

SOUČASNÉ MOŽNOSTI BEDNĚNÍ

Martin Salák, *

Department of Concrete and Masonry Structures, Faculty of Civil Engineering,
Czech Technical University in Prague, Thakurova 7/2077, 166 29 Prague 6, Czech Republic.
martin.salak@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Brání cena bednění výstavbě tvarově zajímavých řešení? Zvyšuje zbytečně cenu? Článek popisuje současný výzkum týkající se bednění složitých tvarů betonových konstrukcí. Zabývá se několika druhy bednění: subtraktivní, vyrobeno obráběním. Aditivním bedněním vyrobeným 3D tiskem. Různými druhy adaptivního bednění a na závěr klade důraz na poddajné bednění, především pletené. To dokáže strojově vytvořit složitý, nerovinný tvar a tím šetřit materiál, koordinaci na stavbě i přírodu. Efektivní řešení by mohlo otevřít cestu šetrnější výstavbě.

KLÍČOVÁ SLOVA

bednění • beton • forma • složitá geometrie

ABSTRACT

Are contemporary formwork solutions something that is holding architecture back? Does it make double curvature in architecture too costly? The article describes state of the art on formwork solutions for complex concrete structures. It divides formwork into groups: subtractive formwork made by cutting, additive formwork made by printing, adaptable formwork that can change its shape, and flexible formwork made of a stretched membrane. The last option is described to be most promising as newly developed knitted formwork can be created in a way that saves time, money, and resources.

KEYWORDS

Formwork • Concrete • Mould • Complex Geometry

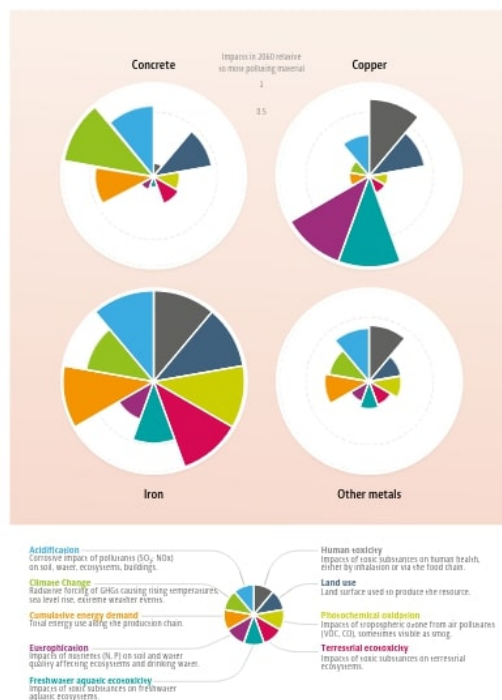
1. ÚVOD

Zvyšující se množství skleníkových plynů v atmosféře vypuštěných člověkem způsobuje globální oteplování (Harrington 2020), jehož účinky mohou být nedozírné. Zároveň produkce a celková ekonomika nejsou na ústupu, předpokládá se, že se do roku 2060 zčtyřnásobí a spotřeba materiálů se zdvojnásobí. (OECD. 2019) V měření vychází, že právě výroba betonu se do značné míry podílí na globálním oteplování (obrázek 1). Jenom těžko lze beton nahradit šetrnější možností obdobných kvalit. Lze ovšem vytvořit tak tvarovanou konstrukci, aby stačilo minimální množství materiálu. Pokud vycházíme z toho, že objem prací v následujících čtyřiceti letech bude odpovídat stavbě jednoho New Yorku každý měsíc, tak i drobná optimalizace může mít obrovský efekt. (Gates & Melinda 2021)

Nejdůležitějším aspektem při optimalizaci konstrukce je obvykle cena. Na obrázku 2 je znázorněn příklad konstrukce, která

* Supervisor: prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D., D.Eng.

Figure 12. Global environmental impacts differ significantly across materials



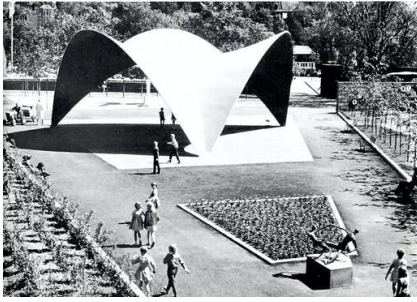
OECD HIGHLIGHTS Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic Drivers and Environmental Consequences 19

Obr. 1: Zátěž na životní prostředí dle materiálu

efektivně zastřešuje daný prostor, cena takové konstrukce je však vysoká, hlavně kvůli velké pracnosti bednění a jeho materiálu. Aby bylo možné takovou konstrukci postavit běžnými metodami, bylo by za potřebí velmi složité bednění. To by bylo použito pravděpodobně jen jednou, a tím by radikálně snížilo jak ekonomickou, tak hlavně ekologickou stránku. Vhodná geometrie tedy dovoluje stavět s méně materiálem, případně takovým materiálem, který nemusí dosahovat takových vlastností jako současné materiály. Avšak nevýhodou složitých tvarů jsou velké náklady na stavbu takové konstrukce kvůli složitému bednění.

2. BEDNĚNÍ

Ačkoliv moderní metody postupují skoro všemi odvětvími naší společnosti, stavebnictví se částečně vyhýbají. Budovy stavíme mnohem modernější a větší, ale samotný způsob výstavby se příliš



Obr. 2: *Oceánárium, Félix Candela*

nezměnil. Bednění je důležitým faktorem, který ovlivňuje cenu a tím pádem i design nových staveb. Mnohé alternativní způsoby bednění betonových konstrukcí jsou zkoumány a vyvíjeny.

2.1. Obráběcí technologie

Obráběcí technologie se často využívají pro klasické bednění. Takové bednění pro ojedinělou konstrukci může být vyrobeno z dřevěných desek nebo z polystyrenu. Toto řešení však vyžaduje rozsáhlé podepření a mnoho práce. Mezi progresivnější technologie tohoto rázu můžeme zařadit například výrobu bednění ze zmrazeného písku. (Gericke et al. 2016) Autoři této metody se inspirovali staršími technikami, vhodný příklad takové techniky je Teshima Art Museum v Japonsku (obrázek 3). Tato budova byla postavena nahnutím zeminy do požadovaného tvaru kopule, která sloužila jako bednění. Po zhotovení skořepiny byla zemina zevnitř vytěžena. Takto použitá zemina není nijak znehodnocena a dala by se použít při další výstavbě. (Adriaenssens et al. 2014)



Obr. 3: *Teshima Art Museum v Japonsku*



Obr. 4: *Zmražený písek, vytvarován pomocí CNC obráběcího stroje*

Autoři bednění ze zmrazeného písku hledali takové bednění, které by neomezovalo žádným způsobem design betonového dílce

a bylo by z materiálu, který by se neznehodnotil při plnění svojí funkce. Využili jemný písek jako pevný materiál a aby dosáhli vyšší přesnosti, písek zmrazili a vytvarovali pomocí CNC obráběcího stroje. Vytvořili oboustranné bednění, které vyplnili betonem. Pohled do jedné části bednění je vidět na obrázku 4. Existují podobná řešení, například použití speciální betonové směsi společně s bedněním z čistého ledu. (Sitnikov 2019)

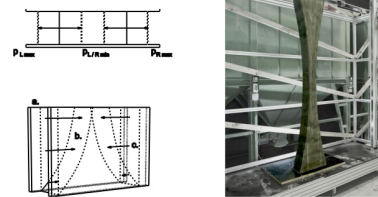
2.2. Adaptivní bednění

Adaptivní bednění je takové, které dokáže přizpůsobit svůj tvar. Tím pádem lze vytvořit z jednoho bednění více různých prvků. Příklad takového bednění může být adaptivní bednění od firmy Adapa. Firma takové bednění aplikuje komerčně ve velkém měřítku. (Adapa 2020) Taková metoda efektivně řeší znovuužívání jedné formy, avšak je omezena jak geometrií, tak velikostí dané formy. (viz obr. 5)



Obr. 5: *Flexibilní bednění s označením D300 od firmy Adapa*

Vytvoření většího prvku, než je velikost bednění, dovoluje metoda Smart Dynamic Casting (SDC). (Lloret Fritschí et al. 2017) Jde o roboticky ovládané bednění, které se posouvá po tuhoucím prvku a mění svůj tvar. Na obrázku číslo 6 a 7 je znázorněno příkladné použití bednění a vytvořený sloup, který má po výšce se měnící průřez. Takovéto bednění je vhodné především pro líniové prvky, ale probíhá výzkum i na tenkých lomenicových konstrukcích. (Szabo et al. 2018)



Obr. 6: *Metoda Smart Dynamic Casting*

2.3. Aditivní technologie

3D tisk je dnes běžně používaná metoda nejen pro prototypování produktů. Ve stavebnictví je mnoho přístupů, jak ho využít. Může například sloužit pro vytvoření ztraceného bednění. Na obrázku 8 vlevo je vidět realizace, kde byl sloup zajímavých tvarů vytvořen tak, že byla vytisknuta pouze tenká venkovní vrstva sloupu. Ta sloužila jako ztracené bednění pro vláknobeton. (Gaudillière et al. 2019) Takováto realizace ukazuje výhody 3D tisku, na rozdíl od ostatních metod je možné vytvořit vnitřní otvory a komplexnější tvary. Netisknou se jen sloupy, na obrázku 8 vpravo je vidět 3D



Obr. 7: Metoda Smart Dynamic Casting

vytištěný most. Byl postaven v Šanghaji v roce 2019 a jeho rozpětí je 14,5 metrů. (Ravenscroft 2021)



Obr. 8: 3D tištěný sloup v Aix-en-Provence, 2019

3D tisk se používá i pro tisk jiných typů bednění. Speciální způsob tištění z jemného písku, označovaný také jako binder jetting (3D formwork for lightweight architecture 2021), byl například použit pro výrobu komplexně tvarovaného bednění pro experimentální konstrukci (obrázek 9). Vytváření takového bednění je relativně rychlé a dovoluje vytvářet velmi složité tvary bez potřeby lidské práce. Bednění je ale těžké, ne plně recyklovatelné, potřebuje dodatečné bednicí prvky a svou tíhou zvyšuje nároky na případné lešení. (Meibodi et al. 2018) Pro snížení odpadu lze přistoupit k užívání alternativních materiálů. Například firma FreeFab používá rozpustitelný vosk v kombinaci 3D tisku a CNC obrábění. (frefab.com 2021) Případně lze zkombinovat recyklovatelný materiál s extrémně tenkým 3D tiskem (Jipa et al. 2018) výsledek takové metody je znázorněn na obrázku 10.



Obr. 9: 3D tištěné bednění technologií binder jetting

S alternativním přístupem k 3D tisku pracuje společnost Branch Technology. Ta netiskne v klasických vrstvách, ale tiskne do prostoru. Vytvoří 3D objekt skoro libovolného tvaru, ten je pak možné využít jako ztracené bednění – speciální směs se vtlačí mezi 3D tištěnou výztuž a ta ji drží uvnitř (obrázek 11). (branch.technology 2021) Podobný proces byl vyzkoušen i s roboticky sestavenou ocelovou výztuží. (Hack et al. 2017)



Obr. 10: Betonový prototyp tištěný do 0,1 mm tenkého bednění



Obr. 11: 3D tištěná matice jako ztracené bednění i výztuž

2.4. Měkké bednění

Měkké bednění využívá předepjatých membrán a sítí, aby drželo tvar pro lití betonu. Ač není užití látkového nebo obdobného bednění žádná novinka, nikdy se významně nerozšířilo jeho použití. Na obrázku 12 lze vidět pneumatikové bednění (Binishells.com 2021), kde tvar bednění drží tlak v membráně. Na obrázku 13 je znázorněno nedávné použití látkového bednění podepíraného sítí z ocelových kabelů vypnutých do rámu. Toto bednění bylo po postavení pečlivě sledováno a upravováno tak, aby po zatížení čerstvou směsí dosáhlo požadovaného tvaru. (Echenagucia et al. 2019)



Obr. 12: Pneumatikové bednění firmy Bibishell

Tyto konstrukce jsou velmi efektivní, pokud je cílem postavit



Obr. 13: Projekt Nest HiLo, ETH Curych

podobné tvary. Dokážou plně nahradit těžké dřevěné bednění na velké rozpětí. Nesou s sebou však stále vysokou pracnost a náročnou koordinaci na stavbě. Tomuto problému se pokouší předjet Mariana Popescu (Popescu 2019) tým, že vytváří komplexní pletené bednění. To má rovnou hotový 3D tvar konstrukce v jednom kuse a zároveň obsahuje kanálky pro kabeláž či jinou výztuhu. Připravený 3D tvar, který se jen roztáhne do požadovaného tvaru, značně usnadňuje koordinaci na stavbě. Aby se zajistilo, že se finální tvar poddajného, pleteného bednění nezmění pod náporom betonové směsi, je nejdříve bednění ve finálním tvaru přestříkáno tenkou vrstvou betonu. Na obrázcích můžete vidět již hotové zkušební objekty. Složitě pletené bednění lze udělat strojově na profesionálních strojích řízených počítači ve velmi krátkém čase.



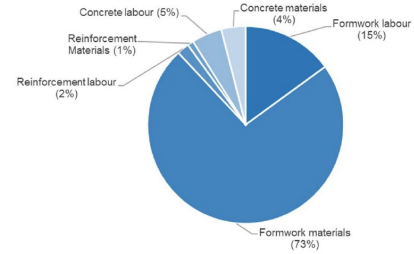
Obr. 14: Betonové prvky vytvořené pomocí pletného bednění

3. DISKUZE

Geometrie konstrukcí, jež jsou navrženy, aby odolávaly přesně jednomu návrhovému zatížení, mohou být náchylné na jiné zatížení. Tím můžou být speciální stavy (výbuch, náraz), bodová zatížení či posuny podpor, to lze však částečně řešit. Klimatická náročnost stavebního průmyslu jistě nebude vyřešena výstavbou skočepin, ale vytváření precizních technologií může značně pomoci nejen ekologii, ale dát i volnou ruku architektům.

4. ZÁVĚR

Současná cena a nedostatky bednění brání výstavbě krásných a efektivních konstrukcí. U složitějších konstrukcí prohnutých ve dvou směrech dosahuje cena bednění ke $\frac{3}{4}$ z celkové ceny betonového prvku (obrázek 15, počítáno pro bednění z polystyrenu strojově obráběného do požadovaného tvaru) (Schipper & Grünewald 2014). Je tedy důležité najít řešení pro dnešní dobu, které by cenu a vliv bednění na životní prostředí eliminovalo. Nejen, že by šlo stavět takové konstrukce, jaké bychom chtěli, ale zároveň to dovolí ušetřit na materiálu samotné stavby. Budeme-li pečlivě stavět tak, abychom maximálně využili potenciál geometrie staveb, můžeme snížit množství materiálu nebo zvolit horší materiál. To by mohlo dovolit upustit od betonu úplně a třeba se bude v budoucnosti stavět z biomasy zpevněné podhoubím. (*The Living New York* 2021)



Obr. 15: Rozložení nákladů na betonový prvek komplexního tvaru



Obr. 16: Umělecká expozice postavená z cihel z biomasy zpevněné podhoubím

References

- 3D formwork for lightweight architecture (2021).
URL: <https://www.voxeljet.com/3d-printing-solution/architectur-and-construction/>
- Adapa (2020), 'Adaptive mould d300 - adapa - adaptive moulds'.
URL: <https://adapa.dk/portfolio-item/adaptive-mould-d300-2/>
- Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D. & Williams, C. (2014), *Shell structures for architecture: form finding and optimization*, Routledge.
- Binishells.com (2021).
URL: [Binishells.com](https://www.binishells.com)
- branch.technology (2021).
URL: <https://www.branch.technology/>
- Echenagucia, T. M., Pigram, D., Liew, A., Van Mele, T. & Block, P. (2019), A cable-net and fabric formwork system for the construction of concrete shells: design, fabrication and construction of a full scale prototype, in 'Structures', Vol. 18, Elsevier, pp. 72–82.
- frefab.com (2021).
URL: <https://www.frefab.com/>
- Gates, B. & Melinda (2021), 'We didn't see this coming'.
URL: https://www.gatesnotes.com/2019-Annual-Letter?WT.mc_id=0212201905EAL2019BG-YTamp;WT.src=BGYT
- Gaudillière, N., Duballet, R., Bouyssou, C., Mallet, A., Roux, P., Zakeri, M. & Dirrenberger, J. (2019), Building applications using lost formworks obtained through large-scale additive manufacturing of ultra-high-performance concrete, in '3D Concrete Printing Technology', Elsevier, pp. 37–58.
- Gericke, O., Kovaleva, D., Haase, W. & Sobek, W. (2016), Fabrication of concrete parts using a frozen sand formwork, in 'Pro-

- ceedings of IASS Annual Symposia', Vol. 2016, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), pp. 1–10.
- Hack, N., Wangler, T., Mata-Falcón, J., Dörfler, K., Kumar, N., Walzer, A. N., Graser, K., Reiter, L., Richner, H., Buchli, J. et al. (2017), Mesh mould: an on site, robotically fabricated, functional formwork, *in* 'Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC)', Vol. 19, pp. 1–10.
- Harrington, S. (2020), 'Causes of global warming: How scientists know that humans are responsible " yale climate connections'.
URL: <https://yaleclimateconnections.org/2020/03/causes-of-global-warming/>
- Jipa, A., Bernhard, M. & Dillenburger, B. (2018), Submillimeter formwork: 3d-printed plastic formwork for concrete elements, *in* 'TxA 78th Annual Conference and Design Expo (TxA 2017)'.
- Lloret Fritschi, E., Reiter, L., Wangler, T., Gramazio, F., Kohler, M. & Flatt, R. J. (2017), 'Smart dynamic casting: slipforming with flexible formwork-inline measurement and control', *HPC/CIC Tromsø 2017* pp. Paper-no.
- Meibodi, M. A., Jipa, A., Giesecke, R., Shammass, D., Bernhard, M., Leschok, M., Graser, K. & Dillenburger, B. (2018), 'Smart slab. computational design and digital fabrication of a lightweight concrete slab'.
- OECD. (2019), *Global Material Resources Outlook to 2060 Economic Drivers and Environmental Consequences*, OECD Publishing.
- Popescu, M. A. (2019), KnitCrete: Stay-in-place knitted formworks for complex concrete structures, PhD thesis, ETH Zurich.
- Ravenscroft, T. (2021), 'The world's largest concrete 3d printed pedestrian bridge'.
URL: <https://news.tsinghua.edu.cn/en/info/1002/7941.htm>
- Schipper, H. & Grünewald, S. (2014), Efficient material use through smart flexible formwork method, *in* 'ECO-Crete: International Symposium on Environmentally Friendly Concrete, Reykjavik, Iceland, 13-15 August 2014'.
- Sitnikov, V. (2019), Ice formwork for high-performance concrete: a model of lean production for prefabricated concrete industry, *in* 'Structures', Vol. 18, Elsevier, pp. 109–116.
- Szabo, A., Reiter, L., Lloret-Fritschi, E., Gramazio, F., Kohler, M. & Flatt, R. J. (2018), Adapting smart dynamic casting to thin folded geometries, *in* 'RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication', Springer, pp. 81–93.
- The Living New York* (2021).
URL: <http://www.thelivingnewyork.com/>