_{ctk,\perp}$ = approx. 4 N/mm²	*DIN/NEN EN 1542* *CUR Aanbeveling 20*
Flexural strength ($f_{ctm,fl}$)* **: Identical in different orientations perpendicular and parallel to layer*	after 5h after 1d after 7d after 28d	approx. 4 N/mm² approx. 4 N/mm² approx. 5 N/mm² approx. 6 N/mm²	*DIN/BS EN 1015-11* *DIN/BS EN 13892-2*
Static stabilized secant E-modulus (E_{cm})	approx. 26.000 – 28.000 N/mm²		*DIN EN 12390-13; Method B* *DIN EN 13412*

obr. 44 Technické údaje o materiáli CyBe MORTAR

obr. 45 Textúra stien typická pre technológiu 3D tlače z betónu

obr. 46 Materiál CyBe MORTAR

obr. 47 3D vytlačený dom z betónu od spoločnosti Apis Cor

07 Apis Cor 3D House

Rok	2017
Poloha	Stupino, Rusko
Spoločnosť	Apis Cor
Plocha	38 m^2

Tento neobyčajný dom postavený technológiou 3D tlače z betónu sa nachádza v meste Stupino neďaleko Moskvy. Za nápadom realizovať tento nezvyčajný projekt stojí firma Apis Cor z amerického mesta San Francisco a ruský realitný developer PIK [7.1]. Jedným z hlavných cieľov zakladateľa spoločnosti Apis Cor (Nikita Cheniuntai) bolo vytlačiť dom priamo na mieste robotom, ktorý by mal čo najmenšie priestorové a montážne nároky [7.2].

Dom bol postavený v areáli miestnej továrne počas zimných mesiacov. Vzhľadom na chladné počasie bolo miesto stavby počas celého procesu tlače dočasne kryté stanom, v ktorom bola udržovaná vhodná teplota. Napriek tomu, že je robot schopný plnej prevádzky až do teploty -35°C, musela byť teplota kvôli udržaniu správnych vlastností betónovej zmesi počas procesu tlače vyššia ako +5°C. Napriek skromnej pôdorysnej rozlohe domu (38m^2) sa tu nachádza hala, kúpelňa, obývacia miestnosť a malá kuchyňa. Podľa spoločnosti Apis Cor sa stavebné náklady vyšplhali na sumu 275$/$m^2$. V tejto sume sú zahrnuté náklady na postavenie domu vrátane základov, strechy, vonkajších a vnútorných povrchových úprav a izolácii [7.1].

Spoločnosť Apis Cor taktiež postavila aj najväčšiu 3D vytlačenú budovu na svete (640m^2), ktorú môžeme nájsť v Dubaji [7.3].

Technológia

Tlačiareň tvorí rotujúce manipulačné rameno pripomínajúce vežový žeriav. Rameno je schopné predĺženia v horizontálnom smere. Vertikálnu „nohu“ robota tvoria jednotlivé valce. Každý valec je pripojený k samostatnému hydraulickému čerpadlu so servopohonom. Robot sa horizontálne automaticky stabilizuje pomocou inklinometra a PID regulátora. Dve aktívne protizávažia fungujú ako stabilizačný systém, vďaka ktorému nie je nutné robota kotviť alebo inak upravovať podkladový povrch [7.4]. Softvér robota upravuje rýchlosť tlače v závislosti na naprogramovanej trase [7.5]. Výhodou robota je jeho menšia veľkosť a váha v porovnaní s napríklad portálovou tlačiarňou. Tlačiareň je možné premiestňovať pomocou mobilného žeriavu [7.4].

- Priestor tlače: 132m^2
- Maximálna výška tlače: 3,1m [7.6]
- Výška vytlačenej vrstvy: 25mm
- Šírka vytlačenej vrstvy: 25mm
- Rýchlosť tlače: 160mm/s [7.5]
- Rozmery tlačiarne: 4×1,6×1,5m
- Hmotnosť: 2t
- Spotreba energie: 8kWh
- Obsluha: 2 osoby [7.4]
- Produktivita: 100m^2/24h
- Odhadovaná presnosť polohy: 0,5mm [7.6]

obr. 48 Robotické rameno je schopné predĺženia v horizontálnom a vertikálnom smere

obr. 49 Tryska robotického ramena

obr. 50 Proces 3D tlače domu pomocou robotického ramena v krytom stane

Materiál

Na tlač domu bola použitá bežná pieskovo-cementová zmes so špeciálnymi prísadami, vďaka ktorým betón tuhne rýchlejšie a ktoré zvyšujú jeho viskozitu [7.2].

Spoločnosť Apis Cor taktiež vyvinula zmes na báze cementu, ktorá obsahuje menšie množstvo cementu v porovnaní s bežnou cementovou zmesou a zmes na báze sadry, ktorá obsahuje 3x menej cementu. Pri stavbe sa tak zníži potreba cementu a tým pádom aj miera znečistenia. Ďalším materiálom, na ktorom spoločnosť pracuje, je geopolymérny materiál, ktorý nepoužíva cement ako pojivo. V snahe urýchliť vývoj v tomto obore ponúka spoločnosť svoj materiál pre výskumné účely (Apis Cor's 3D Ink) [7.7].

Na tepelnú izoláciu domu boli použité materiály s nízkou tepelnou vodivosťou. Určité obvodové steny sú tvorené troma stenami, medzi ktorými sa nachádzajú dve uzatvorené vzduchové dutiny priebežné vo vertikálnom smere. Dutiny sú naplnené fúkanou tepelnou izoláciou, po tom ako je celá stena vytlačená. Tieto steny sú prepojené a vystužené tyčami zo sklených vlákien, ktoré sú umiestňované horizontálne do jednotlivých betónových vrstiev [7.8].

obr. 51 Štruktúra 3D vytlačenej betónovej steny tvorená štyrmi vrstvami betónu

obr. 52 Tyčová výstuž zo sklených vlákien

obr. 53 3D vytlačené betónové steny domu

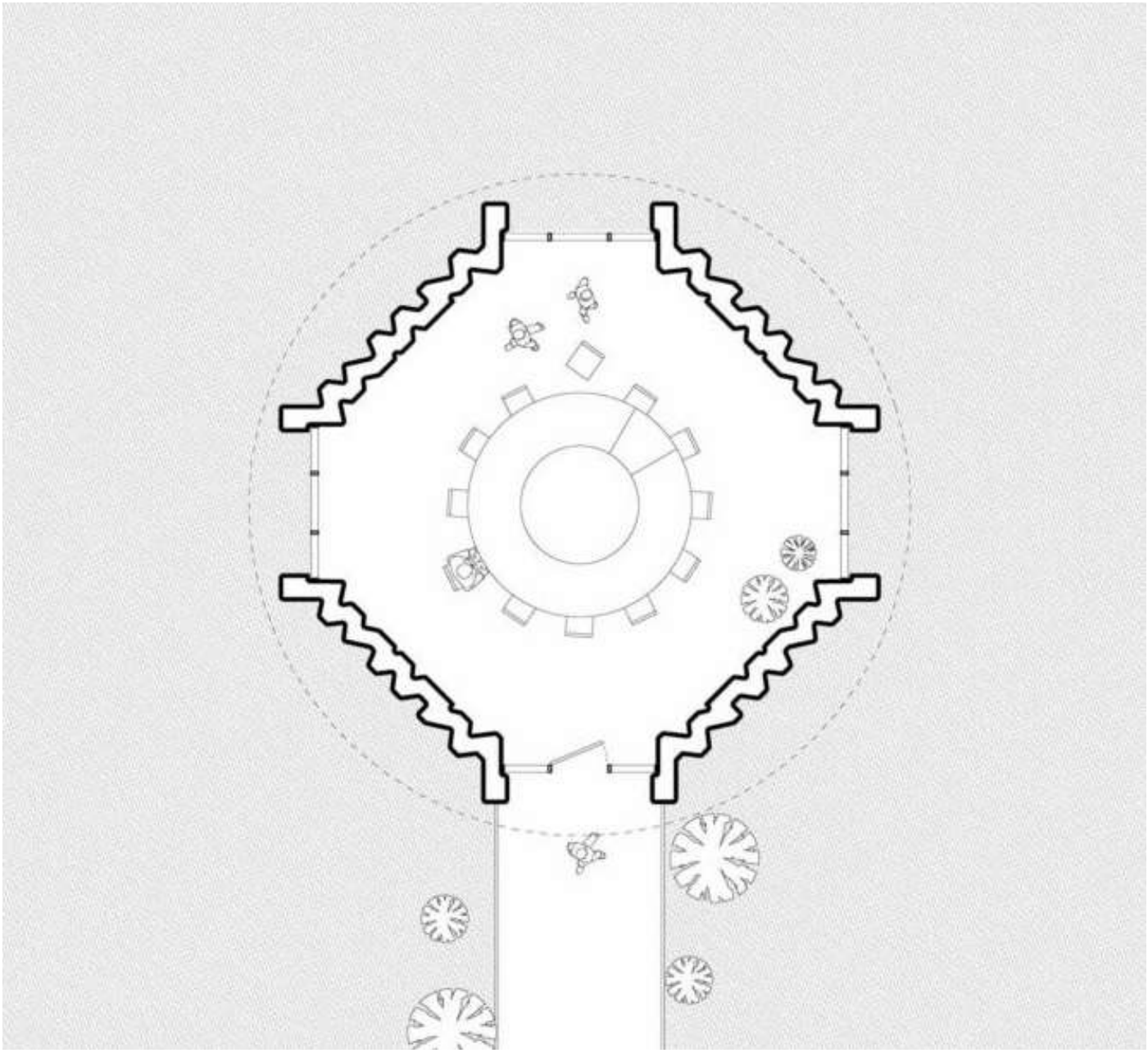
obr. 54 3D vytlačený Le Pavillon

08 Le Pavillon

Rok	2019
Poloha	Bruay-sur-l'Escaut, Francúzsko
Spoločnosť	Sylvain Pierre Jean, Constructions-3D
Plocha	72 m^2

Francúzsku spoločnosť Constructions-3D so sídlom v meste Valenciennes založili v roku 2017 štyria partneri Antoine Motte, Axel Théry, Didier Malbranque a Antoine Urquizar s počiatočnou finančnou podporou od spoločnosti 3D Machines, ktorá sa zaoberá vývojom technologických riešení v oblasti 3D zariadení. Spoločnosť Constructions-3D sa špecializuje na vytváranie automatizovaných zariadení pre 3D tlač konštrukcií v stavebnom priemysle [8.1].

3D stavba Le Pavillon, ktorú navrhol architekt Sylvain Pierre Jean predstavuje konferenčnú miestnosť s VR systémom. Tento pavilón je umiestnený v strede pozemku budúceho hlavného centra spoločnosti Constructions-3D a 3D Machines. Ambiciózny plán na novú centrálu predstavuje 2800m^2 budov, ktoré budú postavené pomocou technológie 3D tlače. Stavebný pozemok o rozlohe 11200m^2 sa nachádza v Bruay-sur-l'Escaut blízko mesta Valenciennes na severe Francúzska. Na tomto priestore, ktorý bude obsahovať rôzne nosné a nenosné 3D štruktúry, bude možné ďalej vyvíjať najmodernejšie stavebné techniky 3D tlače. Projekt bude pre spoločnosť predstavovať akési laboratórium, v ktorom bude môcť testovať nové materiály či definovať štrukturálne a ekologické štandardy. Vďaka cenným dátam z projektu bude môcť firma efektívnym spôsobom zlepšovať svoje produkty a ďalej posúvať vývoj tejto inovatívnej technológie [8.2].



obr. 55 Pôdorys budovy Le Pavillon

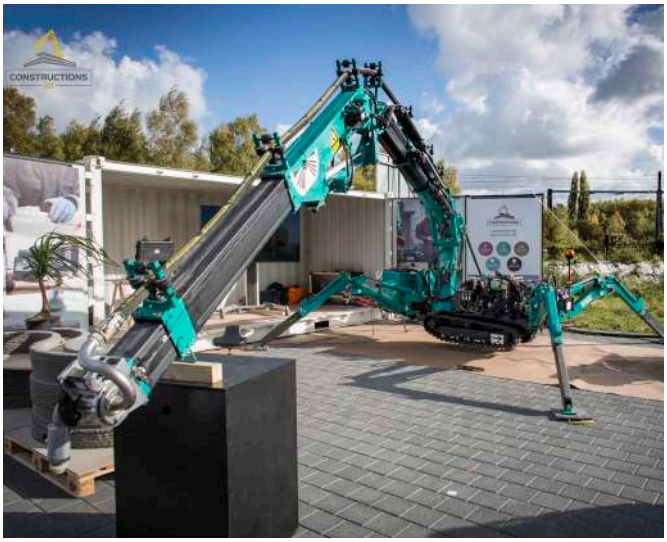
obr. 56 Vizualizácia centrály spoločnosti Constructions-3D a 3D Machines

Technológia

Pri vývoji tohto nezvyčajného robota sa firma sústredila na tri hlavné princípy: robustnosť, pragmatizmus a jednoduché použitie. Celý systém 3D tlače (MAXI PRINTER pack) obsahuje robota, riadiacu jednotku, pumpu s miešacím zariadením a silom. Kompletná technológia je uskladnená a prenášaná v štandardnom lodnom kontajneri [8.3]. Samotný robot pozostáva z výrazného teleskopické ramena, ktoré sa dokáže otáčať o 360° a dosiahne do vzdialenosti 9,5m. Rameno je upevnené na pohyblivom pásovom podvozku, ktorý je poháňaný hydraulickým motorom. Robot sa dokáže pohybovať rýchlosťou 2km/h pri maximálnom sklone 15°. Počas procesu tlače sú z podvozku vysunuté tri hydraulické podpery, ktoré zabezpečujú stabilitu robota.

- Stupne voľnosti: 4
- Priestor tlače: 265m^2
- Maximálna výška tlače: 10m
- Priemer trysky: od 15 do 50mm
- Rýchlosť tlače: 20-300mm/s
- Rozmery zloženej tlač. (VxŠxD): 2×0,85×3m
- Hmotnosť: 2,5t
- Napätie: 400V (trojfázové)
- Elektrický príkon: 7kW
- Obsluha: 2 osoby
- Odhadovaná presnosť: 5-10mm [8.4]

obr. 57 Celý systém 3D tlače



obr. 58 Výrazné teleskopické rameno robota

obr. 59 Proces 3D tlače budovy Le Pavillon

Materiál

Robot spoločnosti Constructions-3D je schopný tlačiť objekty z rôznych materiálov s kompatibilnými reologickými vlastnosťami [8.1]. Na vytlačenie pavilónu bola použitá špeciálna malta na báze cementu. Únosnosť tohto materiálu v tlaku predstavuje 75MPa. Výsledkom skúšky sadnutia kužeľa (Abrams) je pokles o 2,5cm. Veľkosť častíc materiálu nepresahuje 2mm a materiál je možné použiť pri teplotách v rozmedzí od +5 do +35°C [8.4].

Samotná budova pozostáva zo štyroch stien, ktoré sú navzájom oddelené oknami a vstupom. Konštrukcia steny je štandardne tvorená dvomi 3D vytlačenými stenami z betónu, medzi ktorými sa nachádza vertikálna dutina. Do samostatne uzavretej dutiny na koncoch každej zo štyroch stien bola umiestená klasická stavebná výstuž zaliata betónom. Týmto spôsobom bolo vytvorených osem nosných železobetónových stĺpov. Do najväčších centrálnych dutín stien bolo zavedené elektrické vedenie a dutiny boli následne vyplnené tepelnou izoláciou tvorenou z ľanu. V prípade tepelnej izolácie bolo cieľom použiť miestny recyklovateľný prírodný materiál. Stavba bola nakoniec zastrešená jednoduchou strechou tvorenou ľahkými drevenými nosníkmi [8.5].

obr. 60 Miestna recyklovateľná prírodná tepelná izolácia z ľanu

obr. 61 Štandardná stavebná výstuž v dutine steny

obr. 62 Hotové 3D vytlačené časti pavilónu

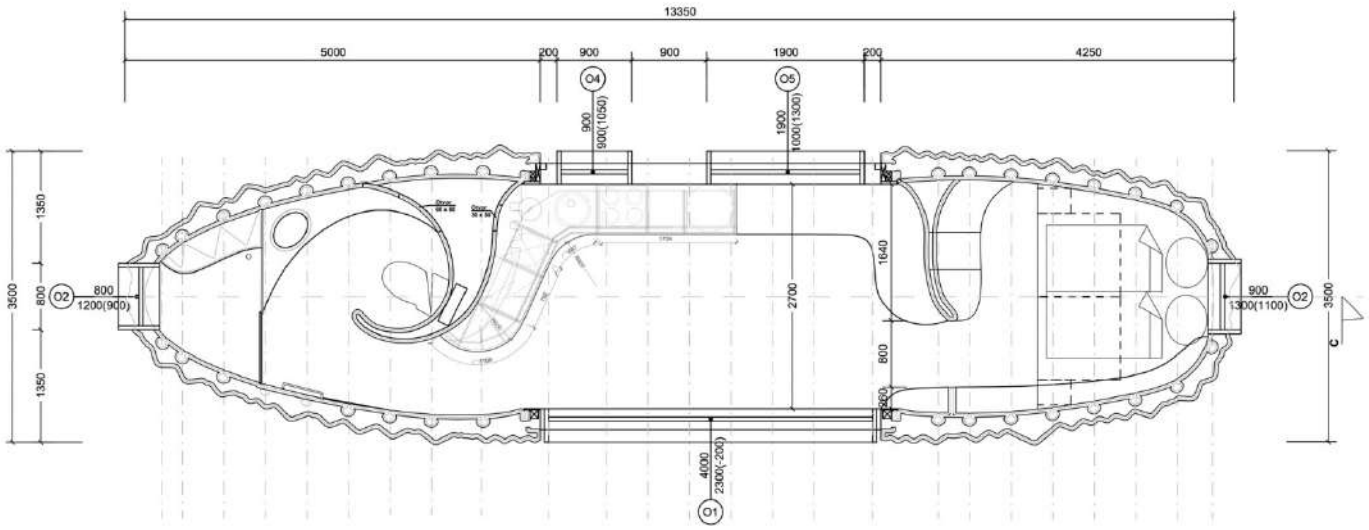
obr. 63 Prvý 3D vytlačený dom z betónu v Českej republike

09 Prvok

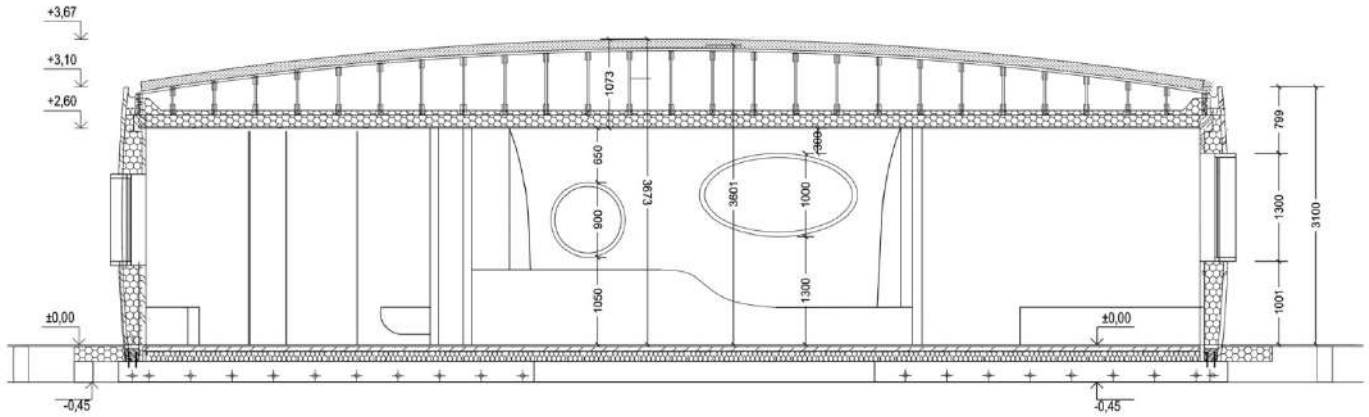
Rok	2020
Poloha	Praha, Česká republika
Spoločnosť	Scoolpt
Plocha	43 m^2

Prvok je prvým domom v Českej republike, ktorý vznikol technológiou 3D tlače z betónu. Prvok navrhol architektonicko sochársky ateliér Scoolpt pod vedením sochára Michala Trpáka s významnou finančnou podporou od Stavební spořitelny Buřinka. Dom bol vytlačený v hale výmenníku v Českých Budějovicích, z ktorej bol prevezený do Prahy na Střelecký ostrov, kde bol v auguste 2020 slávnostne odhalený verejnosti [9.1].

Okrem toho, že je Prvok výsledkom 3D tlače z betónu, predstavuje aj akúsi obytnú sochu plnú organických foriem, 3D tlačených predmetov a moderných technológii. Od zvlnených stien až po okrúhle otvory, ťaží Prvok z výhody 3D tlače, ktorá umožňuje vytvárať neštandardné tvary. Každý detail v interiéri predstavuje originálne výtvarné dielo. Dom je rozdelený na tri časti. V drevenej vstupnej časti stavby so zelenými exteriérovými stenami sa nachádza centrálna obytná miestnosť s kuchyňou. Pravá a ľavá časť stavby od vstupu je tvorená 3D vytlačenými stenami, kde nájdeme spálňu a kúpeľňu. Celá konštrukcia je zastrešená drevenou vegetačnou strechou [9.2]. Keďže české stavebné predpisy nepoznajú 3D vytlačené stavby, autori umiestnili Prvoka na plávajúci pontón. Stavba tak podlieha schvaľovacím procesom Státní plavební správy. Ateliér Scoolpt v spolupráci s ČVUT a VUT pracuje na certifikáciách a atestoch konštrukcií potrebných na stavbu a kolaudáciu stavieb vytvorených technológiou 3D tlače z betónu [9.3].



obr. 64 Pôdorys budovy Prvok



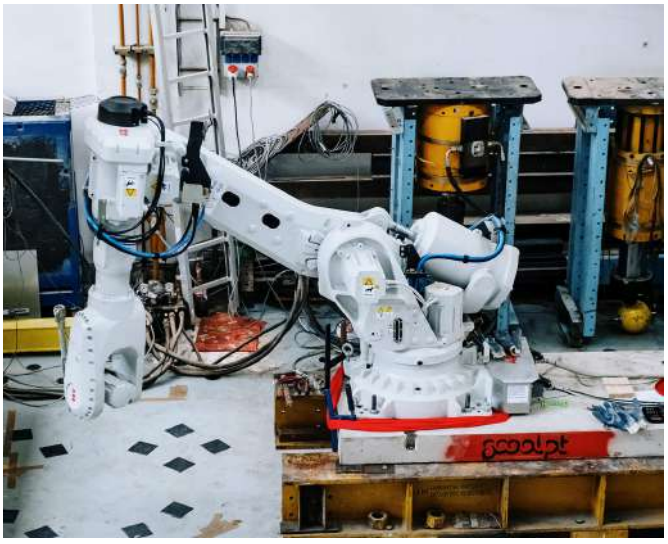
obr. 65 Pozdĺžny rez budovou

obr. 66 Interiér Prvoka

Technológia

Na 3D tlač Prvoka bolo použité robotické rameno od Švédskej spoločnosti ABB (ABB irb 6700), ktoré sa bežne používa v automobilovom priemysle. Toto veľmi presné šesť-osové robotické rameno autori projektu nazvali Máša. Robota bolo potrebné naprogramovať tak, aby bol schopný vytlačiť navrhnutú štruktúru. Snahou bolo docieliť lineárny pohyb robotického ramena. Prípravou dát, ovládaním robota a kontrolou počas procesu tlače sa zaoberal študent Fakulty architektúry, Jiří Vele [9.4]. Odborné znalosti získala firma Scoolpt vďaka spolupráci so spoločnosťou Hyperion Robotic [9.1]. Hlava robota pozostáva z vodovodnej oceľovej rúrky navarenej na oceľový kruhový diel, ktorý je priskrutkovaný k robotickému ramenu. Dĺžku rúrky a nástavca je možné meniť podľa potreby. Robot bol presúvaný pomocou portálového žeriavu v hale.

- Stupne voľnosti: 6
- Priestor tlače: 265 m²
- Maximálna výška tlače: 3,2-3,8m
- Výška vytlačenej vrstvy: 12mm
- Šírka vytlačenej vrstvy: 45-50mm
- Priemer trysky: 32mm
- Rýchlosť tlače: 90-180mm/s
- Hmotnosť: 2,5t
- Obsluha: 2 osoby [9.5]



obr. 67 Robotické rameno od spoločnosti ABB

obr. 68 Proces 3D tlače steny Prvoka

obr. 69 3D tlač Prvoka v hale výmenníku v Českých Budějovicích

Materiál

Pri vývoji materiálu spolupracovala firma Scoolpt so spoločnosťou Master Builders Solutions. Na 3D tlač Prvoka bola použitá špeciálna hydraulická prefabrikovaná zmes s názvom MasterFlow 3D 100. Jedná sa o cementovú zmes, ktorá obsahuje polypropylenové mikrovlákna na obmedzenie zmrštenia betónu a zamedzenie vzniku trhlín pri tuhnutí [9.6]. Materiál je objemovo stály a po zmiešaní s vodou tvorí dobre čerpateľnú maltu (závislosť na v/c), ktorá za krátky čas po uložení na miesto dosahuje vysoké hodnoty v pevnosti v tlaku a za ohybu. Materiál má vysokú priľnavosť k oceli, ktorá zvyšuje súdržnosť medzi zmesou a výstužou. Prípustný teplotný interval aplikačnej malty sa pohybuje od min +5°C do max +32°C [9.7].

Vzhľadom na to, že české stavebné normy nepoznajú technológiu 3D tlače z betónu, bolo potrebné vykonať statickú zaťažovaciu skúšku. Tá prebehla v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze. Časť stavby bola počas skúšky zaťažená vlastnou váhou strechy, snehom a nahodilím zaťažením. Jednalo sa o zaťaženie o veľkosti 50kN, ktoré bolo rozložené do 16 bodov v mieste uvažovaných strešných väzníkov. Stavba bola následne zaťažená až na 500kN, pričom nedošlo k jej porušeniu [9.8].

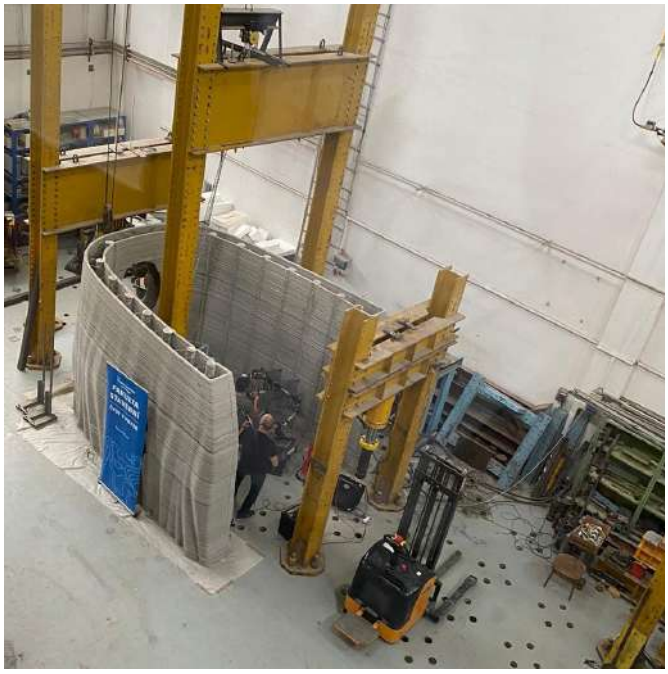
	MasterFlow 3D 100	
Spotřeba záměsové vody	ml/kg	156
Velikost zrna	mm	<0,5
Změna objemu	%/24 hod.	+0,8
Pevnost v tlaku po 8 hod. **	MPa	min. 1
Pevnost v tlaku po 1 dni	MPa	min. 25
Pevnost v tahu za ohybu po 1 dni	MPa	min. 5
Pevnost v tlaku po po 28 dnech	MPa	min. 50
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech	MPa	min. 6,5
Objemová hmotnost ztvrdlé malty (dle ČSN 12390-7)	2000–2200 kg/m^3	

**Hodnota dosažena za laboratorních podmínek (cca +23 °C a 50% rel. vlhkosti).

obr. 70 Technické údaje o materiáli MasterFlow 3D 100

obr. 71 3D vytlačená stena Prvoka

obr. 72 Prvé 3D vytlačené vrstvy steny



obr. 73 Záťažová skúška v priestoroch Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze

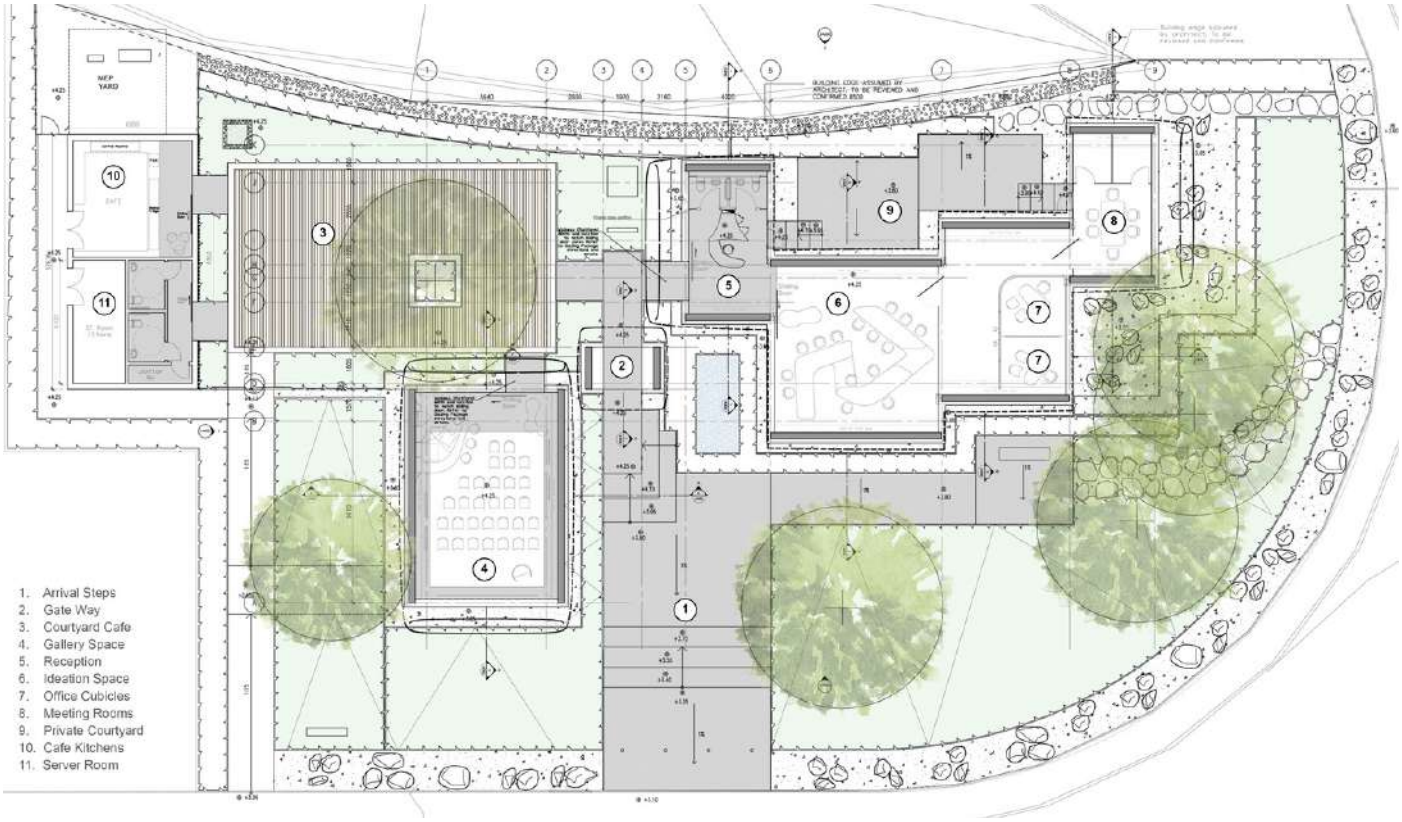
obr. 74 Prvá administratívna budova na svete vytlačená technológiou 3D tlače z betónu

10 Office of the Future

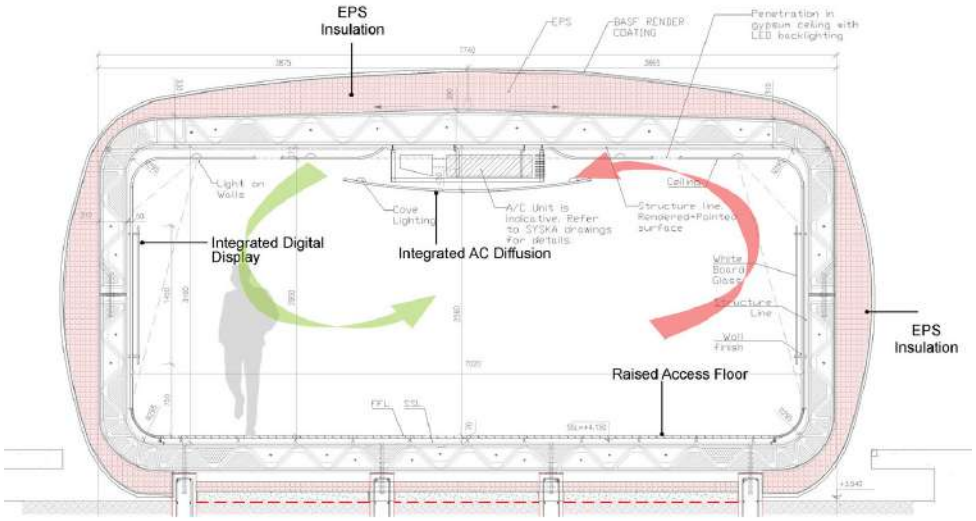
Rok	2016
Poloha	Dubaj, Spojené arabské emiráty
Spoločnosť	WinSun, Killa Design
Plocha	250 m^2

Prvú administratívnu budovu na svete vytlačenú technológiou 3D tlače z betónu môžeme nájsť v Dubaji. Stavba s názvom „Office of the Future“ je dočasným sídlom Dubai Future Foundation [10.1]. Tento ústav vznikol s cieľom inštitucionalizovať budúce formovanie krajiny a vytvoriť z Dubaja popredné mesto budúcnosti [10.2]. Stavba predstavuje súčasť stratégie s názvom „Dubai 3D Printing Strategy“, ktorá má využiť technológiu 3D tlače pre službu ľudstvu a vytvoriť zo Spojených arabských emirátov a Dubaja popredné centrum technológie 3D tlače. Hlavným cieľom je dosiahnuť, aby do roku 2030 bolo 25% budov založených na tejto technológii [10.3].

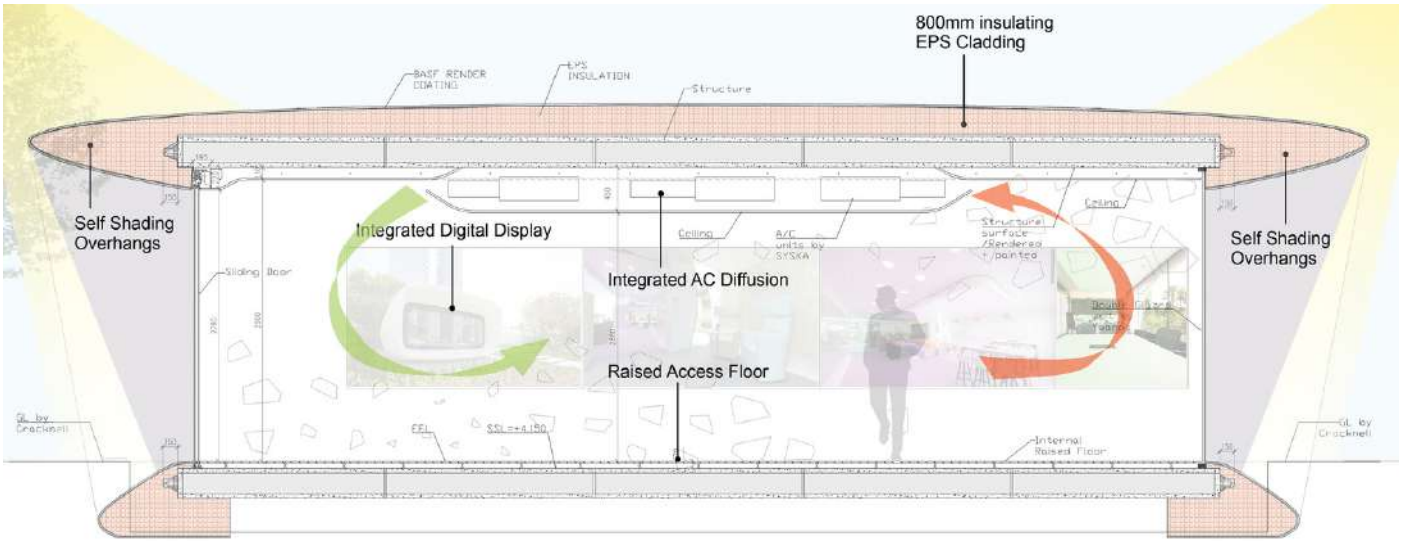
Tento komplex šiestich administratívnych budov, ktorý navrhol architektonický ateliér Killa Design sa rozprestiera okolo stávajúcich stromov a ponúka salón, galériu s terasou, flexibilné priestory pre stretnutia, workshopy, exhibície a rôzne tímové spolupráce [10.4]. Nosná časť konštrukcie stavby pozostáva zo 17 prefabrikovaných betónových modulov širokých 13m a vysokých 3m. Tieto prefabrikované moduly boli 3D vytlačené vo fabrike čínskej spoločnosti WinSun (Yingchuang Suzhou factory) a boli prepravené po mori na miesto stavby do Dubaja [10.5]. Zaujímavým architektonickým detailom je zaoblený tvar fasády, ktorý však nebol vytvorený technológiou 3D tlače z betónu, ale pomocou zakrivenej izolácie z EPS [10.4].



obr. 75 Situácia budovy



obr. 76 Priečny rez budovou



obr. 77 Pozdĺžny rez budovou

Technológia

Nosné časti budovy boli vyrobené v továrni spoločnosti WinSun v Číne a prepravené do Dubaja. Výhodou výroby v uzavretej hale sú konštantné podmienky vnútorného prostredia. Tlačený objekt nie je vystavený vonkajším poveternostným vplyvom, ktoré prinášajú napríklad zmeny teplôt či vlhkosti. Týmto spôsobom tlače je jednoduchšie dosiahnuť rovnakú kvalitu vytlačených konštrukcií. V prípade stavania z prefabrikovaných dielov vznikajú nároky na prepravu a manipuláciu. Uzavreté betónové štruktúry (moduly) v tvare písmena „O“ boli rozdelené na hornú a dolnú časť (kazetu). Celkové rozmery prefabrikátov boli zvolené na základe tlačeného priestoru robota a hlavne na základe prepravných obmedzení. Tieto dodatočné nároky môžu predstavovať zvýšenie finančných nákladov a vyššiu mieru znečistenia životného prostredia. Jednotlivé betónové kazety boli vytlačené portálovým robotom. Hlava robota sa dokáže pohybovať v troch smeroch (os x,y,z). Podrobnejšie technické údaje o tlačiarni chýbajú, vzhľadom na to, že si spoločnosť dáva záležať na ochranu dôverných výrobných informácii.

- Rozmery tlačiarne (VxŠxD): 6×10×40m
- Výška vytlačenej vrstvy: 20mm
- Šírka vytlačenej vrstvy: 50mm [10.6]

obr. 78 Portálový robot spoločnosti WinSun

obr. 79 Tlač štruktúr v uzavretej továrni

obr. 80 Transport prefabrikovaných častí budovy

Materiál

Betónovú zmes vyvinula spoločnosť WinSun. Okrem administratívnej budovy v Dubaji používa spoločnosť túto zmes aj na svoje ďalšie projekty. Jedná sa o betónovú zmes, ktorá pozostáva z cementu, vody, aditív a sklených vlákien. Šesť vzoriek materiálu bolo testovaných v laboratóriu spoločnosti Sandberg v Londýne. Po 28 dňoch dosiahli skúšobné vzorky medze pevnosti v tlaku vo výške 31,6MPa. V prípade medze pevnosti v ťahu po 28 dňoch bola nameraná hodnota 3MPa a modul pružnosti dosiahol hodnotu 19 500 MPa. Vzhľadom na nízku pevnosť betónu v ťahu bola navrhnutá oceľová priehradová výstuž, ktorá sa manuálne vkladala medzi vytlačené vrstvy počas procesu tlače. Po tom ako bolo vyrobených niekoľko kaziet konštrukcie, vykonali odborníci so spoločnosti e.construct kontrolu a zaťažovací test v továrni spoločnosti WinSun (Yingchuang Suzhou factory). Po testovaní bolo zistené slabé štrukturálne správanie sa konštrukcie. Ohybová kapacita konštrukcie bola nižšia v porovnaní s predpoveďou. Na zvýšenie ohybovej únosnosti hornej kazety bola použitá vonkajšia priečna predpätá výstuž. V prípade dolnej kazety bolo navrhnuté rozšírenie základov. Na konci boli k sebe jednotlivé segmenty konštrukcie pripojené pomocou pozdĺžnej predpätej výstuže [10.6].

obr. 81 Skúšobná vzorka materiálu

obr. 82 Spojené moduly tvorené hornou a dolnou kazetou

obr. 83 Záťažová skúška dolnej kazety modulu

obr. 84 Vizualizácia projektu Milestone

11 Project Milestone - vízia

Rok	2017-súčasnosť
Poloha	Eindhoven, Holandsko
Spoločnosť	Houben/Van Mierlo architects, Eindhoven University of Technology
Plocha	Prvý jednopodlažný dom: 95 m^2

Na juhu Holandska v meste Eindhoven sa nachádza nová rezidenčná lokalitu Bosrijk, ktorá ponúkne bohatý priestor, udržateľnosť, a architektonickú rozmanitosť. V časti nazvanej Cluster 16 je naplánovaný jedinečný projekt piatich domov vytvorených technológiou 3D tlače z betónu [11.1]. Tento projekt je prvým komerčným projektom bývania na svete, pri ktorom bude použitá táto inovatívna technológia. Realitná spoločnosť plánuje tieto domy kúpiť a ďalej ich prenajímať záujemcom. Domy budú spĺňať všetky požiadavky na moderný komfort [11.2]. Projekt vznikol v spolupráci medzi Technologickou univerzitou v Eindhovene, ateliérom Houben/Van Mierlo architects, mestským úradom, dodávateľom Van Wijnen, realitnou spoločnosťou Vesteda, výrobcom materiálov Saint Globain-Weber Beamix a spoločnosťou Witteveen+Bos [11.3].

Jednotlivé domy budú tlačené postupne. Prvé z nich budú prefabrikované, avšak jednou z ambícií je docieliť najmenej jeden z nich vytlačiť priamo na mieste stavby. Cenné skúsenosti získané počas tlače prvých objektov tak budú zužitkované pri tlači nasledujúcich domov. Prvým domom, ktorý bude vytlačený, bude jednopodlažný trojizbový dom o rozlohe 95 m^2 s drevenou nosnou konštrukciou strechy. Ďalšie štyri domy, ktoré budú nasledovať sú navrhnuté ako dvojpodlažné objekty s 3D vytlačeným stropom a strechou. Všetky stavby budú založené na betónových základoch vytvorených bežnou metódou [11.4].

Futuristický tvar domov navrhol ateliér Houben/ Van Mierlo architects. V návrhu autori ťažia z výhody technológie 3D tlače - voľnosť formy. Domy svojim tvarom predstavujú akési balvany/menhiry uprostred lesa, ktoré svojim polkruhovým usporiadaním vytvárajú centrálny priestor venovaný komunite. Veľké okenné otvory v stenách, vďaka ktorým sa obyvateľom naskytujú bohaté výhľady do okolitého lesa, posilňujú vzťah medzi interiérom a exteriérom a rovnako tak pocit bývania v zeleni [11.5].

Prvý jednopodlažný dom bude vytlačený v laboratóriu Technologickej univerzity v Eindhovene pomocou portálovej tlačiarne. Konštrukčný princíp domu je založený na niekoľkých vytlačených stenách, ktoré sú zakrivené v rovine a mimo rovinu. Vnútorná časť steny je rovná, zatiaľ čo vonkajšia časť je v niektorých miestach výrazne vykonzolovaná. Obe časti sú od seba oddelené izolačným materiálom. Na univerzite je skúmané ako docieliť požadované vykonzolovanie steny bez straty stability [11.6].

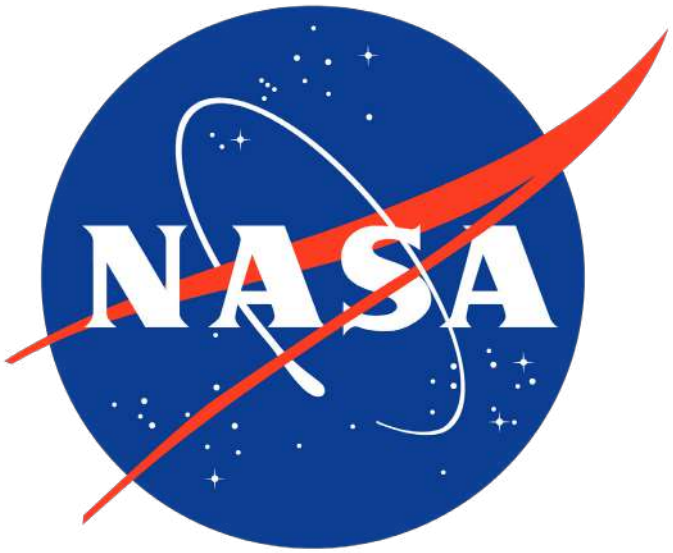
Za samotným návrhom domov stojí ambícia podporiť vedecký výskum a technológiu 3D tlače z betónu. Snahou je docieliť, aby boli 3D vytlačené domy čoskoro každodennou realitou [11.7].

obr. 85 Vykonzolovaná časť steny bez vnútornej štruktúry

obr. 86 Vykonzolovaná časť steny s vnútornou štruktúrou na zvýšenie stability

obr. 87 Vizualizácia plánovaného prvého domu

Vesmír



obr. 88 symbol NASA

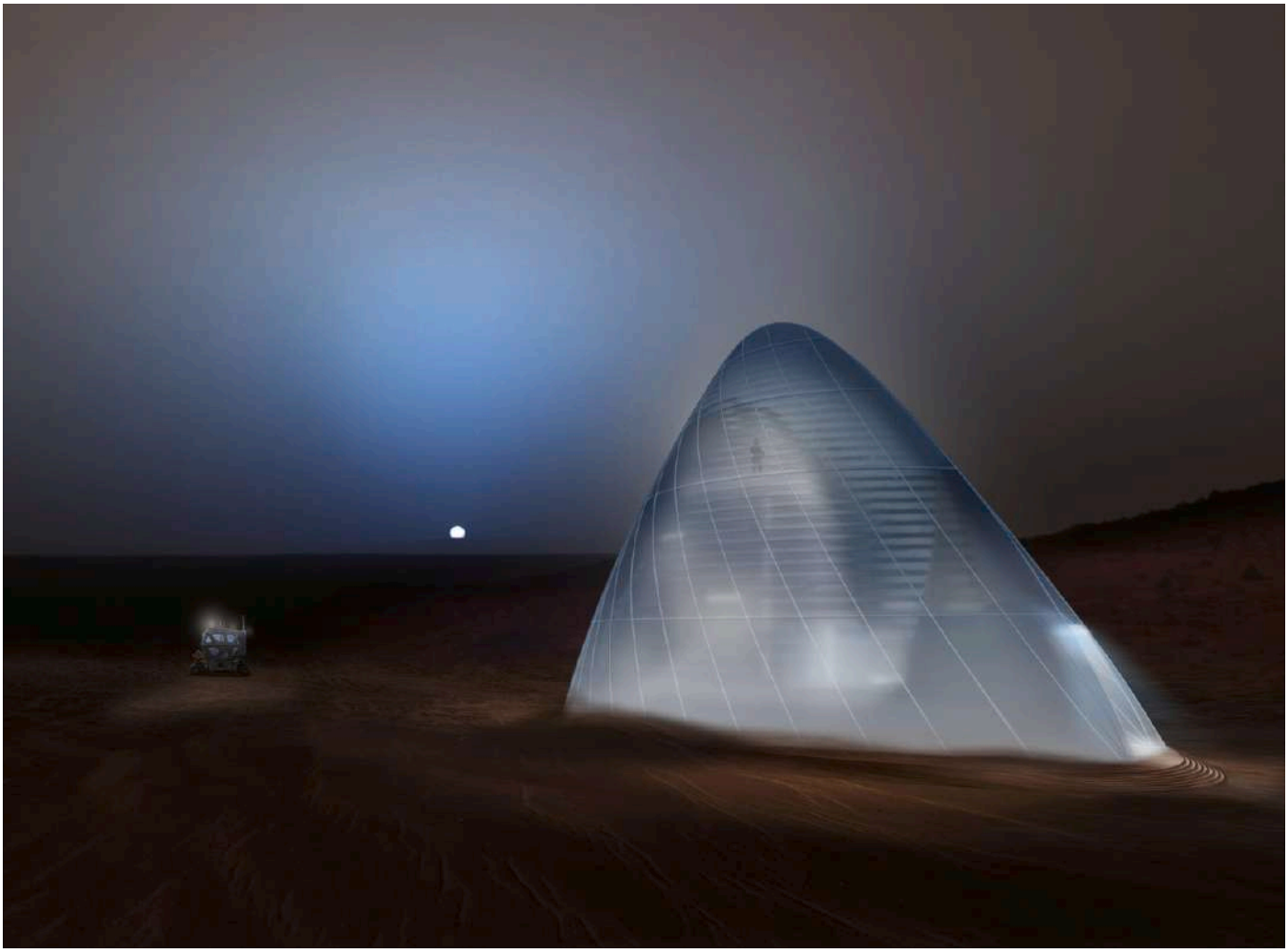
12 NASA Centennial Challenge

3D-Printed Habitat (3DPH)

V roku 2014 spustila NASA Centennial Challenges program súťaž s názvom 3D-Printed Habitat (3DPH). Hlavnou podstatou tejto dlhotrvajúcej medzinárodnej súťaže bolo podnietiť verejnosť pri vývoji nových foriem bývania na cudzích planétach pomocou technológie aditívnej výroby (additive manufacturing). Obydlia na Marse alebo na mesiaci by boli vytlačené pomocou autonómnych 3D tlačiarní, pri použití miestnych planetárnych materiálov a recyklovateľných materiálov misií. Súťaž prebehla v troch fázach, pričom každá nasledujúca fáza bola náročnejšia a komplikovanejšia. V dobe keď súťaž vznikla neexistovali technológie, ktoré by dokázali autonómne vytlačiť štruktúry podľa predstáv NASA.

Fáza 1 (2015) predstavovala architektonickú súťaž, pri ktorej bolo potrebné použiť najmodernejšie architektonické a technologické koncepcie [12.1]. **Fáza 2** (2016-2017) bola zameraná na vývoj materiálov a systémov tlače. Dôraz bol kladený na materiál a jeho zloženie. Ten musel obsahovať minimálne zo 70% pôvodné planetárne materiály a recyklovateľné odpadové materiály z misie. Fáza 2 bola rozdelená do ďalších 3 úrovní. V úrovni 1 bola meraná konzistencia materiálu testom sadnutia kužeľa. Ďalej museli tímy vytlačiť valcovú vzorku, ktorá podstúpila skúšku zaťaženia v tlaku. Navrhované materiály tímov museli obsahovať minimálne 30% pôvodných planetárnych materiálov. V úrovni 2 súťažné tímy vytlačili nosník, ktorý bol neskôr namáhaný v ohybe. Posledná úroveň 3 prebiehala ako súťaž tvárou v tvár v stredisku Caterpillar's Edwards Demonstration Facility v Illinois po dobu troch dní. Tímy museli vytlačiť tri testovacie vzorky na skúšku v tlaku, tri nosníky na skúšku v ohybe a kupolu podľa predpísaných rozmerov. Všetky vytlačené elementy boli na mieste zaťažované až do bodu porušenia [12.2]. **Fáza 3** (2018-2019) bola rozdelená do dvoch sub-súťaži: 1) virtuálna stavba, ktorá pozostávala z vytvorenia podrobného modelu navrhovaného obydlia v systéme BIM. V úrovni 1 bolo požadovaných minimálne 60% informácií pre stavbu a v úrovni 2 bolo požadovaných 100% informácii. 2) konštrukčná časť, ktorá bola rozdelená do 3 úrovní. V úrovni 1 mali tímy za úlohu vytlačiť základovú konštrukciu a vzorky, ktoré boli testované nárazom a teplotnými zmenami. V úrovni 2 vytlačil každý tím predpísaný objekt, na ktorom bol vykonaný hydrostatický test. Posledná úroveň 3 prebehla opäť ako súťaž tvárou v tvár, pri ktorej boli tímy vyzvané k vytvoreniu obydlia v mierke 1:3. Táto úroveň prebiehala opäť v rovnakom stredisku v Illinois tri dni (3x10 hodín).

Výsledkom tohto niekoľkoročného úsilia je technologický pokrok, ktorý zahŕňa nové, inovatívne a zároveň bezpečné materiálové zloženia pre 3D tlač veľkých štruktúr na cudzích planétach a na Zemi. Boli predstavené rozmanité a životaschopné návrhy planetárnych obydlí a s nimi inovatívne procesy, technológie, softvéry a algoritmy [12.1].



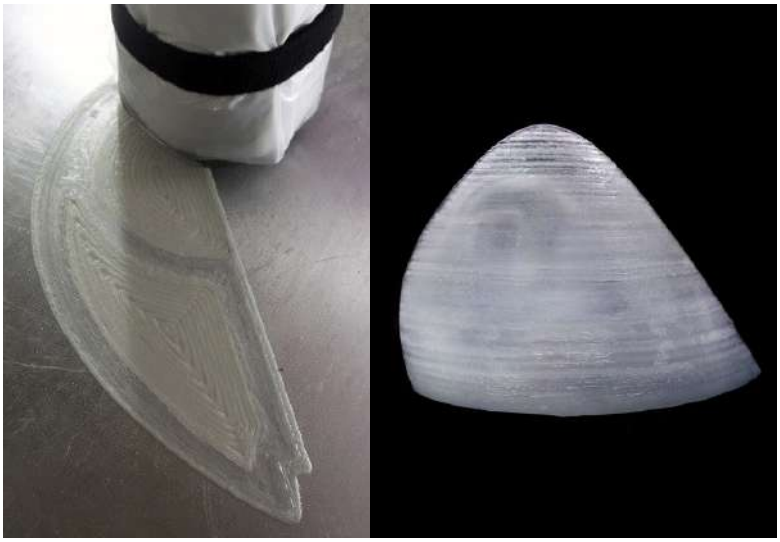
obr. 89 Vizualizácia Mars Ice House

13 SEArch+, Apis Cor

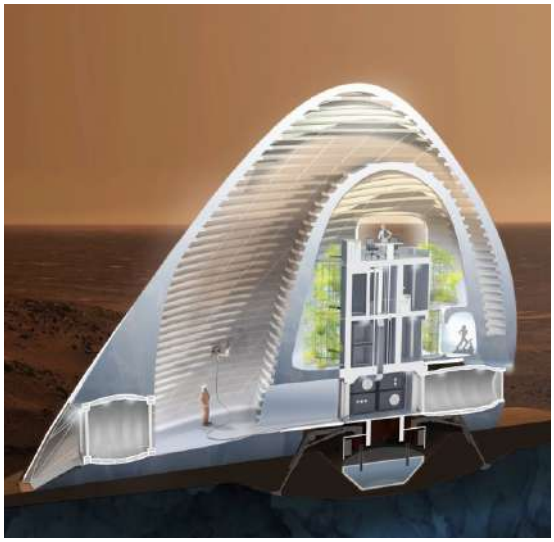
V roku 2015 spoločnosť SEArch+ v spolupráci s Clouds AO vyhrala **fázu 1** súťaže s návrhom nazvaným Mars Ice House. Hlavným konštrukčným materiálom obydlia je ľad, ktorý môžeme nájsť na Mesiaci, Marse, Plute, Európe atď. Vzhľadom na nové dôkazy o potencionálnom nebezpečenstve chloristánu (ClO_4) v pôde na Marse sa javí použitie ľadu ako zaujímavá alternatíva. Vrstva vody účinne chráni pred galaktickým kozmickým žiarením a žiarením slnečných častíc. Priehľadnosť ľadu umožňuje prestup viditeľného svetla čo pozitívne vplýva na psychiku posádky. V atmosfére Marsu však dochádza v prípade pevného skupenstva vody k okamžitej sublimácii. Preto si práca s vodou na Marse vyžaduje manipuláciu prostredníctvom fázovej zmeny (zachytávanie vodnej pary pri ťažbe ľadu). Mars Ice House je tvorený vrstvami priesvitných kupol zakrytými priehľadnou ETFE membránou, ktorá tvorí tlakovú hranicu a zabraňuje sublimácii ľadu. Únosnosť bežného ľadu v ťahu je 2-3MPa. Únosnosť je možné zvýšiť až trojnásobne vystužením pomocou čírej vláknitej prísady oxidu kremičitého. Na podobnom princípe bol v roku 1942 vyvinutý kompozitný materiál (Pykrete) tvorený ľadom vystuženým drevenou buničinou. Testovacia 3D tlač z ľadu prebehla na McGill University v Montreale, kde bolo na vytlačenie modelu použité tradičné robotické rameno. Ako podporná konštrukcia modelu bola zvolená soľanka (vysoko koncentrovaný roztok soli vo vode), ktorá sa topí pri nižších teplotách ako ľad. Pri použití navrhovaných mobilných robotov (minibuilders) sa v prípade skutočnej konštrukcie nepredpokladá aplikácia podpornej konštrukcie. Niekoľko malých robotov pripojených na zásobník vody je schopných ukladať materiál a zároveň stúpať po stenách tohto materiálu pomocou vákuového prichytávania (výskumom robotov sa zaoberá Institute for Advanced Architecture at Catalonia (IAAC) [13.1].

Vo **fáze 3** v konštrukčnej a virtuálnej časti stavby

spolupracovala spoločnosť SEArch+ so spoločnosťou zaoberajúcou sa 3D tlačou z betónu Apis Cor. SEArch+ a Apis Cor získali štvrté miesto vo virtuálnej časti v úrovni 1 (60% návrh), prvé miesto v konštrukčnej časti v úrovni 1 a 2 a prvé miesto vo finálnej virtuálnej časti (100% návrh) s návrhom obydlia Mars X-House. Virtuálna časť fázy 3 spočívala vo vytvorení podrobného informačného modelu BIM, v ktorom sa tímy zamerali aj na postupnosť stavby a simuláciu manipulovania s materiálom, ktorá súvisí s autonómnou 3D tlačou [13.2]. Návrh Mars X-House uprednostňuje bezpečnosť a duševnú pohodu posádky na cudzej planéte. Obydlie predstavuje inováciu v ochrane proti radiácii a zároveň umožňuje prenikanie prirodzeného svetla dovnútra. Mars X-House má neobvyklý tvar hyperboloidu. Oblúk smerujúci dovnútra lepšie odoláva silám vyvíjaným atmosférou vnútorného prostredia. Zatiaľ čo štruktúra z betónu a čadičového vlákna odoláva vnútorným tlakovým silám, unikátny tvar hyperboloidu umožňuje nepretržité vystuženie zdola nahor. Vzhľadom na pórovitosť betónovej štruktúry s čadičovým vláknom je potrebné vytlačiť vnútornú výstelku z polyetylénu s vysokou hustotou (HDPE), ktorá tvorí vnútorný vzduchový obal [13.3].



obr. 90 3D vytlačený model štruktúry z ľadu po rozpustení podporného materiálu zo soľanky



obr. 91 Pohľad na dvojité steny, vertikálnu záhradu a intersticiálny „dvor“

obr. 92 Vizualizácia Mars X-House

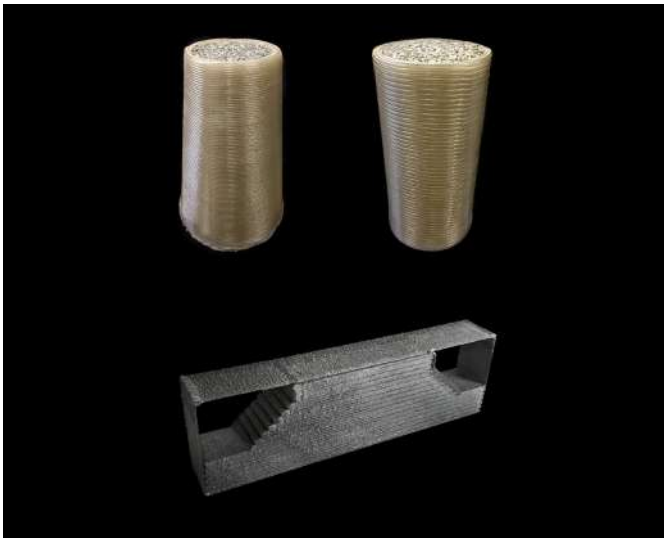
obr. 93 Vizualizácia obydlia na Marse od spoločnosti Foster+Partners

14 Foster+Partners, Branch Technology

V roku 2015 sa spoločnosť Foster+partners zúčastnila fázy 1 súťaže NASA Centennial 3D-Printed Habitat Challenge, ktorá bola zameraná na koncepčné architektonické návrhy a umiestnila sa na druhom mieste. Návrh spočíval v postavení obydlia na Marse pomocou skupiny predprogramovaných poloautonómnych robotov pred príchodom astronautov. V prvom kroku roboti vyberú správne miesto a vykopú 1,5m hlboký kráter. V druhom kroku umiestnia roboti do tohto krátera dodané nafukovacie moduly, ktoré predstavujú jadro obydlia. Nakoniec okolo celého modulu vytlačia ochranný obal z regolitu. Vzhľadom na obrovskú vzdialenosť od Zeme, s ktorou súvisí oneskorená komunikácia pri diaľkovom ovládaní, predstavujú autonómny roboti jednoznačnú výhodu [14.1].

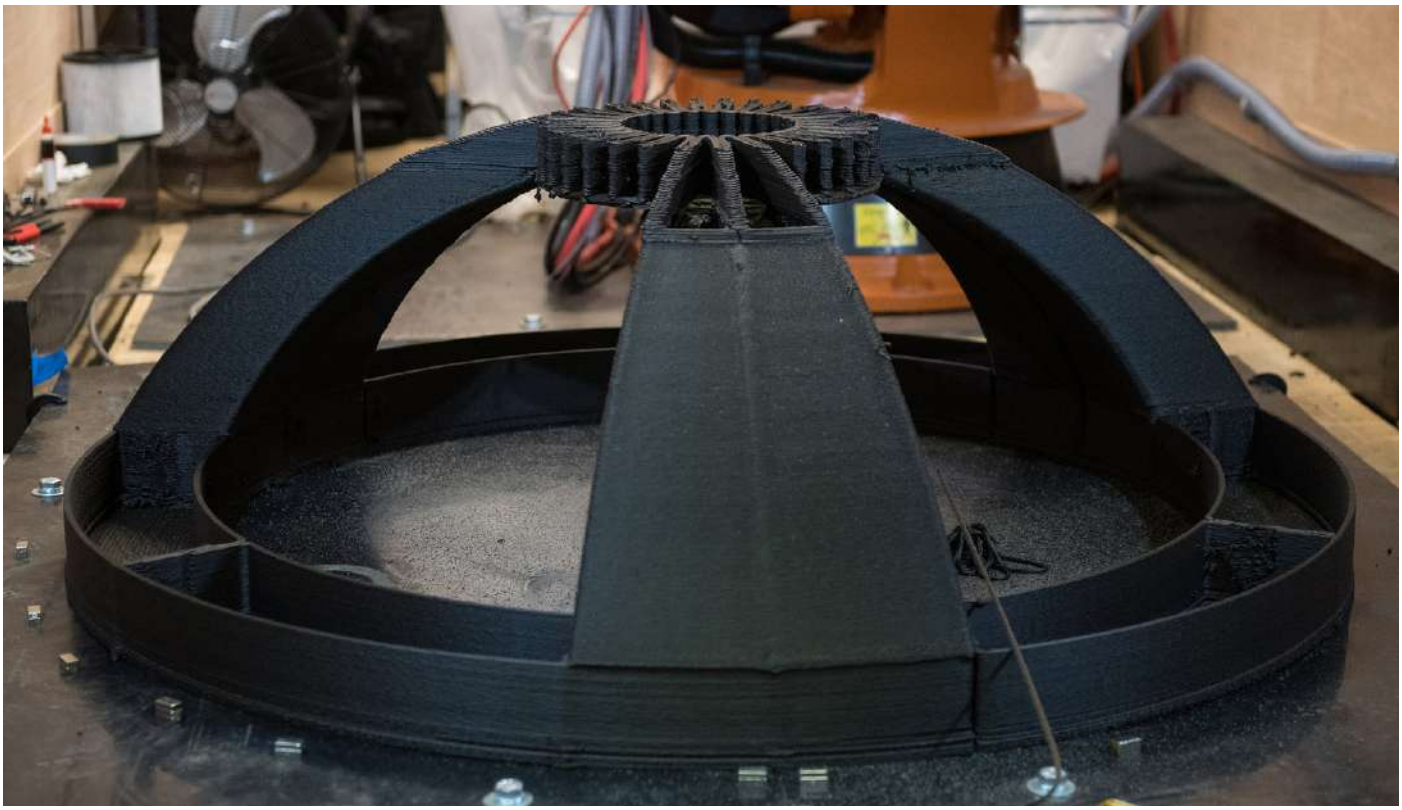
Foster+Partners a Branch Technology sa spoločne zúčastnili všetkých úrovni fázy 2. V úrovni 1 a v úrovni 3 sa umiestnili na prvom mieste a v úrovni 2 sa umiestnili na druhom mieste. Úroveň 3 fázy 2 prebehla ako súťaž tvárou v tvár v zariadení Caterpillar's Edwards Demonstration Facility v auguste 2017. Súťaže sa zúčastnili okrem Foster+Partners a Branch Technology aj Moon-X z Južnej Kórei a Pennsylvania State University. V tejto poslednej úrovni mali tímy za úlohu vytlačiť opäť tri valce na skúšku zaťaženia v tlaku a tri nosníky na skúšku zaťaženia v ohybe. Avšak hlavnú konštrukciu predstavovala v priemere 1,5m veľká kupola. Po jej vytlačení na ňu bolo aplikované počiatočné zaťaženie o veľkosti 50kgf simulujúce prevoz. Nasledovalo overenie rozmerov skenovaním konštrukcie pri dovolenej odchýlke 7mm. Posledný test predstavoval zaťaženie kupoly až do bodu jej porušenia [14.2]. Valec vytlačený spoločnosťou Foster+Partners/ Branch Technology vydržal zaťaženie v tlaku približne 1251kg a kupola približne 1690kg. Nosník vydržal v trojbodovom teste ohybu približne 1441kg [14.3]. Konštrukcia kupoly bola vytvore-

ná patentovanou technológiou bunkovej výroby C-Fab™ (Cellular Fabrication). Materiál štruktúr pri tlači tuhne vo voľnom priestore (freeform fabrication). Touto metódou je možné docieliť pri optimálnom statickom fungovaní konštrukcie minimálnu spotrebu materiálu a to až 20x menej materiálu ako pri štandardných technikách tlače. Filament je ukladaný len tam, kde je potrebný. Materiál bol zároveň vytvorený zo 70% materiálmi, ktoré je možné získať na Marse a z 30% recyklovateľnými materiálmi z misie. Tento revolučný proces má potenciál znížiť finančné náklady na vesmírne misie a rovnako tak zefektívniť stavanie na Zemi [14.4]. Víťazný materiál, ktorý bol použitý na tlač súťažných štruktúr bol vyvinutý spoločnosťou Techmer PM a v súčasnosti je komerčné dostupný. Jedná sa o polymér PET-G (polyethylentereftalát-glykol), ktorý je vystužený čadičovým vláknom [14.5]. Na 3D vytlačenie súťažných štruktúr použil tím robotické rameno so šiestimi stupňami voľnosti. Výhodou tohto robotického systému je možnosť tlačiť previsy väčšie ako 45° bez potreby podporných konštrukcií. Po skenovaní konštrukcie kupoly bola zistená odchýlka menej ako 1% čo predstavuje vysokú presnosť v kontexte 3D tlače veľkých štruktúr [14.2].



obr. 94 3D vytlačené elementy fázy 2, ktoré boli podrobené skúškam

obr. 95 Záťažová skúška 3D vytlačenej kupoly



obr. 96 3D vytlačená kupola od spoločnosti Foster+Partners/Branch Technology technológiou bunkovej výroby C-Fab™

obr. 97 Univerzitný tím počas poslednej úrovne fázy 3 súťaže

15 Pennsylvania State University

Pennsylvania State University sa zúčastnila fázy 2 a 3 súťaže NASA Centennial 3D-Printed Habitat Challenge pričom vo fáze 3 úrovne 3 sa umiestnila na druhom mieste za spoločnosťou Al spaceFactory. Tento úspešný tím tvorený študentmi a fakultami zastupujúcimi Colleges of Arts and Architecture, Engineering, Agricultural Sciences a Materials Research Institute viedol José Duarte a Shadi Nazaria [15.1].

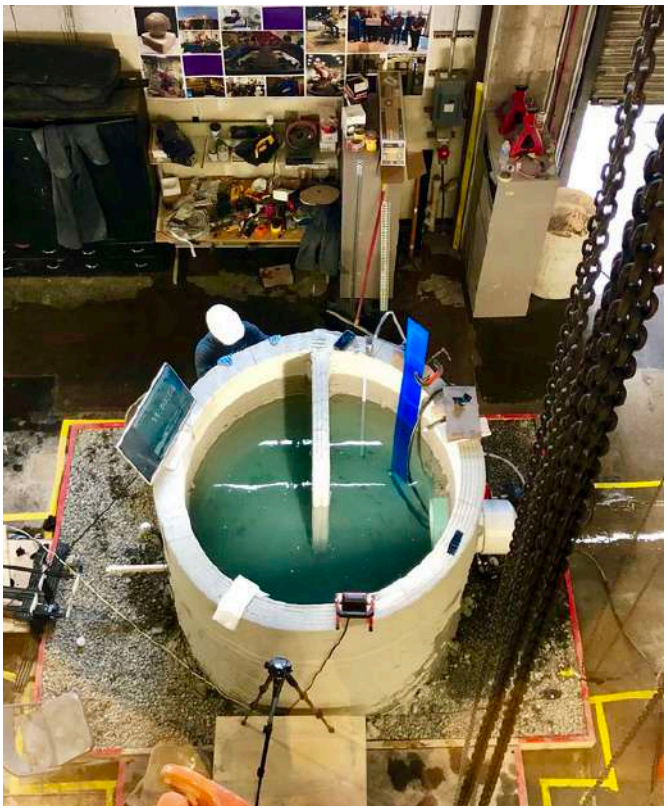
Navrhnuté obydlie ma jednoduchý tvar valca, ktorý účinne odoláva tlakovým silám vyvolaných vnútornou atmosférou. Valcová štruktúra je smerom nahor uzatvorená kužeľovitou kupolou. Univerzite sa podarilo počas súťaže tvárou v tvár v aréne vytlačiť prvú uzatvorenú samonosnú betónovú konštrukciu bez potreby akejkoľvek podpory alebo použitia prefabrikovaných častí. Model obydlia v mierke 1:3 bol po vytlačení vystavený niekoľkým skúškam [15.2]. Pre 3D tlač súťažných elementov a konštrukcií zvolila Pennsylvania State University systém, ktorý sa skladá z dvoch hlavných častí. Prvou časťou je miešacie a pumpovacie zariadenie (m-tec Duo mix 2000), silo a hydraulická hadica, ktorá dodáva betón do trysky. Druhá časť systému je tvorená šesť-osovým robotickým ramenom ABB IRB 6640. Tieto prístroje sú pre 3D tlač agilnejšie, flexibilnejšie a lepšie vybavené na dosiahnutie zložitejších geometrií. Tryska, ktorá bola použitá na 3D tlač má priemer 25,4mm a dokáže vytlačiť filament 25mm široký a 15mm vysoký [15.3]. Tím okrem iného vyvíjal a skúmal rôzne betónové zmesi, ktoré obsahovali materiály dostupné na Marse. Bolo zvažované použitie napríklad sírového betónu využívajúceho čadičové kamenivo, ktorý by nevyžadoval žiadnu vodu a zmesi oxidov horečnatých, ktoré tuhli veľmi rýchlo. Tím sa nakoniec rozhodol vyvinúť suché geopolymérne pojivo s názvom MarsCrete™ použitím čadičovej horniny, kaolinitu, sodíku a kremíku. Táto vyvinutá zmes vyžaduje pridanie malého množstva vody,

ktorá by sa dala získať z podpovrchového ľadu na Marse. Použitím tohto geopolymérneho pojiva miesto cementu na Zemi by sa docielilo zníženie emisií skleníkových plynov. V budúcnosti si tím predstavuje použitie funkčne gradovaného betónu, ktorý by bol schopný vytvoriť vonkajšiu ochrannú vrstvu pred nízkymi teplotami a kozmickým žiarením. Univerzitný tím tiež vyvinul technológiu, ktorá umožňuje hladký a vysoko tesný prechod medzi betónom a boritým sklom okenného otvoru. Aby univerzita mohla lepšie porozumieť správaniu sa čerstvej betónovej zmesi vo vesmíre, poslala vzorku betónovej zmesi na Medzinárodnú vesmírnu stanicu. Na stanicu bola zmes zmiešaná s vodou a bolo pozorované tuhnutie v podmienkach s nulovou gravitáciou. Univerzita by chcela na Medzinárodnú vesmírnu stanicu poslať aj malú 3D tlačiareň, ktorá by umožňovala experimentovať priamo s vytlačeným betónom [15.2].

Vďaka finančným výhram zo súťaže môže univerzita naďalej financovať výskum v oblasti aditívnej technológie výstavby. V technológii 3D tlače vidí univerzitný tím veľký potenciál napríklad pri riešení bývania na Zemi pre ľudí zo sociálne slabších vrstiev spoločnosti alebo pre ľudí, ktorí boli postihnutí prírodnou katastrofou [15.1].

obr. 98 3D vytlačená kupola s vnútornou podporou počas súťaže tvárou tvár (fáza 2, úroveň 3)

obr. 99 Model obydlia v mierke 1:3 vytlačený počas súťaže tvárou v tvár (fáza 3, úroveň 3)



obr. 100 Súčasťou úrovne 2 bol aj hydrostatický test tesnosti

obr. 101 Model obydlia nevydržal skúšku zaťaženia v tlaku

obr. 102 Vizualizácia obydlia MARSHA na Marse

16 AI SpaceFactory

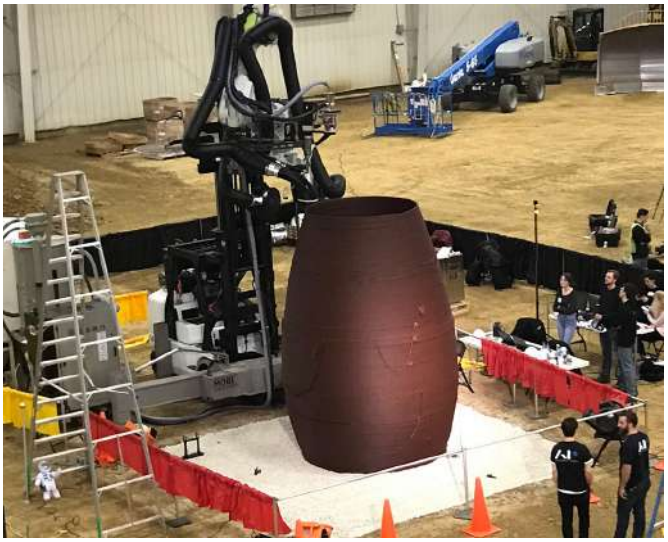
Spoločnosť AI spaceFactory bola založená v roku 2017 s dlhodobým cieľom stať sa multiplanetárnou stavebnou a technologickou spoločnosťou. Ich súťažný tím bol tvorený statikmi, špecialistami na aerodynamiku, odborníkmi na osvetlenie, geológmi, materiálovými inžiniermi, špecialistami na ťažbu a akademickými expertmi. Výsledkom spolupráce bol návrh jedinečného obydlia na Marse. Spoločnosť AI SpaceFactory sa stala víťazom fázy 3 úrovne 3 súťaže.

Jednou z najväčších výziev bolo docieliť zemskú atmosféru vo vnútri obydlia. Tím navrhol vysokú, štvorposchodovú cylindrickú konštrukciu, ktorá priniesla niekoľko radikálnych prístupov. Tvar obydlia je efektívne optimalizovaný na tlak atmosféry vo vnútri a zároveň poskytuje dobrý pomer podlahovej plochy k objemu. Vertikálne prevládajúca hmota minimalizuje prácu potrebnú na založenie objektu. Ďalšou výhodou je jednoduchší a preferovaný vertikálny pohyb robota pri tlačení objektu v porovnaní s horizontálnymi presunmi, ktoré predstavujú vyššiu náročnosť a riziko [16.1]. Materiál určený na stavbu obydlia MARSHA musel byť vyrobený z miestnych surovín Marsu. Spoločnosť AI SpaceFactory použila peletizovaný polymérny kompozitný betón z kyseliny polymliečnej (PLA) a čadičového vlákna, ktoré môžeme nájsť na povrchu Marsu. Výhodou termoplastu PLA je možnosť výroby syntézou ako biopolymér získaný z rastlín pestovaných na Marse. PLA, čadičové vlákno a prímes môžu tiež poskytovať ochranu pred žiarením. Kompozit má nízky koeficient tepelnej rozťažnosti čo predstavuje výhodu vzhľadom na tepelné výkyvy na Marse. Tento materiál na Zemi dosahuje svoju plnú pevnosť takmer okamžite, avšak rýchlosť tuhnutia vo vesmíre je predmetom ďalšieho skúmania. Materiál tiež dosiahol výborné výsledky pri skúškach pevnosti v tlaku a v ťahu [16.2].

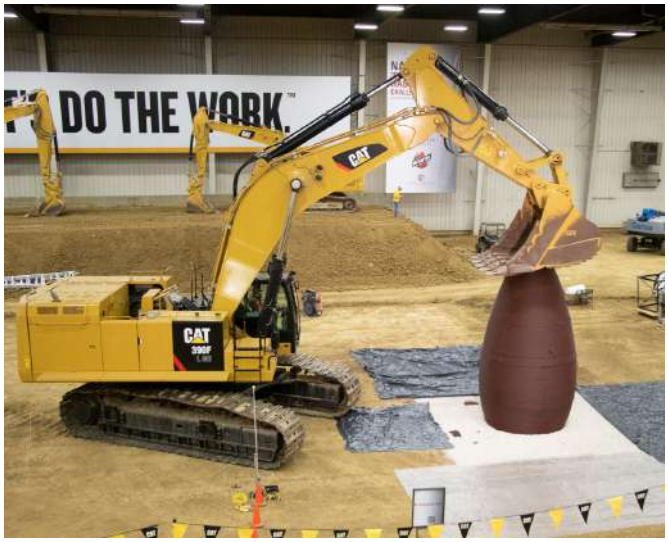
Vo fáze 3 úrovne 3 sa spoločnosť zúčastnila

súťaže tvárou v tvár v stredisku Caterpillar's Edwards Demonstration Facility v Illinois, kde bojovala proti Pennsylvania State University. Tímy mali 3x10 hodín na to, aby vytlačili marťanské obydlie v mierke 1:3 a umiestnili doň výplne otvorov pomocou autonómneho systému tlače. AI SpaceFactory použila na tlač modelu MARSHA robotické rameno. Stavby boli na konci podrobené trom testom. Dymová skúška vyhodnocovala vzduchotesnosť konštrukcie. Nárazový test vykonaný pomocou železných gúľ, ktoré boli vypustené z rôznych výšok simuloval dopad úlomkov meteoroidu. Pri poslednom teste bola stavba vystavená tlakovej sile od lopaty rýpadla.

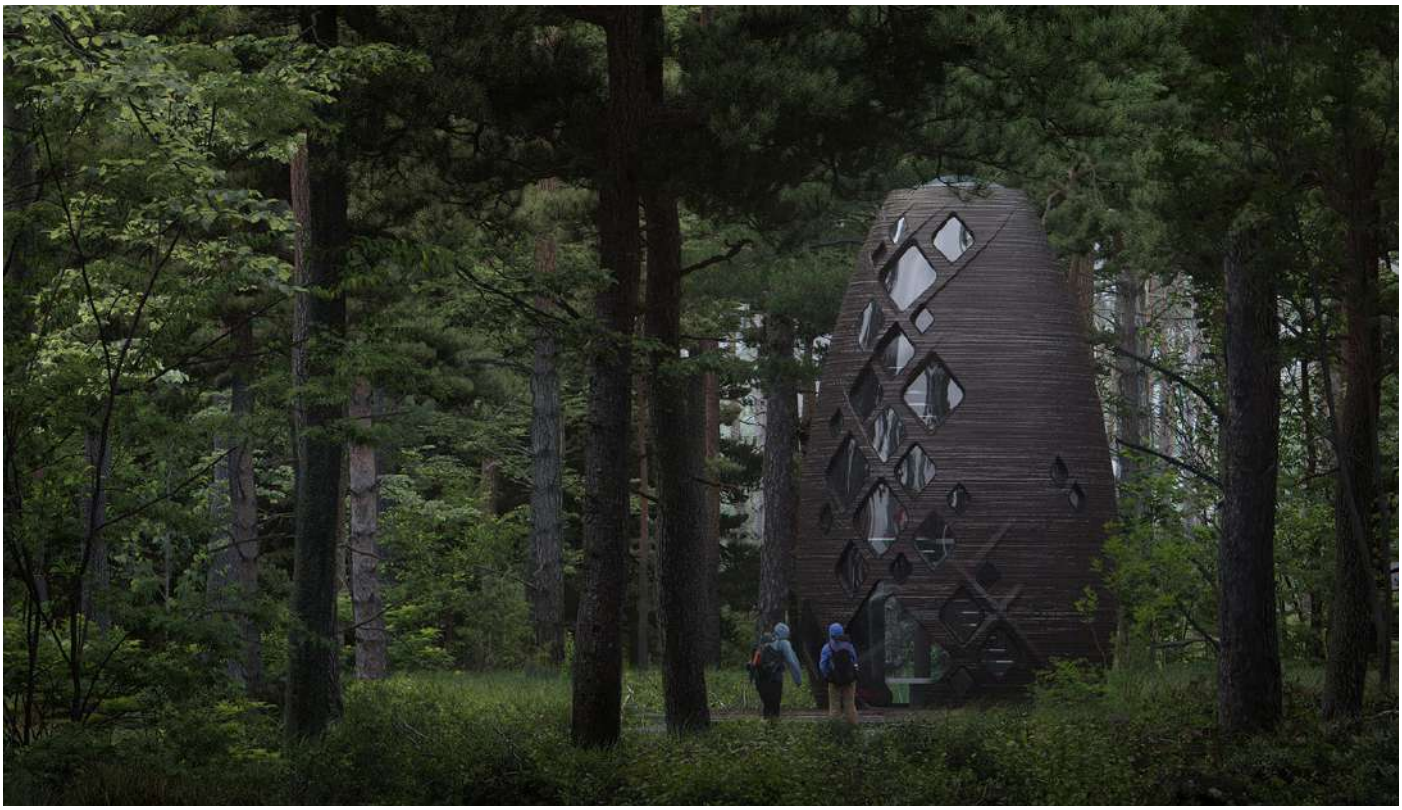
Práve navrhovanie na cudzej planéte poskytlo spoločnosti zaujímavý pohľad ako prehodnotiť problémy a výzvy, ktorým čelíme na Zemi. Množstvo cenných poznatkov, ktoré vzišli z návrhu obydlia na Marse je možné zužitkovať aj na našej planéte. Spoločnosť preto začala pracovať na projekte s názvom TERA [16.1]. Jedná sa o moderný, ekologický dom, vytlačený z rovnakého obnoviteľného a ekologického materiálu ako vesmírny projekt MARSHA. Dom je navrhnutý tak, aby nebolo potrebné napojenie na žiadne inžinierske siete [16.3].



obr. 103 Tlač obydlia MARSHA v mierke 1:3



obr. 104 Skúška zaťaženia v tlaku



obr. 105 Vizualizácia obydlia TERA

17 Ďalšie príklady

V nasledujúcej časti nájdeme niekoľko ďalších príkladov použitia technológie 3D tlače z celého sveta. Okrem uvedených známych stavieb sa s 3D tlačou môžeme stretnúť aj v prípade rôznych umeleckých diel, sôch, pavilónov či štruktúr, ktoré sú výsledkom kreatívneho myslenia, objavovania a experimentovania s touto inovatívnou technológiou.

obr.106 **Dubai Municipality** (2019), Dubaj - Spojené arabské emiráty, Apis Cor [17.1]

obr.107 **3D Printed Home** (2018), Austin - Texas, New Story/ICON [17.2]

obr.108 **The BOD** (2017), Kodaň - Dánsko, COBOD [17.3]

obr.109 **3D Studio 2030** (2019), Saudská Arábia, CyBe [17.4]

obr.110 **Najvyššia 3D vytlačená budova z betónu** (2015), Suzhou - Čína, WinSun [17.5]

obr.111 **Betónové kasárne** (2018), Champaign - Illinois, Marine Corps Systems Command [17.6]

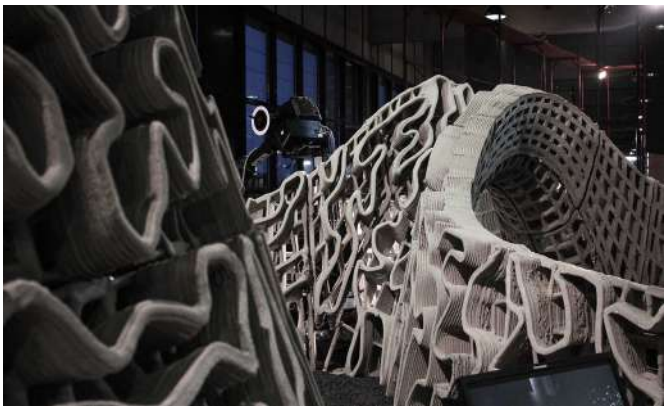
obr.112 **3D hrad** (2014), Minnesota, Andrey Rudenko (Total Kustom) [17.7]

obr.113 **3D hotel** (2015), Filipíny, Andrey Rudenko (Total Kustom) [17.8]

obr.114 **3D Printed Bridge** (2016), Madrid - Španielsko, IAAC Institute for Advanced Architecture of Catalonia/ D-Shape [17.9]

obr.115 **The Radiolaria Pavilion** (2008), Taliansko, Shiro Studio/D-Shape [17.10]

obr.116 **Biomimetické útesy** (2019), Cap d'Agde - Francúzsko, XtreeE/Seaboost [17.11]



obr.117 **FrAgile 3 - Coralloid Cocoons** (2016), Rakúsko, REX|LAB [17.12]

obr.118 **Bloom** (2015), Berkeley - Kalifornia, Emerging Objects [17.13]

obr.119 **3D Printed Concrete Columns** (2019), Švajčiarsko, ETH Zurich/NCCR DFAB [17.14]

obr.120 **Smart Dynamic Casting** (2012-2015), Švajčiarsko, ETH Zürich [17.15]

18 Použité zdroje

[0.1] Wolfs. (2019). Experimental characterization and numerical modelling of 3D printed concrete. Eindhoven: Dereumaux. Cit. 25. September 2020

[1.1] Salet, Ahmed, Bos, & Laagland. (31. Máj 2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. Virtual and Physical Prototyping, 13(3), s. 222-236. doi:10.1080/17452759.2018.1476064. Cit. 27. September 2020

[1.2] BAM. (15. Júl 2017). A World First: the first fully 3D printed, structurally pre-stressed concrete cycle bridge in the world. Cit. 27. September 2020. Dostupné na Internete: bam.co: https://www.bam.co.uk/media-centre/news-details/a-world-first-the-first-fully-3d-printed-structurally-pre-stressed-concrete-cycle-bridge-in-the-world

[1.3] Bos, Wolfs, Ahmed, & Salet. (2. August 2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping, 11(3), s. 209-225. doi:10.1080/17452759.2016.1209867. Cit. 27. September 2020

[2.1] 3dwasp. (2018). The first 3D printed House with earth | Gaia. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/

[2.2] Massimo, M., Alberto, C., Lapo, N., Francesco, D. F., & Massimo, V. (2019). Earthen 3D printed constructions towards a new high-efficient way of building. Cit. 29. December 2020

[2.3] 3dwasp. (dátum neznámy). Crane WASP. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/

[2.4] Jordahn, S. (27. Február 2019). 3D-printed Gaia house is made from biodegradable materials. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: dezeen: https://www.dezeen.com/2019/02/27/gaia-wasp-3d-printed-house-biodegradable-video/

[3.1] Gaget, L. (19. Júl 2018). 3D printing for construction: The first family to move in a 3D printed house. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: sculpteo: https://www.sculpteo.com/blog/2018/07/19/3d-printing-for-construction-the-first-family-to-move-in-a-3d-printed-house/

[3.2] Goidea, A. (November 2017). Batiprint3D Project Report. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: http://www.3dprintetbyggeri.dk/bes%C3%B8gsrapporter.html

[3.3] TICA architecture. (2017). YHNOVA : maison en impression 3D. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: ticarchitecture: http://www.ticarchitecture.fr/index.php/habitats/yhnova/

[3.4] Poullain, Paquet, Garnier, & Furet. (2018). On site deployment of 3D printing for the building construction – The case of YhnovaTM. MATEC Web of Conferences. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2018/22/matecconf_matbud2018_01001/matecconf_matbud2018_01001.html

[4.1] Universitat Politècnica de València. (23. Júl 2018). La start-up UPV presenta, en colaboración con la institución académica, la primera casa de España construida in situ con una impresora 3D. Cit. 27. December 2020. Dostupné na Internete: upv: https://www.upv.es/noticias-upv/noticia-10298-be-more-3d-es.html

[4.2] Collado, Valencia, Rodríguez, & Montes. (2018). Investigación sobre construcción 3d y sus aplicaciones. 8º Congreso Internacional de Arquitectura Blanca. Valencia. Cit. 18. Október 2020

[4.3] Mollejo, V. (11. Marec 2018). Imprimen en Valencia la primera casa en 3D. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: redbull: https://www.redbull.com/es-es/tecnologia-casa-3d-valencia

[4.4] Bemore3D. (dátum neznámy). 3D Printing The Industry‘s Technology 4.0. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: https://bemore3d.com/language/en/documents/

[4.5] Bemore3D. (dátum neznámy). DISPOSITIVES. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: bemore3d: https://bemore3d.com/language/en/dispositives/

[4.6] Jackson, B. (11. Apríl 2018). BE MORE 3D AND CEMEX 3D PRINT BUNGALOW IN 12 HOURS. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: 3dprintingindustry: https://3dprintingindustry.com/news/3d-cemex-3d-print-bungalow-12-hours-131925/

[5.1] Kamp C. (dátum neznámy). 3D-printing in the construction world. Cit. 24. Október 2020. Dostupné na Internete: kampc: https://www.kampc.be/c3po_eng

[5.2] COBOD. (dátum neznámy). BOD2 SPECIFICATIONS. Cit. 24. Október 2020. Dostupné na Internete: cobod: https://cobod.com/wp-content/uploads/2020/09/BOD2-Specifications-1.pdf

[5.3] Jakob Jørgensen (COBOD) (súkromná komunikácia, 14. Január 2021). Material. Cit. 14. Január 2021

[5.4] Kamp C. (dátum neznámy). Frequently asked questions about the 3D-printed house. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: kampc: https://www.kampc.be/innovatie/projecten/3d-printen-in-de-bouw/faq-eng?fbclid=IwAR2s9gRgcoW8dGEGvlTDLAI9y9EEXJ5jUnc20qPx8DOJSi_anpGXb0klFG4

[5.5] Putten, J. V., Olmen, A. V., Aerts, M., Ascione, E., Beneens, J., Blaak-meer, J., . . . Tittelboom, K. V. (2020). 3D Concrete Printing on Site: A Novel Way of Building Houses? Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. doi:10.1007/978-3-030-49916-7_71. Cit. 23. Január 2021

[6.1] Stabile, L. (dátum neznámy). Printed buildings: Is this construction‘s digital future? Cit. 25. Október 2020. Dostupné na Internete: arup: https://www.arup.com/projects/3d-printed-concrete-house

[6.2] 3D Housing 05. (2018). 3D HOUSING 05. Cit. 25. Október 2020. Dostupné na Internete: 3dhousing05: https://www.3dhousing05.com/index.html

[6.3] CyBe. (dátum neznámy). CyBe 3D Concrete Printers Specifications. Cit. 11. Január 2021. Dostupné na Internete: https://cybe.eu/technology/3d-printers/

[6.4] CyBe. (dátum neznámy). Software. Cit. 11. Január 2021. Dostupné na Internete: cybe: https://cybe.eu/technology/software/

[6.5] HeidelbergCement Group. (2018). 3D Housing 05 - 3D-printed house, Italy. Cit. 25. Október 2020. Dostupné na Internete: heidelbergcement: https://www.heidelbergcement.com/en/3d-housing

[6.6] CyBe (súkromná komunikácia, 11. Január 2021). CyBe MORTAR. Cit. 11. Január 2021

[7.1] Bari, O. (13. Marec 2017). Build Your Own 3D Printed House, All in One Day. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/806742/build-your-own-3d-printed-house-all-in-one-day

[7.2] Jamie, D. (6. Marec 2018). #3DStartup: Apis Cor, Creators of the 3D Printed House. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: 3dnatives: https://www.3dnatives.com/en/apis-cor-3d-printed-house-060320184/

[7.3] Cheniuntai, N. (25. Október 2019). GROUNDBREAKING PROJECT. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: apis-cor: https://www.apis-cor.com/dubai-project

[7.4] Additive Manufacturing Global. (9. September 2018). apis-cor 3D printer builds houses of nearly any size. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: additivemanufacturing: http://additivemanufacturing.global/index.php/en/print-en/architecture/3592-apis-cor-3d-printer-builds-houses-of-nearly-any-size

[7.5] Valente, Sibai, & Sambucci. (4. September 2019). Extrusion-Based Additive Manufacturing of Concrete Products: Revolutionizing and Remodeling the Construction Industry. Journal of Composites Science, 3(88). doi:10.3390/jcs3030088. Cit. 3. November 2020

[7.6] Benedict. (13. Február 2017). 3D printing construction company Apis Cor prints 37 m2 house near Moscow, plans global expansion. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: 3ders: https://www.3ders.org/articles/20170213-3d-printing-construction-company-apis-cor-prints-37-m2-house-near-moscow-plans-global-expansion.html

[7.7] Apis Cor. (2020). Gallery. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: apis-cor: https://www.apis-cor.com/gallary

[7.8] Wawrek. (2019). Zero house by 3D printer technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. doi:10.1088/1757-899X/566/1/012037. Cit. 3. November 2020

[8.1] Moussion, A. (30. Október 2017). Rencontre avec Constructions 3D : une start-up française qui veut révolutionner le bâtiment grâce à l'impression 3D. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: primante3d: http://www.primante3d.com/constructions3d-30102017/

[8.2] Constructions-3D. (9. Júl 2020). Press release. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: https://en.constructions-3d.com/presse

[8.3] Constructions-3D. (dátum neznámy). A TURNKEY SOLUTION. Cit. 5. November 2020. Dostupné na Internete: constructions-3d: https://en.constructions-3d.com/la-maxi-printer

[8.4] Constructions-3D. (dátum neznámy). TECHNICAL DOCUMENTATION. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: constructions-3d: https://en.constructions-3d.com/technical-data

[8.5] Constructions-3D. (dátum neznámy). L'IMPRIMANTE 3D DE BÂTIMENTS. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: https://drive.google.com/drive/folders/1G-3kGmCWtwpD6RA-oWaRG63_G6_wQ1K7T

[9.1] Scoolpt. (dátum neznámy). Jak Prvok přišel na svět. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: scoolpt: https://www.scoolpt.com/pribeh-prvoka/

[9.2] Šálková, S. (19. August 2020). Dům Prvok propojuje výtvarné umění s nejmodernější stavební technologií. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: artmagazin: https://artmagazin.eu/dum-prvok-propojuje-vytvarne-umeni-s-nejmodernejsi-stavebni-technologii/

[9.3] Heller, J. (23. Apríl 2020). V Česku se tiskne první 3D dům. Věřím, že tohle je budoucnost, tvrdí jeho autor. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: aktualne: https://zpravy.aktualne.cz/domaci/v-cesku-se-tiskne-prvni-3d-dum-verim-ze-to-je-budoucnost/r~f1578568853e11eaaabd0cc47ab5f122/

[9.4] Brejlová, I. (14. August 2020). 3D tisk domů: začneme v Česku, pokračovat budeme ve vesmíru. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: svetchytre: https://www.svetchytre.cz/a/pBjiF/3d-tisk-domu-zacneme-v-cesku-pokracovat-budeme-ve-vesmiru

[9.5] Jiří Vele (súkromná komunikácia, 14. Január 2021). robot Máša. Cit. 14. Január 2021

[9.6] Master Builders Solutions. (6. Máj 2020). Stavebnictví budoucnosti. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: master-builders-solutions: https://www.master-builders-solutions.com/cs-cz/about-us/news/stavebnictvi-budoucnosti-3d-tisk

[9.7] Master Builders Solutions. (August 2020). MasterFlow 3D 100. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: https://www.master-builders-solutions.com/cs-cz/products/masterflow/masterflow-3d-100

[9.8] Fakulta stavební ČVUT. (30. September 2020). Experimentální centrum Fakulty stavební ČVUT a tištěný dům Prvok. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: srdcemstavari: https://srdcemstavari.cz/experimentalni-centrum-fakulty-stavebni-cvut-a-tisteny-dum-prvok/?fbclid=IwAR1b4yhVAltsvy6QXa_fmi3diPzjmYm_zgOkhIuqmB-aQZqTZa3fAMkyi94

[10.1] O'Neal, B. (23. Máj 2016). Dubai Inaugurates First 3D Printed Office Building, Constructed in 17 Days. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: 3dprint: https://3dprint.com/126426/3d-printed-museum-office/

[10.2] Dubai Future Foundation. (dátum neznámy). About Dubai Future Foundation. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: dubaifuture: https://www.dubaifuture.ae/about/

[10.3] UAE. (1. Október 2019). Dubai 3D Printing Strategy. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: u.ae: https://u.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/local-governments-strategies-and-plans/dubai-3d-printing-strategy

[10.4] Killa Design. (13. Júl 2017). Office of the Future / Killa Design. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killa-design

[10.5] Eric. (2017). Dubai Office of the Future is the First 3D printed commercial building in the world. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: winsun3dbuilders: https://www.winsun3dbuilders.com/2020/02/21/10580/

[10.6] Alawneh, Matarneh, & El-Ashri. (2018). THE WORLD'S FIRST 3D–PRINTED OFFICE BUILDING IN DUBAI. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: https://www.pci.org/PCI_Docs/Papers/2018/32_Final_Paper.pdf

[11.1] 3DPRINTEDHOUSE. (dátum neznámy). Where are we printing? Cit. 17. November 2020. Dostupné na Internete: 3dprintedhouse: https://3dprintedhouse.nl/en/project-info/where-are-we-printing/

[11.2] 3DPRINTEDHOUSE. (dátum neznámy). Project Milestone. Cit. 17. November 2020. Dostupné na Internete: 3dprintedhouse: https://3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone

[11.3] Frearson, A. (4. Jún 2018). Eindhoven to build „world's first" 3D-printed houses that people will live inside. Cit. 17. November 2020. Dostupné na Internete: dezeen: https://www.dezeen.com/2018/06/04/eindhoven-university-technology-project-milestone-3d-printed-concrete-houses/

[11.4] 3DPRINTEDHOUSE. (dátum neznámy). What are we printing? Cit. 17. November 2020. Dostupné na Internete: 3dprintedhouse: https://3dprintedhouse.nl/en/project-info/what-are-we-printing/

[11.5] Houben & Van Mierlo. (2017). Milestone. Cit. 17. November 2020. Dostupné na Internete: houbenvanmierlo: https://www.houbenvanmierlo.nl/werk/milestone/

[11.6] Wolfs. (2019). Experimental characterization and numerical modelling of 3D printed concrete. Eindhoven: Dereumaux. Cit. 17. November 2020

[11.7] 3DPRINTEDHOUSE. (dátum neznámy). Innovation. Cit. 17. November 2020. Dostupné na Internete: 3dprintedhouse: https://3dprintedhouse.nl/en/project-info/innovation/

[12.1] Roman, Fiske, Nazarian, Yashar, Ballard, Bentley, . . . Adams. (2020). 3D-Printing Lunar and Martian Habitats and the Potential Applications for Additive Construction. International Conference on Environmental Systems. Cit. 13. December 2020

[12.2] Prater, Kim, Roman, & Mueller. (2018). NASA's Centennial Challenge for 3D-Printed Habitat: Phase II Outcomes and Phase III Competition Overview. 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. doi:10.2514/6.2018-5405. Cit. 13. December 2020

[13.1] Morris, Ciardullo, Lents, Montes, Yashar, Rudakevych, . . . Sono, Y. (2016). Mars Ice House: Using the physics of phase change in 3D printing a habitat with H2O. 46th International Conference on Environmental Systems. Vienna. Cit. 13. December 2020

[13.2] Roman, Fiske, Nazarian, Yashar, Ballard, Bentley, . . . Adams. (2020). 3D-Printing Lunar and Martian Habitats and the Potential Applications for Additive Construction. International Conference on Environmental Systems. Cit. 13. December 2020

[13.3] Yashar, Ciardullo, Morris, Pailes-Friedman, Moses, & Case. (2019). Mars X-House: Design Principles for an Autonomously 3D Printed ISRU Surface Habitat. 49th International Conference on Environmental Systems. Boston. Cit. 13. December 2020

[14.1] Foster + Partners. (2015). Mars Habitat. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: fosterandpartners: https://www.fosterandpartners.com/projects/mars-habitat/

[14.2] Prater, Kim, Roman, & Mueller. (2018). NASA's Centennial Challenge for 3D-Printed Habitat: Phase II Outcomes and Phase III Competition Overview. 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. doi:10.2514/6.2018-5405. Cit. 15. December 2020

[14.3] Techmer PM. (29. August 2017). Branch Technology and Foster + Partners Win First Prize in NASA's 3-D Printed Habitat Challenge Using Materials Designed by Techmer PM. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: techmerpm: https://www.techmerpm.com/2017/08/29/branch-technology-and-foster-partners-win-first-prize-in-nasas-3-d-printed-habitat-challenge-using-materials-designed-by-techmer-pm/

[14.4] Roman, Fiske, Nazarian, Yashar, Ballard, Bentley, . . . Adams. (2020). 3D-Printing Lunar and Martian Habitats and the Potential Applications for Additive Construction. International Conference on Environmental Systems. Cit. 15. December 2020

[14.5] Mueller, R. P., Tracie J. Prater, P., Roman, M., Jennifer E. Edmunson, P., Fiske, M. R., & Peter Carrato, P. (2019). NASA CENTENNIAL CHALLENGE: THREE DIMENSIONAL (3D) PRINTED HABITAT, PHASE 3. 70th International Astronautical Congress. Washington. Cit. 15. December 2020

[15.1] Valsechi, L. (16. Máj 2019). 3D-printed Mars habitat team has breakthrough, finishes second in NASA challenge. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: psu: https://news.psu.edu/story/574642/2019/05/16/science-and-technology/3d-printed-mars-habitat-team-has-breakthrough

[15.2] Roman, Fiske, Nazarian, Yashar, Ballard, Bentley, . . . Adams. (2020). 3D-Printing Lunar and Martian Habitats and the Potential Applications for Additive Construction. International Conference on Environmental Systems. Cit. 15. December 2020

[15.3] Watson, Meisel, Bilén, Duarte, & Nazarian. (2019). Large-Scale Additive Manufacturing of Concrete Using a 6-Axis Robotic Arm for Autonomous Habitat Construction. Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. Cit. 15. December 2020

[16.1] Roman, Fiske, Nazarian, Yashar, Ballard, Bentley, . . . Adams. (2020). 3D-Printing Lunar and Martian Habitats and the Potential Applications for Additive Construction. International Conference on Environmental Systems. Cit. 13. December 2020

[16.2] Mueller, R. P., Tracie J. Prater, P., Roman, M., Jennifer E. Edmunson, P., Fiske, M. R., & Peter Carrato, P. (2019). NASA CENTENNIAL CHALLENGE: THREE DIMENSIONAL (3D) PRINTED HABITAT, PHASE 3. 70th International Astronautical Congress. Washington. Cit. 13. December 2020

[16.3] AI SpaceFactory. (dátum neznámy). TERA. Cit. 13. December 2020. Dostupné na Internete: aispacefactory: https://www.aispacefactory.com/tera

[17.1] Apis Cor. (25. Október 2019). GROUNDBREAKING PROJECT. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: apis-cor: https://www.apis-cor.com/dubai-project

[17.2] ICON Team. (12. Marec 2018). New Story and ICON Unveil the First Permitted 3D-Printed Home. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: iconbuild: https://www.iconbuild.com/updates/new-story-and-icon-unveil-the-first-permitted-3d-printed-home

[17.3] COBOD. (dátum neznámy). THE BOD. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: cobod: https://cobod.com/the-bod/

[17.4] CyBe. (dátum neznámy). 3D Studio 2030. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: cybe: https://cybe.eu/cases/3d-studio-2030/

[17.5] Stott, R. (26. Január 2015). Chinese Company Constructs the World‘s Tallest 3D Printed Building. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/591331/chinese-company-creates-the-world-s-tallest-3d-printed-building

[17.6] Kaitlin Kelly; Marine Corps Systems Command. (24. August 2018). MCSC TEAMS WITH MARINES TO BUILD WORLD’S FIRST CONTINUOUS 3D-PRINTED CONCRETE BARRACKS. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: marines: https://www.marines.mil/News/News-Display/Article/1611532/mcsc-teams-with-marines-to-build-worlds-first-continuous-3d-printed-concrete-ba/#mmpop2886595

[17.7] Total Kustom. (dátum neznámy). 3D Printed Concrete Castle is Complete. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: totalkustom: http://www.totalkustom.com/3d-castle-completed.html

[17.8] Total Kustom. (2015). World‘s First 3D Printed Hotel in the Philippines, by Andrey Rudenko. Completed in 2015. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: totalkustom: http://www.totalkustom.com/3d-printed-hotel-suite.html

[17.9] Institute for Advanced Architecture of Catalonia. (dátum neznámy). 3D printed bridge. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: iaac: https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/

[17.10] D-Shape. (dátum neznámy). THE RADIOLARIA PAVILION. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: d-shape: https://d-shape.com/portfolio-item/public/

[17.11] XtreeE. (1. Február 2019). 32 biomimetic reefs in Cap d’Agde. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: xtreee: https://xtreee.com/en/project/32-recifs-artificiels-pour-le-cap-dagde/

[17.12] the Institute for Experimental Architecture and REX|LAB - Innsbruck University. (10. Október 2016). REX|LAB @ Ars Electronica 2016. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: exparch: http://www.exparch.at/index.php?option=com_content&task=view&id=1110&Itemid=244

[17.13] Emerging Objects. (dátum neznámy). Bloom. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: emergingobjects: http://emergingobjects.com/project/bloom-2/

[17.14] Richmond, S. (21. Január 2020). This robot is making concrete more sustainable, and more beautiful. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: ethz: https://blogs.ethz.ch/ETHambassadors/2020/01/20/this-robot-is-making-concrete-more-sustainable-and-more-beautiful/

[17.15] Gramazio Kohler Research; ETH Zurich. (dátum neznámy). Smart Dynamic Casting , ETH Zürich , 2012-2015. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: gramaziokohler: https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/223.html

obr. 01 Podkladná mapa: Mercator projection of Earth. (29. Jún 2012). Cit. 24. November 2020. Dostupné na Internete: wikimedia: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercator_Blank_Map_World.png

obr. 02 Bart Maat/EPA. (18. Október 2017). A cyclist crosses the 3D-printed concrete bike bridge in Gemert. Cit. 27. September 2020. Dostupné na Internete: theguardian: https://www.theguardian.com/technology/2017/oct/18/world-first-3d-printed-bridge-cyclists-netherlands

obr. 03 Salet, Ahmed, Bos, & Laagland. (31. Máj 2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. Virtual and Physical Prototyping, 13(3), s. 226. doi:10.1080/17452759.2018.1476064. Cit. 27. September 2020

obr. 04 Salet, Ahmed, Bos, & Laagland. (31. Máj 2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. Virtual and Physical Prototyping, 13(3), s. 227. doi:10.1080/17452759.2018.1476064. Cit. 27. September 2020

obr. 05 BAM. (15. Júl 2017). A World First: the first fully 3D printed, structurally pre-stressed concrete cycle bridge in the world. Cit. 27. September 2020. Dostupné na Internete: bam.co: https://www.bam.co.uk/media-centre/news-details/a-world-first-the-first-fully-3d-printed-structurally-pre-stressed-concrete-cycle-bridge-in-the-world

obr. 06 Bos, Wolfs, Ahmed, & Salet. (2. August 2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping. s. 213. Cit. 27. September 2020

obr. 07 Salet, Ahmed, Bos, & Laagland. (31. Máj 2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. Virtual and Physical Prototyping, 13(3), s. 225. doi:10.1080/17452759.2018.1476064. Cit. 27. September 2020

obr. 08 3dprintedhouse. (dátum neznámy). Why 3D Concrete Printing? Cit. 27. September 2020. Dostupné na Internete: 3dprintedhouse: https://www.3dprintedhouse.nl/en/project-info/why-3d-concrete-printing/

obr. 09 3dwasp. (2018). The first 3D printed House with earth | Gaia. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/

obr. 10 3dwasp. (2018). The first 3D printed House with earth | Gaia. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/

obr. 11 3dwasp. (2018). The first 3D printed House with earth | Gaia. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/

obr. 12 3dwasp. (dátum neznámy). Crane WASP. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/

obr. 13 3dwasp. (dátum neznámy). Crane WASP. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/

obr. 14 3dwasp. (dátum neznámy). Crane WASP. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/

obr. 15 3dwasp. (2018). The first 3D printed House with earth | Gaia. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/

obr. 16 3dwasp. (2018). The first 3D printed House with earth | Gaia. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/

obr. 17 3dwasp. (2018). The first 3D printed House with earth | Gaia. Cit. 29. December 2020. Dostupné na Internete: 3dwasp: https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia

obr. 18 TICA architectes & urbanistes + Correntin Schleb. (12. November 2019). La maison Yhnova – Construction en impression 3D. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: formes: https://www.formes.ca/architecture/articles/la-maison-yhnova-construction-en-impression-3d

obr. 19 Michelle J. (5. September 2018). Family moved into social housing project with 3D printed house. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: 3dnatives: https://www.3dnatives.com/en/social-housing-3d-printed-house-050920184/#!

obr. 20 Poullain, Paquet, Garnier, & Furet. (2018). On site deployment of 3D printing for the building construction – The case of YhnovaTM. MATEC Web of Conferences. s. 4. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2018/22/matecconf_matbud2018_01001/matecconf_matbud2018_01001.html

obr. 21 Goidea, A. (November 2017). Batiprint3D Project Report. s. 8. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: http://www.3dprintetbyggeri.dk/bes%C3%B8gsrapporter.html

obr. 22 Goidea, A. (November 2017). Batiprint3D Project Report. s. 15. Cit. 17. Október 2020. Dostupné na Internete: http://www.3dprintetbyggeri.dk/bes%C3%B8gsrapporter.html

obr. 23 Bemore3D. (dátum neznámy). 3D HOUSING. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: bemore3d: https://bemore3d.com/language/en/3d-housing/

obr. 24 Bemore3D. (dátum neznámy). 3D Printing The Industry‘s Technology 4.0. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: https://bemore3d.com/language/en/documents/

obr. 25 Bemore3D. (dátum neznámy). DISPOSITIVES. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: bemore3d: https://bemore3d.com/language/en/dispositives/

obr. 26 Be-more-3D. (21. Júl 2018). Be-More-3D Presents Spain’s First 3D Printed House. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: 3dprinting: https://3dprinting.com/news/be-more-3d-presents-spanes-first-3d-printed-house/

obr. 27 Collado, Valencia, Rodríguez, & Montes. (2018). Investigación sobre construcción 3d y sus aplicaciones. 8º Congreso Internacional de Arquitectura Blanca. Valencia. s. 196. Cit. 18. Október 2020

obr. 28 Bemore3D. (dátum neznámy). 3D Printing The Industry‘s Technology 4.0. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: https://bemore3d.com/language/en/documents/

obr. 29 Bemore3D. (dátum neznámy). 3D Printing The Industry‘s Technology 4.0. Cit. 13. Október 2020. Dostupné na Internete: https://bemore3d.com/language/en/documents/

obr. 30 Kamp C & Jasmien Smets. (14. Júl 2020). Europe‘s largest 3D printer builds two-story house. Cit. 24. Október 2020. Dostupné na Internete: newatlas: https://newatlas.com/architecture/kamp-c-3d-printed-house/

obr. 31 COBOD. (dátum neznámy). Meet BOD2. Cit. 24. Október 2020. Dostupné na Internete: cobod: https://cobod.com/bod2/

obr. 32 COBOD. (dátum neznámy). Meet BOD2. Cit. 24. Október 2020. Dostupné na Internete: cobod: https://cobod.com/bod2/

obr. 33 COBOD. (2. Apríl 2019). COBOD 3D concrete printer to print 2 storey Belgian Kamp C. Cit. 24. Október 2020. Dostupné na Internete: highways.today: https://highways.today/2019/04/02/cobod-concrete-printer-belgian-kamp-c/

obr. 34 Kamp C & Jasmien Smets. (dátum neznámy). Media. Cit. 21. Január 2021. Dostupné na Internete: kampc: https://www.kampc.be/innovatie/projecten/3d-printen-in-de-bouw/presentaties-fotos?fbclid=IwAR1-L2NtO5W8RKTtOVWzqHaLc-_k6IseyEO_FR-t4PUPEinczsmOCFgBpEk

obr. 35 Kamp C & Jasmien Smets. (dátum neznámy). Media. Cit. 21. Január 2021. Dostupné na Internete: kampc: https://www.kampc.be/innovatie/projecten/3d-printen-in-de-bouw/presentaties-fotos?fbclid=IwAR1-L2NtO5W8RKTtOVWzqHaLc-_k6IseyEO_FR-t4PUPEinczsmOCFgBpEk

obr. 36 Kamp C. (18. August 2020). The first house 3D printed in one piece. Cit. 21. Január 2021. Dostupné na Internete: domusweb: https://www.domusweb.it/en/architecture/2020/08/18/the-first-house-3d-printed-in-one-piece.html

obr. 37 Locatelli Partners. (2018). 3-D Housing 05. Cit. 11. Január 2021. Dostupné na Internete: locatellipartners: https://www.locatellipartners.com/architecture/3-d-housing-05/

obr. 38 3D Housing 05. (2018). 3D HOUSING 05. Cit. 25. Október 2020. Dostupné na Internete: 3dhousing05: https://www.3dhousing05.com/index.html

obr. 39 Locatelli Partners. (2018). 3-D Housing 05. Cit. 11. Január 2021. Dostupné na Internete: locatellipartners: https://www.locatellipartners.com/architecture/3-d-housing-05/

obr. 40 Locatelli Partners. (2018). 3-D Housing 05. Cit. 11. Január 2021. Dostupné na Internete: locatellipartners: https://www.locatellipartners.com/architecture/3-d-housing-05/

obr. 41 CyBe. (dátum neznámy). 3D Printing. Cit. 25. Október 2020. Dostupné na Internete: cybe: https://cybe.eu/service/3d-printing/

obr. 42 CyBe. (dátum neznámy). 3D concrete printers. Cit. 25. Október 2020. Dostupné na Internete: cybe: https://cybe.eu/technology/3d-printers/

obr. 43 CyBe. (23. Október 2020). La Sphère. Cit. 13. Január 2021. Dostupné na Internete: facebook: https://www.facebook.com/CyBeConstruction/photos/4043263035690076

obr. 44 CyBe (súkromná komunikácia, 11. Január 2021). CyBe MORTAR. Cit. 11. Január 2021

obr. 45 Locatelli Partners. (2018). 3-D Housing 05. Cit. 11. Január 2021. Dostupné na Internete: locatellipartners: https://www.locatellipartners.com/architecture/3-d-housing-05/

obr. 46 CyBe. (dátum neznámy). CyBe MORTAR. Cit. 25. Október 2020. Dostupné na Internete: cybe: https://cybe.eu/technology/cybe-mortar/

obr. 47 Apis Cor. (23. Marec 2017). A startup invented this $10,000 house that can be built in one day. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: businessinsider: https://www.businessinsider.com/house-built-one-day-apis-cor-2017-3

obr. 48 Apis Cor. (1. Marec 2017). APIS COR 3D PRINTS A HOUSE IN ONE DAY. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: 3dprintingindustry: https://3dprintingindustry.com/news/apis-cor-3d-prints-house-one-day-106783/

obr. 49 Getty Images. (1. Marec 2020). Printing Buildings. Cit. 28. December 2020. Dostupné na Internete: nfpa: https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2020/March-April-2020/Features/3D-Printing

obr. 50 Apis Cor. (13. Marec 2017). Build Your Own 3D Printed House, All in One Day. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/806742/build-your-own-3d-printed-house-all-in-one-day

obr. 51 Apis Cor. (13. Marec 2017). Build Your Own 3D Printed House, All in One Day. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/806742/build-your-own-3d-printed-house-all-in-one-day

obr. 52 Wawrek. (2019). Zero house by 3D printer technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. doi:10.1088/1757-899X/566/1/012037. s. 5. Cit. 3. November 2020

obr. 53 Apis Cor. (13. Marec 2017). Build Your Own 3D Printed House, All in One Day. Cit. 3. November 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/806742/build-your-own-3d-printed-house-all-in-one-day

obr. 54 Constructions-3D. (2. November 2020). Le Pavillon. Cit. 5. November 2020. Dostupné na Internete: facebook: https://www.facebook.com/Constructions3D/photos/3582589788463351

obr. 55 Jean, S. P. (dátum neznámy). Pavilion. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: sylvainpierrejean: http://sylvainpierrejean.com/le-pavillon/

obr. 56 Sylvain Pierre Jean; Constructions-3D. (dátum neznámy). Constructions-3D continues the construction of its HQ using its 3DCP technologies. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: cpt-worldwide: https://www.cpt-worldwide.com/news/2-800-m-of-buildings-will-be-3d-printed-1361

obr. 57 Constructions-3D. (dátum neznámy). A TURNKEY SOLUTION. Cit. 5. November 2020. Dostupné na Internete: constructions-3d: https://en.constructions-3d.com/la-maxi-printer

obr. 58 AMY Photographie. (27. Október 2017). Press Kit C3D. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: drive.google: https://drive.google.com/drive/folders/13rX61xGpvvjzz1Nedx2tjM5Opzs4g01T

obr. 59 Constructions-3D. (21. Október 2019). Press Kit C3D. Cit. 14. Január 2021. Dostupné na Internete: drive.google: https://drive.google.com/drive/folders/14WOVEu6o8-Yf7oBdE-6In52sn6SJ3peze

obr. 60 Constructions-3D. (dátum neznámy). Pavillon. Cit. 5. November 2020. Dostupné na Internete: constructions-3d: https://en.constructions-3d.com/nos-realisations-maxi-printer

obr. 61 Constructions-3D. (dátum neznámy). Pavillon. Cit. 5. November 2020. Dostupné na Internete: constructions-3d: https://en.constructions-3d.com/nos-realisations-maxi-printer

obr. 62 Constructions-3D. (dátum neznámy). Pavillon. Cit. 5. November 2020. Dostupné na Internete: constructions-3d: https://en.constructions-3d.com/nos-realisations-maxi-printer

obr. 63 Krupař, S. (19. August 2020). Prvok se už vznáší na hladině Vltavy. Češi postavili první plovoucí dům z 3D tiskárny na světě. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: czechcrunch: https://www.czechcrunch.cz/2020/08/prvok-se-uz-vznasi-na-hladine-vltavy-cesi-postavili-prvni-plovouci-dum-z-3d-tiskarny-na-svete/

obr. 64 Scoolpt. (2020). Prvok - první český 3D tištěný dům. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: archiweb: https://www.archiweb.cz/b/3d-tistena-budova-prvok

obr. 65 Scoolpt. (2020). Prvok - první český 3D tištěný dům. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: archiweb: https://www.archiweb.cz/b/3d-tistena-budova-prvok

obr. 66 Scoolpt. (2020). Prvok - první český 3D tištěný dům. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: archiweb: https://www.archiweb.cz/b/3d-tistena-budova-prvok

obr. 67 StavbaWEB. (9. Apríl 2020). Dům „Prvok“. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: stavbaweb: https://www.stavbaweb.cz/dm-prvok-22786/clanek.html

obr. 68 Veis, D. (19. Jún 2020). Obrazem: Budoucnost nebo extravagance? Prvok je první český dům vytištěný na 3D tiskárně. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: archspace: https://www.archspace.cz/prvok-3d-tisk

obr. 69 Nováková, K. (19. Jún 2020). Obrazem: Budoucnost nebo extravagance? Prvok je první český dům vytištěný na 3D tiskárně. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: archspace: https://www.archspace.cz/prvok-3d-tisk

obr. 70 Master Builders Solutions. (August 2020). MasterFlow 3D 100. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: https://www.master-builders-solutions.com/cs-cz/products/masterflow/masterflow-3d-100

obr. 71 Brand-Tech. (2020). PRVOK OD BUŘINKY S PODPOROU NAŠICH SYSTÉMŮ UŽ ROSTE. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: brandtech: https://www.brandtech.cz/clanky/prvok-od-burinky-s-podporou-nasich-systemu-uz-roste

obr. 72 Brand-Tech. (2020). PRVOK OD BUŘINKY S PODPOROU NAŠICH SYSTÉMŮ UŽ ROSTE. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: brandtech: https://www.brandtech.cz/clanky/prvok-od-burinky-s-podporou-nasich-systemu-uz-roste

obr. 73 Stavebná fakulta ČVUT. (14. August 2020). Otestovali jsme unikátní projekt prvního 3D tisku domu. Cit. 20. December 2020. Dostupné na Internete: fsv: https://web.fsv.cvut.cz/aktuality/508/

obr. 74 WAM. (13. Júl 2017). Office of the Future / Killa Design. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killa-design

obr. 75 Killa Design. (13. Júl 2017). Office of the Future / Killa Design. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killa-design

obr. 76 Killa Design. (13. Júl 2017). Office of the Future / Killa Design. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killa-design

obr. 77 Killa Design. (13. Júl 2017). Office of the Future / Killa Design. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killa-design

obr. 78 Nehuen, A. (18. Január 2016). 3D printing construction & architecture : building the home of the future. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: vietnamconstruction: http://vietnamconstruction.vn/en/3d-printing-construction-architecture-building-the-home-of-the-future/

obr. 79 3ders. (15. Apríl 2014). A Chinese Company 3-D Printed 10 Houses In A Day. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: businessinsider: https://www.businessinsider.com/a-chinese-company-3d-printed-10-houses-in-a-day-2014-4

obr. 80 WinSun. (11. Október 2018). Office of the Future Is 3D Printed in Dubai. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: treehugger: https://www.treehugger.com/office-future-d-printed-dubai-4853759

obr. 81 Alawneh, Matarneh, & El-Ashri. (2018). THE WORLD'S FIRST 3D–PRINTED OFFICE BUILDING IN DUBAI. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: https://www.pci.org/PCI_Docs/Papers/2018/32_Final_Paper.pdf

obr. 82 e.construct. (2016). Office of the Future. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: econstruct: https://www.econstruct.ae/projects/office-of-the-future

obr. 83 Eric. (2016). Dubai Office of the Future is the First 3D printed commercial building in the world. Cit. 22. December 2020. Dostupné na Internete: winsun3dbuilders: https://www.winsun3dbuilders.com/2020/02/21/10580/

obr. 84 Frearson, A. (4. Jún 2018). Eindhoven to build „world's first" 3D-printed houses that people will live inside. Cit. 17. November 2020. Dostupné na Internete: dezeen: https://www.dezeen.com/2018/06/04/eindhoven-university-technology-project-milestone-3d-printed-concrete-houses/

obr. 85 Wolfs. (2019). Experimental characterization and numerical modelling of 3D printed concrete. Eindhoven: Dereumaux. s. 165 Cit. 17. November 2020

obr. 86 Wolfs. (2019). Experimental characterization and numerical modelling of 3D printed concrete. Eindhoven: Dereumaux. s. 165 Cit. 17. November 2020

obr. 87 3DPRINTEDHOUSE. (dátum neznámy). Project Milestone. Cit. 17. November 2020. Dostupné na Internete: 3dprintedhouse: https://3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone

obr. 88 NASA. (27. Júl 2017). Symbols of NASA. Cit. 13. December 2020. Dostupné na Internete: nasa: https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/symbols-of-nasa.html

obr. 89 Clouds AO and SEArch. (2. Október 2015). ICE HOUSE. Image. Cit. 13. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/774654/clouds-ao-and-search-wins-nasa-backed-competition-with-3d-printed-ice-house-for-mars

obr. 90 Morris, Ciardullo, Lents, Montes, Yashar, Rudakevych, . . . Sono, Y. (2016). Mars Ice House: Using the physics of phase change in 3D printing a habitat with H2O. 46th International Conference on Environmental Systems. Vienna. s. 7. Cit. 13. December 2020

obr. 91 Clouds AO and SEArch. (2. Október 2015). ICE HOUSE. Image. Cit. 13. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/774654/clouds-ao-and-search-wins-nasa-backed-competition-with-3d-printed-ice-house-for-mars

obr. 92 SEArch+. (1. Apríl 2019). SEArch+ and Apis Cor Win Latest NASA Competition for 3D Printed Habitats on Mars. Cit. 13. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/914177/search-plus-and-apis-cor-win-latest-nasa-competition-for-3d-printed-habitats-on-mars

obr. 93 Branch Technology and Foster + Partners. (27. Júl 2017). NASA CENTENNIAL CHALLENGE. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: branch.technology: https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/nasa-3d-printed-habitat-challenge

obr. 94 Branch Technology and Foster + Partners. (27. Júl 2017). NASA CENTENNIAL CHALLENGE. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: branch.technology: https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/nasa-3d-printed-habitat-challenge

obr. 95 Branch Technology and Foster + Partners. (27. Júl 2017). NASA CENTENNIAL CHALLENGE. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: branch.technology: https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/nasa-3d-printed-habitat-challenge

obr. 96 Branch Technology and Foster + Partners. (27. Júl 2017). NASA CENTENNIAL CHALLENGE. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: branch.technology: https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/nasa-3d-printed-habitat-challenge

obr. 97 PENN STATE. (16. Máj 2019). 3D-printed Mars habitat team has breakthrough, finishes second in NASA challenge. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: psu: https://news.psu.edu/story/574642/2019/05/16/science-and-technology/3d-printed-mars-habitat-team-has-breakthrough

obr. 98 Coldewey, D. (29. August 2017). 3D-printed space habitats earn $400K in prizes at NASA competition. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: techcrunch: https://techcrunch.com/2017/08/29/3d-printed-space-habitats-earn-400k-in-prizes-at-nasa-competition/

obr. 99 Staedter, T. (7. Máj 2019). AI SpaceFactory Wins NASA‘s 3D-Printed Extraterrestrial Habitats Challenge. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: spectrum.ieee: https://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/space-flight/3d-printers-could-build-future-homes-on-mars

obr. 100 Nazarian, S. (19. Január 2019). Penn State NASA challenge team advances, to be featured on Japanese TV. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: news.psu: https://news.psu.edu/story/554968/2019/01/19/academics/penn-state-nasa-challenge-team-advances-be-featured-japanese-tv

obr. 101 NASA. (7. Máj 2019). AI SpaceFactory Wins NASA‘s 3D-Printed Extraterrestrial Habitats Challenge. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: spectrum.ieee: https://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/space-flight/3d-printers-could-build-future-homes-on-mars

obr. 102 Plompmozes. (25. Júl 2018). Marsha could be grouped into small clusters. Cit. 13. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/898901/nasa-endorses-ai-spacefactorys-vision-for-3d-printed-huts-on-mars

obr. 103 Staedter, T. (7. Máj 2019). AI SpaceFactory Wins NASA‘s 3D-Printed Extraterrestrial Habitats Challenge. Cit. 15. December 2020. Dostupné na Internete: spectrum.ieee: https://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/space-flight/3d-printers-could-build-future-homes-on-mars

obr. 104 AI SpaceFactory. (21. Máj 2019). New York–based startup wins NASA’s 3D-Printed Habitat Challenge. Cit. 13. December 2020. Dostupné na Internete: archpaper: https://www.archpaper.com/2019/05/ai-spacefactory-top-nasas-3d-printed-habitat-challenge/

obr. 105 AI SpaceFactory and Plomp. (4. September 2019). TERA. Image. Cit. 13. December 2020. Dostupné na Internete: archdaily: https://www.archdaily.com/924268/ai-spacefactory-launches-tera-a-3d-printed-b-and-b

obr. 106 Apis Cor. (25. Október 2019). GROUNDBREAKING PROJECT. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: apis-cor: https://www.apis-cor.com/dubai-project
ICON Team. (12. Marec 2018). New Story and ICON Unveil the First Permitted 3D-Printed Home. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: iconbuild: https://www.iconbuild.com/updates/new-story-and-icon-unveil-the-first-permitted-3d-printed-home

obr. 107 ICON Team. (12. Marec 2018). New Story and ICON Unveil the First Permitted 3D-Printed Home. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: iconbuild: https://www.iconbuild.com/updates/new-story-and-icon-unveil-the-first-permitted-3d-printed-home

obr. 108 COBOD. (dátum neznámy). THE BOD. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: cobod: https://cobod.com/the-bod/

obr. 109 CyBe. (dátum neznámy). 3D Studio 2030. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: cybe: https://cybe.eu/cases/3d-studio-2030/

obr. 110 3ders. (19. Január 2015). WINSUN LEAPS AHEAD BY 3D PRINTING VILLA AND 5-STOREY APARTMENT BUILDING! Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: 3dprintingindustry: https://3dprintingindustry.com/news/winsun-3d-printing-building-40316/

obr. 111 U.S. Marine Corps Courtesy photo. (23. August 2018). MCSC TEAMS WITH MARINES TO BUILD WORLD'S FIRST CONTINUOUS 3D-PRINTED CONCRETE BARRACKS. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: marines: https://www.marines.mil/Photos/igphoto/2001958129/

obr. 112 Total Kustom. (dátum neznámy). 3D Printed Concrete Castle is Complete. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: totalkustom: http://www.totalkustom.com/3d-castle-completed.html

obr. 113 Total Kustom. (2015). World's First 3D Printed Hotel in the Philippines, by Andrey Rudenko. Completed in 2015. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: totalkustom: http://www.totalkustom.com/3d-printed-hotel-suite.html

obr. 114 Institute for Advanced Architecture of Catalonia. (dátum neznámy). 3D printed bridge. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: iaac: https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/

obr. 115 D-Shape. (dátum neznámy). THE RADIOLARIA PAVILION. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: d-shape: https://d-shape.com/portfolio-item/public/

obr. 116 Renaud Dupuy de la Grandrive. (1. Február 2019). 32 biomimetic reefs in Cap d'Agde. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: xtreee: https://xtreee.com/en/project/32-recifs-artificiels-pour-le-cap-dagde/

obr. 117 the Institute for Experimental Architecture and REX|LAB - Innsbruck University. (10. Október 2016). REX|LAB @ Ars Electronica 2016. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: exparch: http://www.exparch.at/index.php?option=com_content&task=view&id=1110&Itemid=244

obr. 118 Matthew Millman Photography. (dátum neznámy). Bloom. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: emergingobjects: http://emergingobjects.com/project/bloom-2/

obr. 119 ETH Zurich. (21. Január 2020). This robot is making concrete more sustainable, and more beautiful. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: ethz: https://blogs.ethz.ch/ETHambassadors/2020/01/20/this-robot-is-making-concrete-more-sustainable-and-more-beautiful/

obr. 120 Gramazio Kohler Research; ETH Zurich. (dátum neznámy). Smart Dynamic Casting , ETH Zürich , 2012-2015. Cit. 9. Január 2021. Dostupné na Internete: gramaziokohler: https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/223.html

České vysoké učení technické v Praze
Fakulty stavební ČVUT
Architektura a stavitelství
129AMG2

Akademický rok 2020 - 2021
Zimný semester