



1

POROVNÁNÍ KONSTRUKCE NAVRŽENÉ S VYZTUŽENÍM BĚŽNOU BETONÁŘSKOU VÝZTUŽÍ A POMOCÍ DODATEČNĚ PŘEDPÍANÉ VÝZTUŽE Z HLEDISKA UDRŽITELNÉHO ROZVOJE

■ A PROJECT-BASED COMPARISON BETWEEN REINFORCED AND POST-TENSIONED STRUCTURES FROM A SUSTAINABILITY PERSPECTIVE

Carol Hayek, Saleem Kalil

Článek předkládá porovnání železobetonové desky vyztužené běžnou betonářskou výztuží a dodatečně předpínanou výztuží z pohledu udržitelného rozvoje. Studie byla zpracována pro realizovaný projekt Strata SE1, vysokopodlažní budovy v Londýně navržené s důrazem na udržitelnost včetně unikátních větrných turbín. V článku je popsán praktický přístup k efektivnímu navrhování a jeho promítnutí do základních pravidel udržitelnosti se zaměřením na projektovou a realizační fázi. Pro každé řešení je vyčíslen dopad na životní prostředí prostřednictvím spotřebované energie a produkce uhlíku, pomocí zvoleného třídění jsou odhadnuty společenské dopady a z nákladů je vyčíslen ekonomický dopad. Do hodnocení je zahrnuta i časová náročnost jednotlivých technologií výstavby a jejich vliv na prostředí. Výsledky

ukazují, že dodatečně předpínaná konstrukce s rozpětím 9,5 m umožní ušetřit 720 t CO₂ jen na materiálu stropních desek. ■ This paper presents a comparison between reinforced and post-tensioned concrete slab options with a focus on sustainability. The study is done on an actual project, Strata SE1, a high-rise building in London designed to promote sustainability with its efficient design and unique wind turbines. The paper gives a practical approach on the importance of structural design efficiency and how it translates to the sustainability triple bottom line concentrating on the design and construction stages. For each option, the environmental impact is measured through energy and carbon emission; the social impact is assessed using a ranking scheme; and the cost is given to evaluate the economic impact. The construction time and its impact on the environment are also discussed

along with the measures that can speed up construction. The results show the post-tensioned solution with spans up to 9.5 m allowed savings of 720 t of CO₂ from slab material alone.

Návrh konstrukce je vždy výzvou a nalezení jejího optimálního řešení se stává cílem úsilí inženýrů. Zatímco dříve byl důraz v rozhodovacím procesu kladen zejména na způsob realizace, čas a náklady, dnes je přidán ještě nový faktor – udržitelnost. Původně byla pozornost primárně zaměřena na spotřebu energie a společenské dopady stavby během jejího budování, nyní se ukazuje potřeba zaměřit se už v počátečních stádiích na životní cyklus navrhovaného objektu a jeho dopady do návrhu a konstrukčních fází, proto-



Obr. 1 Budova Strata SE1 v Londýně ■
Fig. 1 Strata SE1, London landscape

Obr. 2 Omezený prostor na staveništi objektu ■ Fig. 2 Restricted access space on Strata building site

Obr. 3 Výstavba objektu a), b) ■
Fig. 3 Strata under construction, a), b)



Tab. 1 Množství materiálů na 1 m² desky^{b)} ■ Tab. 1 Slab material quantity

Konstrukční prvek	Použitá technologie		
	PT	RC1	RC2
Průměrná plocha desky [m ²]	630	630	630
Celková plocha [m ²]	25 202	25 202	25 202
Tloušťka desky [mm]	200	260	210 ^{a)}
Vyztužení [kg/m ²]	11,6	21,6	19,5
Předpínací kabely [kg/m ²]	3,5	0	0
Kanáčky (1,41 m/m ²) [kg/m ²]	0,6	0	0
Kotvy (0,1 pc/m ²) [kg/m ²]	0,4	0	0

a) Hodnota ekvivalentní tloušťky desky je určena z tloušťky vlastní desky 180 mm a 600 mm vysokého ztužujícího nosníku po obvodu desky u fasády k omezení průhybů desky

b) Plocha desky a spotřeba materiálů jsou zprůměrovány ze čtyřiceti typických podlaží budovy. Předpjatá střešní konstrukce je z analýzy vyjmuta, protože její dopad na spotřebu materiálů by byl neadekvátní vzhledem k náročné podpůrné konstrukci větrných turbín.

že to může mít významný vliv na životní prostředí a obyvatelstvo v daném místě. Předkládaná studie ukazuje možné přístupy k rozhodovacímu procesu ve skutečném případě oceňování efektivnosti konstrukce z hlediska výběru materiálu, jeho množství, času výstavby a převedení těchto položek do ukazatelů dopadů na prostředí a společnost.

Srovnání technologií dodatečně předpjatého a klasicky vyztuženého betonu na stropní deskové konstrukci je prezentováno z pohledu udržitelnosti prostředí, sociálního a ekonomického. Budova Strata SE1 (obr. 1), na níž je srovnání ukázáno, stojí v centru Londýna a její železobetonová nosná konstrukce byla dokončena v roce 2009. Jedná se o rezidenční budovu vysokou 147,9 m

se čtyřiceti jednou dodatečně předpínanou stropní deskou s běžnou konstrukcí podlahy a s podpůrnou pětipodlažní konstrukcí tří větrných turbín, první svého druhu na světě, na vrcholu stavby. Turbíny o průměru 9 m a celkovém výkonu 54 kW mají zajišťovat výrobu části elektrické energie potřebné k provozu budovy.

NÁVRH STROPNÍ DESKY

Hned na začátku bylo rozhodnuto o použití monolitického betonu. Zaoblený půdorysný tvar desky je při použití betonu vytvořen jednoduše a jeho použití má i akustické a teplotní přednosti. Proto byl ve srovnávací analýze zvažován pouze monolitický beton v následujících technologických variantách:

- PT – plochá deska dodatečně předpjatá (obr. 5),
- RC1 – plochá deska s klasickou vyztuží,
- RC2 – deska s průvlaky.

Všechny tři typy desek byly navrženy za stejných předpokladů a podle požadavků britských norem na mezní stav použitelnosti (tolerance průhybu +10 mm podél obvodu všech stropních desek) a mezní stav únosnosti. Množství materiálů potřebných na 1 m² pro jednotlivé zvažované technologie je uvedeno v tab. 1.

ČASOVÉ NÁROKY VÝSTAVBY JEDNOTLIVÝCH TECHNOLOGIÍ

Protože objekt byl stavěn v centrální oblasti Londýna s velkým provozem

(obr. 2 a 3), byly časové požadavky na jeho výstavbu velmi náročné. Proto bylo důležité vybrat vhodný konstrukční systém, který by výstavbu urychlil.

Volba nosné konstrukce

Pro jednotlivé uvažované technologie byla použita pro určení požadované doby na cyklus výstavby jednoho podlaží stejná kritéria. PT, RC1 a RC2 vyžadovaly 5, 6,5 a 8,5 dnů. Technologie RC1 vyžadovala celkem o 60 pracovních dní více než dodatečně předpínaná deska (PT) a technologie desky s průvlaky dokonce o 140 dnů více než PT. Čas ušetřený při užití dodatečně předpínané technologie byl získán menším celkovým objemem zpracovávaného materiálu, nižší pracností při předpínání a dřívějším možným odbedněním konstrukcí. Skutečná dosažená průměrná délka cyklu jednoho podlaží byla při užití PT technologie 4,5 dne.

Obr. 4 a) Spotřebovaná energie, b) vyprodukovaný CO₂ ■ Fig. 4 Embodied energy and carbon

Obr. 5 Ukládání výztuže a kanálků pro předpínací výztuž na bednění stropní desky ■ Fig. 5 Slab layout

Obr. 6 Montáž turbín na vrcholu konstrukce ■ Fig. 6 Strata under construction

Obr. 7 a) Dokončená budova, b) detail turbín ■ Fig. 7 a) Strata completed, b) turbines close up

Tab. 2 Poměrný dopad na prostředí ■ Tab. 2 Environmental unit rates

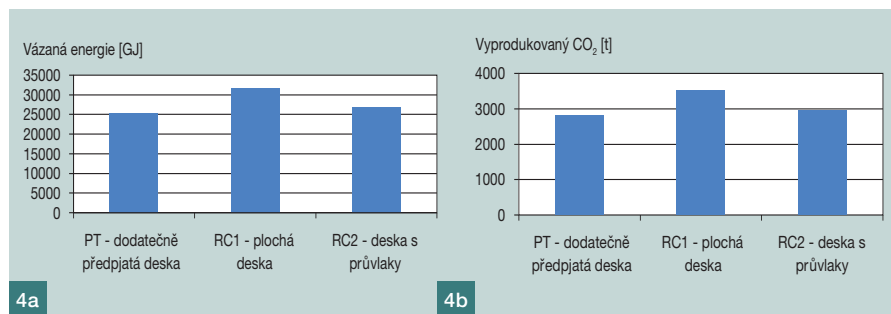
Typ materiálu	Vložená energie [MJ/kg]	Uhlíková stopa [kg CO ₂ /kg]
Beton C32/40 (1:1,5:3)	1,11	0,159
Výztuž (pruty a tyče)	24,6	1,71
Předpínací kabely (dráty)	36	2,83
Kanálky (galvanizovaný plech)	39	2,82
Kotvy (ocel)	24,4	1,77

Tab. 3 Porovnání dopadů na prostředí ■ Tab. 3 Environmental performance

Parametry	RC1 vs. PT	RC2 vs. PT
Spotřebovaná energie [GJ]	6 394 + 25%	1 613 + 6%
Produkovaný CO ₂ [t]	722 + 26%	132 + 5%

Tab. 4 Zatřídění konstrukčních variant ve vztahu ke společenským faktorům ■ Tab. 4 Ranking of structural options on social factors

Společenský faktor		PT	RC1	RC2
Během výstavby	snížené obtěžování	1	3	2
	rychlejší konstrukční cykly	1	2	3
Během užívání	vnitřní podmínky	1	1	2
	vnější dopady	1	2	3
Celkový počet bodů (nižší znamená lepší)		4	8	10



Řízení výstavby a zpracování detailů

Efektivní řízení výstavby má velký vliv na plynulost prací a konečné termíny. Dosažené úspory se jen obtížně kvantifikují, ale projekt byl dokončen dvanact týdnů před stanoveným termínem. Z hlediska detailů je možno konstatovat, že každé byt i malé vylepšení, které je mnohokrát opakované, se načítá. Je možno odhadnout, že jeden detail v rozvržení PT kabelů mohl vcelku ušetřit až jeden a půl pracovního týdne.

DOPAD NA PROSTŘEDÍ

Dopady na prostředí jsou obvykle vyjadřovány v poměrech spotřebované (uložené) energie a uhlíkovou stopou (tab. 2). Zde byly použity údaje ze zprávy ICE (Hammond & Jones, 2008), která je založena na LCI (life cycle inventory – soupis za životní cyklus) „od kólečky do hrobu“ a 40% obsahu recyklované oceli.

Odkaz na ICE je použit vzhledem k jejich rozsáhlé databázi údajů vycházejících z trhu v VB. Přístup LCI lze považovat za vyhovující vzhledem k malému množství a rozptýlu údajů o celém LCA (life cycle assessment – vyhodnocení životního cyklu) budov.

Pro důslednost databáze jsou zde uváděny dráty a galvanizované plechy kanálků užívané v dodatečně předpi-

nané technologii v hodnotách původních materiálů. Oba prvky mohou být až z 95 % (konzervativní odhad) recyklovány.

Kumulovaný dopad sledovaných betonářských technologií na prostředí je uveden na obr. 4.

Výsledky RC1 ukazují o 720 t vyšší produkci CO₂ oproti variantě PT, což odpovídá zvýšení produkce uhlíku o 26%. Podobný nárůst je patrný i ve spotřebě energie. V porovnání PT a RC2 se hodnoty spotřebované energie a uvolněného uhlíku zvyšují pro technologii RC2 zhruba asi o 5%, RC2 potřebuje pracnější bednění, zkušenější řemeslníky a vzhledem k podpůrným nosníkům je půdorys podlaží pod stropní deskou méně flexibilní.

Výsledky mohou být extrapolovány k vyhodnocení životního cyklu (LCA) betonových desek. Lze očekávat, že doprava materiálů, realizace konstrukčního prvku a demoliční fáze navýší výsledky LCI o 10 až 20%. Protože všechny tři vyhodnocované typy technologií stropních konstrukcí používají monolitický beton, lze počítat se stejným navýšením hodnot pro všechny technologie.

Je také třeba zmínit, že na vrub samotného betonu připadá 55% spotřebované energie a asi 70% uvolněného uhlíku při realizaci konstrukce.



7a 7b





8

POROVNÁNÍ SPOLEČENSKÝCH DOPADŮ

Zatímco jednotlivé společenské dopady jsou nad rámec této studie, pro posouzení dopadů použití jednotlivých technologií na snížení společenského komfortu se používají různá třídění (tab. 4).

Během výstavby je okolí staveniště vystaveno různým projevům nepohodlí. Projekty vyžadující zpracování menšího množství materiálu logicky méně ruší nepřímé účastníky stavby produkcí menšího znečištění prachem i hlukem, nákladní dopravou, dopravními omezeními ad.

I rychlejší příp. technologicky kratší konstrukční cykly přispívají ke snižování rozsahu obtěžování přilehlého okolí stavbou.

PT technologie ušetřila dotčené komunitě tři měsíce stavebního času a s ním spojeného nepohodlí běžného života.

Během fáze užívání závisí pohoda uživatelů na podmínkách ve vnitřních prostorách: beton má zřejmé výhody z hlediska světelného, akustického a teplotního komfortu (ve všech sledovaných variantách konstrukcí stropů), ploché podhledy přispívají k variabilitě vnitřního uspořádání a zvyšují pohledový komfort, zatímco varianta s nos-

níky omezuje vnitřní členění a pohledový komfort.

Tloušťka stropních desek má vliv na celkové vnější rozměry konstrukce. Z tab. 1 je zřejmé, že varianta RC1 je o 2,4 m vyšší než varianta PT a varianta RC2 dokonce o 16 m. Celková výška budovy určuje rozsah zastíněné plochy na okolních pozemcích, množství obkladového materiálu, vyšší energetické nároky na provoz budovy a vyšší emise uhlíku při výrobě většího množství použitých materiálů.

Pro zhodnocení celkových společenských dopadů jednotlivých konstrukčních variant jsou tyto řazeny v tab. 4 sestupně z hlediska jejich efektivnosti. Váhové schéma by mohlo být použito pro posouzení důležitosti faktorů ovlivňujících každou jednotlivou položku. Z tab. 4 je zřejmé, že z hledisek sledovaných v analýze je ve všech kritériích nejlepší varianta PT. Ohodnocení bylo založeno na posouzení množství použitého materiálu, jeho typu, potřebné době výstavby a architektonických charakteristikách.

CENOVÉ DOPADY

Byl analyzován dopad jednotlivých variant konstrukce stropů budovy na její cenu. Na základě jednotkových cen platných v letech 2008 až 2009 ve Vel-

Obr. 8 Noční boční pohled ■ Fig. 8 Strata reverse angle night view

Literatura:

- [1] Hammond G., Jones C.: Inventory of Carbon and Energy (ICE), University of Bath, 2008
- [2] Gangolells M., Casals M., Gasso S.: A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. *Building and Environment* 44, 2009, pp. 558–571
- [3] Guggemos A., Horvath A.: Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings, *Journal of Infrastructure Systems – Vol. 11, No. 2*, 2005, pp. 93–101
- [4] Kawai K., Sugiyama T., Kobayashi K., Sano S.: Inventory Data and Case Studies for Environmental Performance Evaluation of Concrete Structure Construction, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(3), 2005, pp. 435–456
- [5] 2010 Concrete society awards, Overall Winner – Strata SE1 London, reprint from Concrete, November 2010, The Concrete Society
- [6] Hayek C., Kalil S.: A project-based comparison between reinforced and post-tensioned structures from a sustainability perspective, Proc. of fib Symposium PRAGUE 2011

ké Británii vycházejí jednotlivé varianty, PT, RC1 a RC2, následovně 74, 77 a 84 GBP/m². Celkové ceny zahrnují ceny všech materiálů a jejich uložení do konstrukce, betonu, oceli, předpínacích kabelů, kabelových kanálků, kotev i bednění.

Další, nepřímé, snížení ceny ve variantě PT vychází z menšího průřezu sloupů, a tím i základů, vzhledem k nižší celkové vlastní váze konstrukce, z menší spotřeby obkladového materiálu vzhledem k nižší celkové výšce konstrukce a nižší ceně za výstavbu vzhledem ke kratší fázi výstavby. Při porovnávání cenových dopadů je vhodné použít holistický přístup, aby bylo možné zohlednit jak přímé, tak i nepřímé náklady.

ZÁVĚR

Použitý stavební materiál, způsob výstavby a provozní možnosti dokončené budovy, to vše mnoha různými způsoby ovlivňuje kvalitu života. Všichni zúčastnění v procesu výstavby i majitelé a koneční uživatelé konstrukce se pokoušejí o nalezení rovnováhy mezi udržením kvalitního prostředí zahrnujícího prostor pro život a jeho běžné činnosti a výstavbou cenově efektivních a bezpečných konstrukcí, v nichž nebo mezi nimi život probíhá. Studie ukazuje, že snaha o dosažení lepšího životního prostředí nevyžaduje nutně zvyšovat náklady potřebné pro zajištění společenského blaha a prosperity nebo náklady na stavby a případně prodloužovat dobu jejich výstavby.

Spotřebovaná energie a vyprodukovaný uhlík jsou vypočítány a společenské dopady jsou kvantifikovány pomocí váhového systému pro jednotlivé kategorie. Studie zpracovaná pro budovu Strata SE1 s rozpětím stropů 9,5 m ukazuje, že na dodatečně předpínanou konstrukci bylo potřeba méně materiálu, čímž se ušetřilo ve spotřebě energie 6 400 GJ a vyprodukovalo se o 720 t méně uhlíku. Rychlejší stavební proces udržel všechny výhody použití betonu za příznivějších společenských dopadů během výstavby konstrukce i v průběhu jejího užívání. Vyčíslené přínosy však nejsou spojeny s navyšováním investiční ceny a projekt byl realizován v rámci původního rozpočtu.

Jsou-li dopady na prostředí a společenské dopady posuzovány v předprojektové fázi, tedy v době, kdy jsou činěna rozhodnutí o použitém materiálu a typu konstrukce, může vybra-

na optimální konstrukční varianta významně přispět k celkové prosperitě a udržitelnému rozvoji dané oblasti.

Údaje o konstrukci [5]

Majitel	Brookfield Europe
Architekt	BFLS
Projekt konstrukce	WSP Cantor Seinuk
Dodavatel	Brookfield Construction
Dodatečné předpětí	CCL
Výstavba betonové nosné konstrukce	78 týdnů
Dokončení objektu	+ 66 týdnů
Cena betonové nosné konstrukce	8,9 mil. GBP
Celková cena	17,8 mil. GBP

Carol Hayek, PhD, MBA
CCL
8296 Sherwick Ct, Jessup,
MD USA 20794
e-mail: chayek@cclint.com



Saleem Kailil
CCL
Unit 8, Millennium Drive, Leeds
LS11 5BP
United Kingdom
e-mail: skalil@cclint.com
www.cclint.com



Objekt Strata SE1, London získal v roce 2010 nejvyšší ocenění britské Betonářské společnosti „Vynikající betonová konstrukce“ [5]. Ve zdůvodnění rozhodnutí soutěžní komise se píše: „Je obtížné si představit, že budova tohoto návrhu a výšky by kromě nejvyšší části z oceli mohla být postavena z jiného stavebního materiálu než z betonu. Tři veliké otvory pro listy větrných turbín na jejím vrcholu z ní činí výrazný bod na londýnském horizontu.

Použití monolitického betonu je podstatné pro návrh konstrukce budovy. Dodatečně předpínané stropy umožnily snížit tloušťku stropních desek, a tím ušetřit materiál a snížit produkci uhlíku. 200 mm je nejnižší možná tloušťka (dle britských norem) při posuzování desky daného rozpětí na propíchnutí a splnění podmínek na umístění předepsané smykové výztuže.

Stěnové sloupy bylo možné začlenit do stěn oddělujících jednotlivé byty. Jeden z nejvýraznějších dojmů uvnitř budovy je ten, že téměř nevnímáte její nosnou konstrukci kolem sebe. Směrem k vrcholu budovy jsou pouze diagonální tažené sloupy podpírající desky jedinými viditelnými konstrukčními prvky.

Budova je novátorská, pozoruhodná architektonicky, s optimálně řešenou konstrukcí na omezeném půdorysu a velmi dobrým použitím betonu jako konstrukčního materiálu.“

Fotografie: archiv společnosti CCL, Leeds, VB.

RSTAB RFEM

**Vyzkoušejte naše programy
Bezplatné zapůjčení licence**

RSTAB 7

Program pro výpočet prutových konstrukcí

RFEM 4

Program pro výpočet prostorových konstrukcí metodou konečných prvků

-
-
-
-
-
-

→ Podpora nových evropských norem
→ Různé národní přílohy
→ Cena programu již od 33 450 Kč
→ Česká verze včetně manuálů

Bezplatná studentská verze
Demoverze zdarma ke stažení

www.dlupal.cz

Ing. Software Dlubal s.r.o.
Anglická 28, 120 00 Praha 2
Tel.: +420 221 590 196
Fax: +420 222 519 218
www.dlupal.cz
info@dlupal.cz