



1

STRIATUS

OBLOUKOVÁ LÁVKA Z 3D TIŠTĚNÝCH BETONOVÝCH DÍLCŮ

Michal Kovářík, Lucie Šimečková

Striatus je nevyztužená oblouková lávka složená z betonových dílců vytištěných na 3D tiskárně, které jsou sestaveny bez použití malty. Konstrukce o rozměrech 16 × 12 m, postavená pro účely benátského bienále architektury 2021 v italském městě Giardino della Marinaressa, je první svého druhu, přičemž kombinuje tradiční stavební techniky s pokročilými projektovými a výpočetními metodami a robotickými výrobními technologiemi. Název Striatus odráží její konstrukční logiku a výrobní proces. Beton byl tištěn ve vrstvách kolmých k hlavním vnitřním silám s cílem vytvořit „pruhovanou“ (v angličtině striated) funikulární konstrukci (tj. působící na principu řetězovky, tedy čistě v tlaku/tahu – pozn. překladatele), která nevyžaduje výztuž.

STRIATUS – AN ARCHED 3D CONCRETE PRINTED MASONRY BRIDGE

Striatus is an arched, unreinforced masonry footbridge composed of 3D printed concrete blocks assembled without mortar. Exhibited at the Italian city of Giardino della Marinaressa during the Venice Architecture Biennale until November 2021, the 16 × 12-metre footbridge is the first of its kind, combining traditional techniques of master builders with advanced computational design, engineering and robotic manufacturing technologies. The name Striatus reflects its structural logic and fabrication process. Concrete is printed in layers orthogonal to the main structural forces to create a “striated” compression-only funicular structure that requires no reinforcement.

Architektonický návrh	Zaha Hadid Architects Computation and Design Group (ZHACODE)
Projekt	Block Research Group ETH Zürich (ETHZ BRG)
Návrh betonové směsi	Holcim a LafargeHolcim Spain
3D tisk betonu	incremental3D (in3D)
Montáž	Bürgin Creations a ETHZ BRG
Logistika	ETHZ BRG, Holcim Switzerland & Italy a LafargeHolcim Spain

Nový výrazový prostředek pro beton

Oblouková lávka Striatus je příkladem nového způsobu použití betonu, jenž využívá principy informačního modelování, nové technologické možnosti výroby a současně zohledňuje environmentální hledisko, neboť materiál je v konstrukci použit co nejefektivněji a při výstavbě tak bylo minimalizováno jeho množství. Použitý přístup optimalizuje a propojuje vlastnosti kleneb, 3D tisk betonu a trendy současného navrhování a jako takový má představovat alternativu k tradičním postupům při stavění betonových konstrukcí.

Síla díky geometrii

Striatus je nevyztužená betonová konstrukce, jež své únosnosti dosahuje díky geometrii. Beton lze považovat za umělý kámen, který působí nejlépe v tlaku, čehož je již několik tisíciletí s výhodou využíváno u obloukových a klenutých konstrukcí, kde je materiál rozmístěn přesně tak, aby byly síly převedeny k podporám čistým tlakem. Únosnosti těchto konstrukcí je dosaženo díky geometrickému tvaru, nikoliv neefektivní akumulací materiálu jako u běžných železobetonových nosníků a plochých stropních desek. Při využití principu obloukových a klenutých konstrukcí je možné výrazně snížit množ-

ství materiálu potřebného k překlenutí prostoru, přičemž lze zároveň stavět pomocí materiálů s nižšími pevnostmi.

Geometrie rozvětvené mostovky lávky Striatus reaguje na podmínky v místě osazení. Funikulární tvar jejich oblouků byl definován metodami mezních stavů a rovnováhy sil, jako je analýza tlakové sítě (TNA), původně vyvinutá pro statické posouzení historických zděných kleneb. Zakřivený profil mostovky vychází z linií napětí, které sledují tlakové síly v konstrukci pro všechny zatěžovací stavy.

Ocelová táhla v podporách zachycují vodorovnou reakci oblouků, neoprenové podložky vložené mezi na sucho montované klenbové dílce pak zabráňují koncentraci napětí a zajišťují tření v jejich styčnicích, což je obdobou použití olověných desek nebo měkké malty v historických zděných konstrukcích. V půdorysu tvoří hranice konstrukce výrazné oblouky, které přenášejí horizontální zatížení (např. od návštěvníků opírajících se o zábradlí) čistou tlakovou silou do podpor. K upřesnění a optimalizaci stereotomie dílců a k ověření stability celé sestavy při extrémních případech zatížení nebo rozdílném sedání podpor bylo použito metody pokročilého modelování diskretních prvků (DEM).

Výroba 53 dílců byla provedena 3D tiskem z betonu (*3D tisk z betonu je obecně užívaný termín pro technologii 3D tisku vytlačováním cementové malty – pozn. překladatele*), tj. pomocí tiskových vrstev s proměnnou tloušťkou, které jsou kolmé k převládajícímu toku sil, čímž se zamezilo delaminaci jednotlivých tištěných vrstev. Aditivní výrobní proces zajišťuje, že lze dosáhnout konstrukční hloubky prvků, aniž by bylo nutno vyrábět klenáky s konstantním průřezem. Tím se účinně snižuje množství potřebného materiálu ve srovnání se subtraktivními výrobními metodami nebo odléváním do bednění.

Striatus sleduje logiku zděné konstrukce na dvou úrovních. Jako celek se lávka chová jako řada nakloněných nevytuzených klenákových oblouků se styky kolmo k převládajícímu toku tlakových sil podle stejných konstrukčních principů jako obloukové římské mosty z kamene. Lokálně, na úrovni klenáků, se tištěné vrstvy chovají jako tradiční

cihelné zdivo, podobně jako je tomu v ČR málo známých technologií núbijské nebo mexické klenby, založených na zdění kleneb z nakloněných cihelných oblouků z ruky.

Digitalizace – cesta k udržitelnému betonu

Lávka Striatus ukazuje, jak lze na betonové konstrukce aplikovat tři principy trvalé udržitelnosti (redukce, opakované použití, recyklace).

Redukce

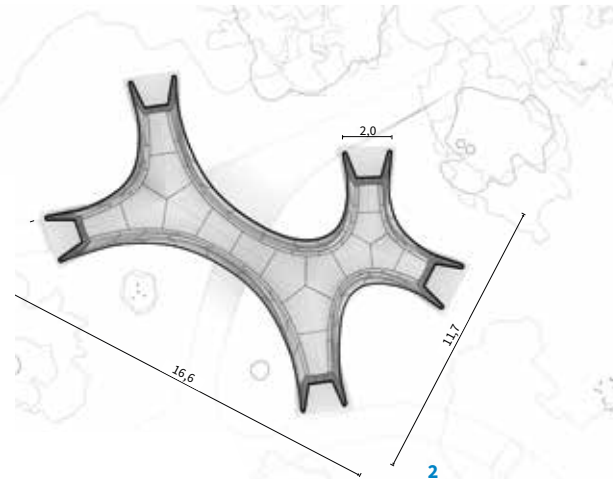
Díky propracované geometrii konstrukce, umožňující umístit beton přesně tam, kde je to potřeba, a díky aditivní výrobě při 3D tisku bylo minimalizováno množství potřebného materiálu a sníženo množství stavebního odpadu, tedy i vyprodukovaných emisí. Funikulární geometrie lávky Striatus svým nízkým namáháním materiálu a čistě tlačným charakterem konstrukce tak naznačuje možný potenciál 3D tisku z betonu, spočívající ve využití pevnostně a emisně méně náročných tiskových materiálů. Pro zachycení tahových sil, daných obloukovým tvarem, využívá lávka vnější vazby. Ve srovnání s tradičním železobetonem se tím výrazně snižuje i množství potřebné oceli.

Opakované použití

Na rozdíl od běžných železobetonových konstrukcí je Striatus navržen pro montáž na sucho bez jakéhokoli pojiva nebo lepidla, což umožňuje most rozebrat a znovu sestavit na jiném místě. Díky své funikulární konstrukci jsou 3D tištěné dílce po celou dobu používání vystaveny nízkému namáhání, čímž nedochází ke ztrátě únosnosti. Lávka Striatus má oddělené komponenty namáhané tlakem nebo tahem, čímž je zajištěn snadný přístup k vnějším vazbám, umožněna jejich údržba a prodloužena životnost celé konstrukce.

Recyklace

Díky 3D tisku při výrobě konstrukce vzniklo minimum odpadu a odpadly i náklady spojené s jednorázovým bedněním, byla třeba „pouze“ podpěrná konstrukce lávky v montážní fázi. Skutečnost, že dílce lávky zůstávají



1 Oblouková nevytuzená lávka Striatus složená z 3D tištěných betonových prefabrikátů, které jsou sestaveny bez použití malty 2 Půdorys 3 Detail tiskového procesu 4 Tisková hlava je osazena na šestiosém robotickém rameni, umožňujícím využít více stupňů volnosti 5 Vytiskované klenáky připravené k transportu



3



4

5



oddělené a oddělitelné pomocí mechanických spojů, jako jsou jednoduché suché kontakty mezi klenáky, bez použití chemických lepidel nebo pojiv, zajišťuje jednoduchý, energeticky nenáročný proces recyklace na konci životnosti prvků, příp. po několika cyklech opakovaného použití.

Robotický 3D tisk betonu

Na rozdíl od klasického 3D tisku vytlačováním cementové malty v jednoduchých vodorovných vrstvách byl pro Striatu k přesnému tisku nerovnoměrných a nerovnoběžných vrstev použit dvousložkový (2K) betonový

filament s urychlovačem, vytlačovaný tiskovou hlavou a čerpacím zařízením prostřednictvím šestiosého robotického ramene, umožňujícího využít více stupňů volnosti. Tato novátorská technologie 3D tisku z betonu v kombinaci s využitím principu klenebních oblouků umožňuje konstrukční působení tištěných dílců bez nutnosti vztuže nebo dodatečného předpínání.

Aby se zabránilo nesouladu mezi směrem působení vnitřních sil a orientací vrstev materiálu, který vzniká při typickém horizontálním „slicování“ (pojem *slicování* je vytvořen od anglického výrazu *slice*, resp. *plátek* nebo *řez*,

tzv. „naplátkování“ objektu na jednotlivé tiskové vrstvy – pozn. překladatele) při 3D tisku, byla pro Striatu na míru vyvinuta konstrukční metoda, která zajišťuje, že jeho tištěné vrstvy jsou zcela zarovnané se směrem tlakových sil v celé konstrukci i lokálně v každém 3D tištěném prvku. Pro řešení problémů, které by mohly ohrozit stabilitu tištěné konstrukce během procesu tisku, byla soudržnost a proveditelnost postupně se rozvíjejících tiskových trajektorií modelována pomocí tzv. procesu funkční reprezentace.

V tomto procesu jsou zadávána a průběžně kontrolována pravidla minimálního a maximálního přesahu vrstev, délky a rychlosti tisku a množství vytlačeného čerstvého betonu. Tato opatření, která se obvykle používají u horizontálně vrstveného 3D tisku, byla zdokonalena a vylepšena tak, aby fungovala i při nastavení na nakloněné rovině:

- rozdíly úhlů mezi počáteční a koncovou rovinou všech 53 tištěných dílců byly upraveny tak, aby splňovaly několik kritérií: vhodný parametr vzájemného styku, úhel mezi sousedními dílci a maximální sklon tisku,
- pečlivý návrh a iterační zpřesnění dutých průřezů a triangulace výplní zajistily, že materiál je umístěn tak, aby odpovídal přesně analyzovanému lokálnímu statickému působení každého dílce. Tento návrh a optimalizace byly aplikovány na každou vrstvu každého dílce (s průměrně 500 tiskovými vrstvami na dílec), čímž bylo zajištěno, že jsou všechny dílce maximálně duté a lehké, a tudíž je na ně potřeba co nejmenší množství materiálu při zachování stability ve všech zatěžovacích stavech,
- výsledná konstrukce průřezu byla zpracována do jediné souvislé tiskové trajektorie splňující různá kritéria zahrnující vhodnou rychlost tisku a poloměry otáčení, požadovanou šířku a tloušťku vrstvy a řešení přirozeně se vyskytujících tiskových jevů.

Digitalizace výroby a digitální rozšíření kvalifikovaných montážních a stavebních technik zpřístupňuje historicky nabyté znalosti mladším generacím a zároveň umožňuje

6



7



8



9



systematickou modernizaci dřívějších postupů pomocí výpočetních a robotických technologií. To slibuje ekologicky, sociálně, kulturně a ekonomicky udržitelnou alternativu k postupům 20. století. Je však třeba si uvědomit, že důležitým aspektem robotického 3D tisku dílců je potřeba vysoce kvalifikovaných pracovníků ve stavební výrobě.

Integrace počítačového návrhu do konstrukce

Lávka Striatius integruje navrhování, výrobu a výstavbu a nově tak definuje běžné mezioborové vztahy. Výrobu dílců umožnila přesně definovaná výměna dat mezi různými softwarovými nástroji specifickými pro danou oblast. Takto zajištěný sdílený přístup k vývoji byl usnadněn použitím programu Compas, open source výpočetního prostředí vytvořeného pro spolupráci a výzkum v oboru stavebnictví a architektury, který umožnil plynulou interakci mezi klíčovými aktéry projektu, pracujícími společně v pěti různých zemích v rámci velmi napjatého harmonogramu a rozpočtu v době, kdy nebylo možné cestovat.

Disruptivní výhled

Projekt Striatius nabízí možnost, jak stavět ve větším objemu s menším množstvím prostředků. Na základě stejných konstrukčních principů a podobného plně integrovaného výpočetního přístupu od návrhu k výrobě byl vytvořen základ nevyztužených betonových stropních panelů fungujících na principu žebrové klenby. Tyto panely vyvíjené výzkumnou skupinou Block Research Group na ETH v Curychu ve spolupráci se společností Holcim mají být alternativou ke standardním stropním deskám.

Ve srovnání s typickými železobetonovými stropními panely využívá tento nový stropní systém pouze 30% množství betonu a jen 10% množství oceli. Redukované napětí ve funikulární konstrukci rovněž umožňuje použití nízkoemisního betonu, který obsahuje vysoké procento recyklovaného stavebního odpadu. Prefabrikovaný, na sucho montovaný, a tedy plně demontovatelný a znovu použitelný stropní systém je po

6 Osazování dílců na podpěrnou konstrukci
7 Průřez dílcem sloužícím jako zábradlí
8 Osazení závěrečného klenáku
9 Sestavená lávka uložená přes ocelové patní prvky na železobetonové základové bloky
10 Finální podoba lávky se schodištvými stupni
11 Spodní líc konstrukce lávky s detailem jednotlivých vrstev

6 Installing elements on the supporting structure
7 Cross-section through the handrail element
8 Installation of the final voussoir
9 Assembled bridge installed over steel footing elements on reinforced concrete foundation blocks
10 Final form of the footbridge with stair treads
11 Bottom view of the bridge with the detail of the individual layers



10



11

skončení životnosti snadno a čistě recyklovatelný.

Vzhledem k tomu, že se odhaduje, že v příštích 30 letech bude na celém světě postaveno 300 miliard m² podlahové plochy a stropy tvoří více než 40% hmotnosti většiny výškových budov (10+ podlaží), zavedení principů demonstrováných projektem Striatius by způsobilo disruptivní změnu stavebnictví – zcela by změnilo způsob navrhování.

Acknowledgement
ETHZ BRG, Zaha Hadid Architects CODE, incremental3d, Holcim

Z podkladů uvedených na webu striatusbridge.com přeložil Ing. Michal Kovářik z Katedry technologie staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze.

Připravila Ing. Lucie Šimečková, redakce.

Zdroje:

[1] Striatius: 3D Concrete Printed Masonry [online]. Dostupné z: striatusbridge.com

Tab. 1 Technická specifikace

Tab. 1 Technical specification

objemová hmotnost betonu pro 3D tisk	~2 350 kg/m ³	
počet bloků	53	
tloušťka bloků	50 až 350 mm	
hmotnost jednoho bloku	217 až 783 kg	
délka 3D tištěné vrstvy (jeden blok)	602 až 1 754 m	
celková délka 3D tištěné vrstvy	58 km	
celková doba tisku všech bloků	84 h	
výška 3D tištěné vrstvy	4,46 až 11,98 mm	
šířka 3D tištěné vrstvy	pochozí bloky	25 až 50 mm
	bloky pro zábradlí	40 mm