

## Tenkostnný sendviový systém z vysokohodnotného betonu vyztuženého ediovými vlákny

**Hodicky, Kamil; Hulin, Thomas**

*Published in:*  
Journal Beton

*Publication date:*  
2013

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*

Hodicky, K., & Hulin, T. (2013). Tenkostnný sendviový systém z vysokohodnotného betonu vyztuženého ediovými vlákny. *Journal Beton*, (6), 56-61.

## DTU Library

Technical Information Center of Denmark

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# TENKOSTĚNNÝ SENDVIČOVÝ SYSTÉM Z VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU VYZTUŽENÉHO ČEDIČOVÝMI VLÁKNY ■ A THIN-WALLED HIGH PERFORMANCE CONCRETE SANDWICH PANEL SYSTEM REINFORCED WITH BFRP SHEAR CONNECTORS

Kamil Hodický, Thomas Hulin

Práce představuje nový tenkostěnný sendvičový systém z vysokohodnotného betonu (high performance concrete, HPC) vyztuženého čedičovými vlákny. Systém se vyznačuje vysokou statickou únosností, tepelně izolační schopností a šetrností k životnímu prostředí. Sendvičový systém a jeho konstrukční řešení jsou detailně popsány. Vývoj systému byl strukturován od počátečních zkoušek segmentů sendvičového systému až po zkoušky panelů skutečných rozměrů zatěžovaných spojitým zatížením. ■ The paper presents a new thin-walled high performance concrete (HPC) sandwich panel system reinforced with basalt fiber-reinforced plastic (BFRP). System is characteristic with a high structural resistance, thermal resistance and environmental friendliness. The newly developed shear connecting system made of a BFRP grid and its structural design is described in a detail. The development of the system led from the small-scale specimens to full-scale specimens testing loaded by uniformly distributed load.

Stavební průmysl se v poslední době rychle mění. Dle Evropské unie, obytné, obchodní a průmyslové budovy spotřebují přibližně 40 % z celkové spotřeby energie a vyprodukují obdobné procento CO<sub>2</sub> emisí v Evropě. Požadavky pro snížení energetické spotřeby novostaveb jsou již nyní stanoveny nařízením Evropské unie. Počátkem roku 2020 všechny novostavby musí být navrženy tak, aby jejich energetická spotřeba byla pokryta energií z obnovitelných zdrojů [1]. V důsledku toho stavebnictví čelí rostoucí poptávce po vývoji a výrobě modulárních, lehkých a zároveň únosných stavebních prvků, které mají vysokou izolační schopnost, dlouhou životnost, nízké emise CO<sub>2</sub>, nízkou spotřebu nerostných surovin a atraktivní povrch s minimální údržbou. Tenkostěnné sendvičové panely z HPC betonů jsou velmi zajímavou volbou pro stavbu nízkenergetických staveb.

Typický panel je vyroben z vnitřní a vnější vrstvy HPC betonu oddělených vrstvou tuhé pěnové izolace. Speciálně navržené smykové prvky prostupují vrstvou izolace a spojují vrstvy HPC betonů. Panel může být navržen tak, aby se choval nekompo-

zitně, částečně kompozitně, nebo plně kompozitně (obr. 1), a to v závislosti na typu a počtu spojení zajišťovaných mezi dvěma vrstvami HPC betonů [2].

Smykové prvky musí poskytovat dostatečnou tuhost a pevnost k dosažení vysokého stupně kompozitního chování panelu (tj. minimálně 65 % únosnosti plně kompozitního chování) a zároveň přenosu návrhového zatížení v souladu s mezním stavem únosnosti a použitelnosti. Stupeň kompozitního chování panelu  $k$  lze určit pomocí rovnice (1)

$$k = \frac{\Delta_{\text{nekompozitní}} - \Delta_{\text{experiment}}}{\Delta_{\text{nekompozitní}} - \Delta_{\text{kompozitní}}} (100) (1)$$

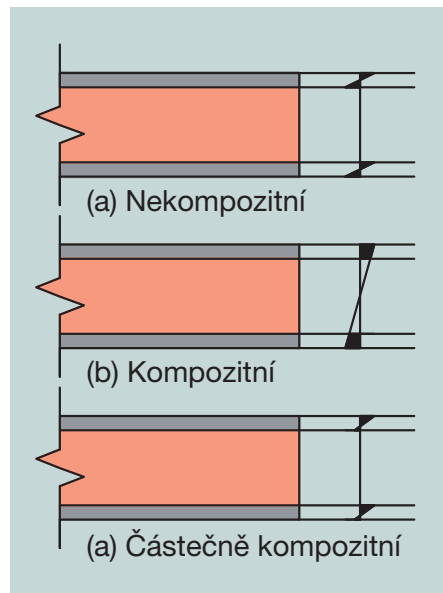
kde  $\Delta_{\text{nekompozitní}}$  značí teoretický průhyb za předpokladu plně nekompozitního chování,  $\Delta_{\text{kompozitní}}$  teoretický průhyb za předpokladu plně kompozitního chování a  $\Delta_{\text{experiment}}$  průhyb experimentálně naměřený ve zvoleném stupni zatížení.

Návrh smykového prvku představuje kompromis mezi návrhem plně kompozitního chování pro přenos zatížení větrem anebo snížením kompozitního chování za účelem snížení deformací způsobených teplotními vlivy.

Spojení mezi panely je tradičně vytvořeno použitím různě zahnutých ocelových nebo polymerových smykových prvků. Zvýšení stupně kompozitního chování použitím jakéhokoliv typu ze zmíněných smykových prvků vede ke zvýšení únosnosti sendvičových panelů. Avšak zvýšení stupně kompozitního chování vede k výraznému snížení tepelně izolačních vlastností panelu v důsledku tepelných mostů. Kromě toho, může dojít k nežádoucímu vyboulení zapříčiněného rozdílem teplot mezi vnitřní a vnější stěnou. Tepelné deformace v případě dlouhých panelů mohou být značné a mohou vést až k praskání HPC betonu v případě jižní expozice, zejména v rozích budovy [3]. Tuhost smykového prvku je tedy úměrná teplotním deformacím a hraje důležitou roli při návrhu sendvičových konstrukcí [4].

## Nastavení nových standardů

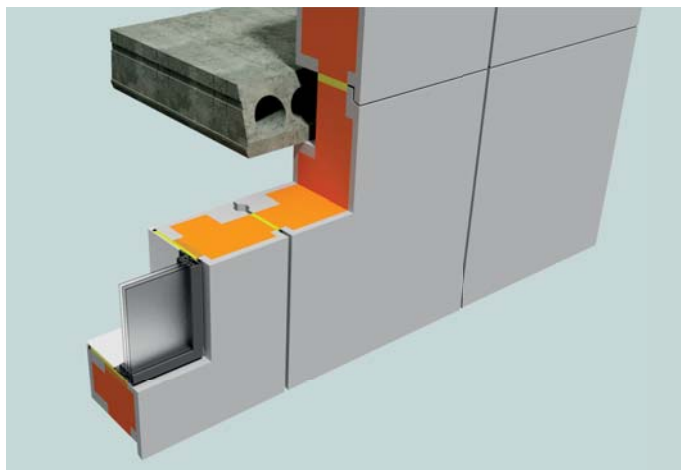
System Connovate představuje konstrukčně a tepelně výhodné sendvičo-



vé panely pro konstrukci vnějších stěn obytných, obchodních a průmyslových budov (obr. 2).

Hlavními přednostmi systému jsou nízká hmotnost, trvanlivost, rychlá montáž a atraktivní architektonický vzhled. Prvky kombinují vysoké hodnoty izolačních vlastností s minimální tloušťkou nosné stěny (vrstva HPC betonu jen 30 mm). Součinitel prostupu tepla panelu se pohybuje v rozmezí 0,15 až 0,06 W/m<sup>2</sup>K v závislosti na tloušťce a typu izolace. Sendvičové panely systému Connovate jsou vyráběny jako nosné prvky s výztužnými žebry v zadní stěně nebo jako nenosné fasádní panely. Nízká hmotnost prvků zajišťuje levnou dopravu a snadnou manipulaci na místě.

Hlavním materiálem sendvičových panelů je samo-zhutnitelný HPC beton s pevností v tlaku 110 MPa, který je vyztužen čedičovými vlákny o průměru 0,9 mm a délky 10 mm. Pevnost HPC betonu v příčném tahu byla naměřena 6,2 MPa a pevnost v třibodovém ohybu 13,1 MPa. Použitím nízkého vodního součinitele, optimalizací křivky zrnitosti kameniva a minerálních přísad je zaručeno, že obsah vzduchu v HPC betonu je maximálně 0,8 %. Přestože nelze zajistit dostatečné krytí výztuže předepsané Eurokódem 2, byl proveden penetrační test chloridových iontů. Výsledky testu ukázaly téměř nulový náboj (Co-



Obr. 1 Průběh napětí v panelu  
 ■ Fig. 1 Panel stress diagram

Obr. 2 Detail Connovate sendvičového panelu z HPC betonu ve spojení s okenním otvorem a stropními dutinovými panely  
 ■ Fig. 2 Detail of Connovate sandwich wall element with connection to window opening and hollow core concrete deck

Obr. 3 Betonáž sendvičových panelů ve výrobní hale  
 ■ Fig. 3 Casting of sandwich elements in the production hall



loub). Výztuž je tedy dostatečně chráněna před korozí po celou předpokládanou dobu životnosti stavby (100 let).

Čedičová mřížovina se používá v nejnovější generaci stěnových panelů k dosažení kompozitního chování a zároveň zachování tepelně izolačních vlastností. Plně kompozitní chování může být dosaženo spojením pásů čedičové sítě orientované pod úhlem 45°. Kontinuální nebo polo-kontinuální pásy čedičových vláken jsou zabetonovány na rozhraní dvou HPC betonů. Pásy prochází štěrbinami v tepelné izolaci a vzhledem k relativně nízké tepelné vodivosti čedičových vláken ve srovnání s ocelí nevytváří tepelné mosty. Kromě toho nabízí vysokou únosnost a odolnost proti korozi.

Zdokonalením výrobních metod a použitím laserových zaměřovacích zařízení je zajištěno, že prvky jsou vyrobeny v toleranci  $\pm 0,75$  mm. Systém byl doplněn o nově vyvinutý systém těsnění, kde obvyklé těsnění ze silikonu nebo obdobných materiálů je nahrazeno těsnicími profily z nerezové oceli. Použití nerezové oceli jako těsnění zajišťuje dlouhodobou životnost a bezchybný estetický vzhled v porovnání s tradičním řešením.

## PREFABRIKACE

Prefabrikované sendvičové panely jsou vyráběny na dlouhých výrobních linkách

(obr. 3). Vnější hladký povrch je docílen betonáží do ocelového bednění. Výztuž vnější HPC betonové vrstvy (ocelová svařovaná síť/čedičová síť) je umístěna do prázdné formy. Pro docílení požadovaného architektonického vzhledu mohou být na dno prázdné formy vloženy speciální matrice, textury nebo tenké cihelné pásy. Poté je do předepsané výše ve formě nalita vrstva HPC betonu. Následně jsou na horní plochu čerstvé vnější HPC betonové vrstvy přitisknuty čedičové pásy a tepelná izolace. Čedičové pásy jsou obvykle předem upevněny do štěrbin izolace a vyčnívají z izolace alespoň 15 mm na obě strany. Na izolaci je položena betonářská výztuž, která může být doplněna o předpínací výztuž, ocelovou svařovanou nebo čedičovou síť. V této fázi jsou do formy vloženy také kotvy pro zvedání a manipulaci či jiné kotvicí prvky.

V průběhu výroby musí být dodržována vysoká pracovní kázeň, aby nedošlo k poškození čedičových pásů vyčnívajících z tepelné izolace. Panel je dokončen zalitím vrstvou HPC betonu do požadované výše a vyhlazením speciální hladicí lištou.

## VÝZKUM A VÝVOJ

Vytvoření nového stavebního systému, který nabízí srovnatelné mechanické vlastnosti jako stávající prefabrikované systémy a zároveň je konkurenceschopný s vyšším stupněm kvality provedení, vyžaduje mnoho úsilí v oblasti vývoje. Výzkumný projekt zabývající se tímto vývojem zahrnoval spolupráci Technické Univerzity v Dánsku (Technical University of Denmark), Výzkumného Ústavu pro vývoj (IPU), Státního Požárního Institutu (DBI), výrobce betonových sendvičových panelů (AmberCon) a byl finančně podpořen Státním Fondem pro Vědu a Výzkum (Højteknologifonden).

K pochopení chování sendvičového systému a jeho následné optimalizace bylo třeba experimentální výzkum zahrnující všechny komponenty systému. Zkoušky sendvičových panelů zahrnovaly: materiálové zkoušky HPC směsi, tepelné izolace a smykových prvků z čedičových/uhlíkových vláken; zkoušky prvků sendvičového systému ve smyku; ve čtyřbodovém ohybu; skutečné panely zatížené spojitým zatížením a zkoušky požární odolnosti všech komponentů.

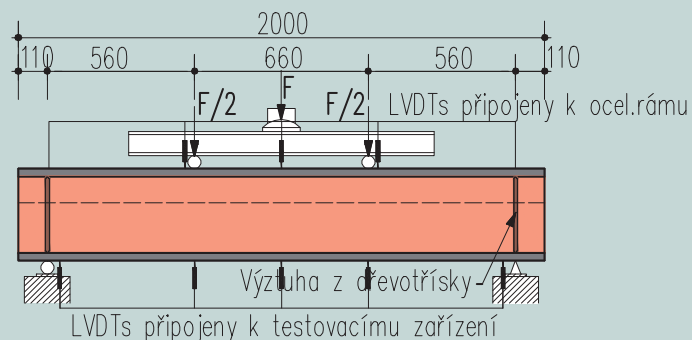
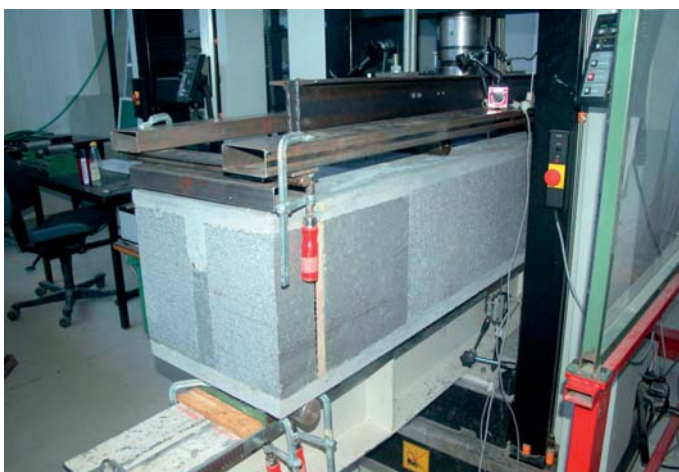
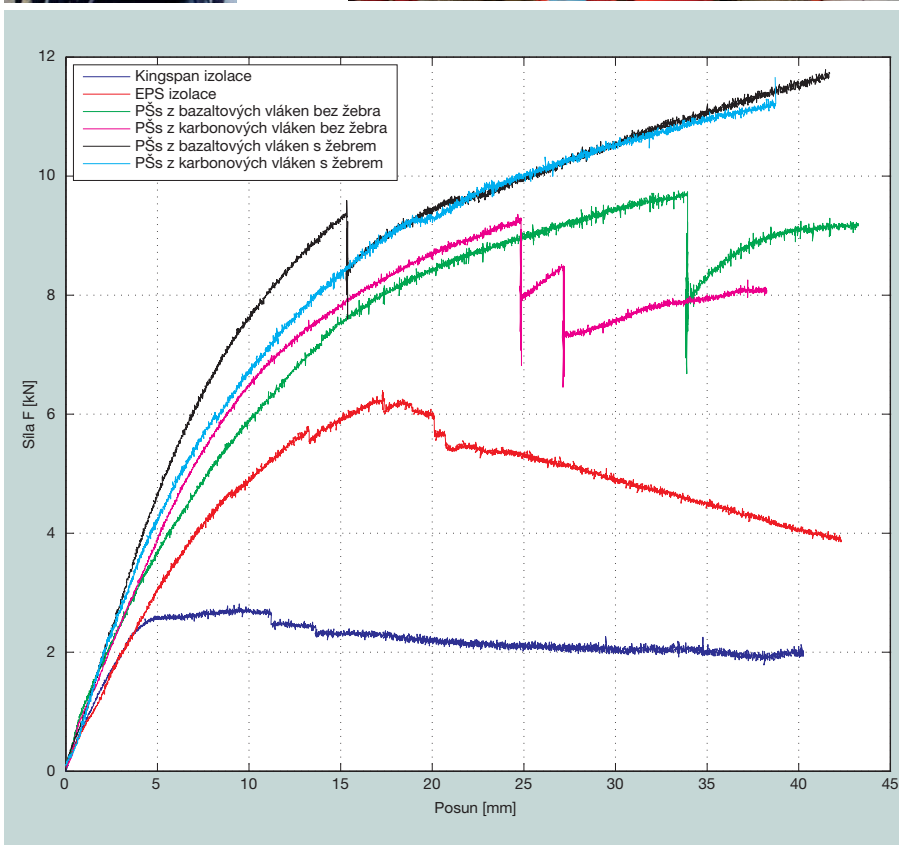
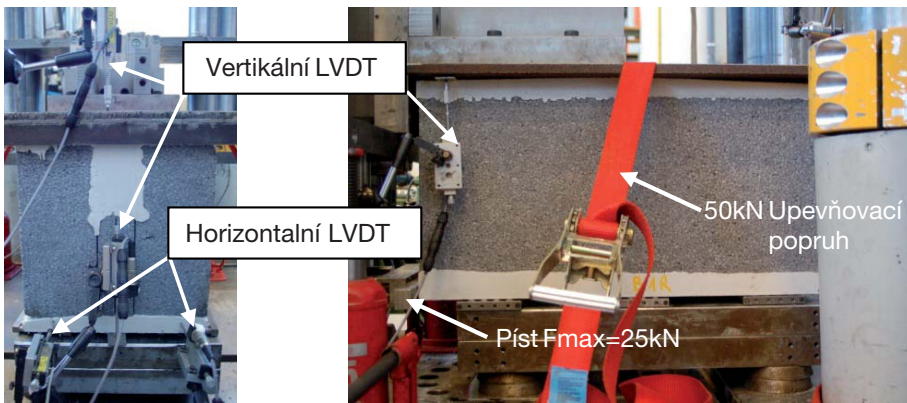
Dále byl výzkum zaměřen na modelování rozvoje trhlin v tenkostěnných panelech v důsledku kombinace autogenního smrštění a teplotního zatížení [3], a modelování jejich požární odolnosti [6]. Studie pokračovala optimalizací tepelně izolačních vlastností, minimalizací tepelných mostů, návrhem nových typů oken a dveří a integrací technického zařízení budov do sendvičového systému [1].

## Zkoušky ve smyku

Při návrhu sendvičových panelů je důležité, aby projektant znal návrhovou pevnost prvku ve smyku a tuhost spojení. Tyto parametry jsou kritické pro stanovení počtu a délky smykových prvků k dosažení určitého stupně kompozitního chování. Smyková pevnost spojení byla určena pomocí segmentů sendvičového systému zkoušených ve speciálně navrženém ocelovém rámu. Velikost segmentů sendvičového systému byla 400 x 700 mm.

Vlastní zkoušky se skládaly z uložení každého segmentu do rámu ve vodorovné poloze a tlačení pístu na spodní HPC stěnu proti horní HPC stěně. Zatížení bylo vnášeno pomocí 25 kN hydraulického pístu a jeho nárůst byl rovnoměrný (lineární). Horní stěně bylo bráněno ve vodorovném posunu, kdežto spodní stěna byla uložena





na válečková ložiska s nízkým koeficientem tření, aby se mohla v zatíženém stavu volně pohybovat. Během experimentu byly na sedmi místech kromě zatížení měřeny také relativní vodorovné/svislé posuny mezi oběma HPC stěnami pomocí LVDT senzorů (obr. 4). Pro porovnání smykové únosnosti byly použity různé konfigurace žebra, typu smykového prvku a izolace [5].

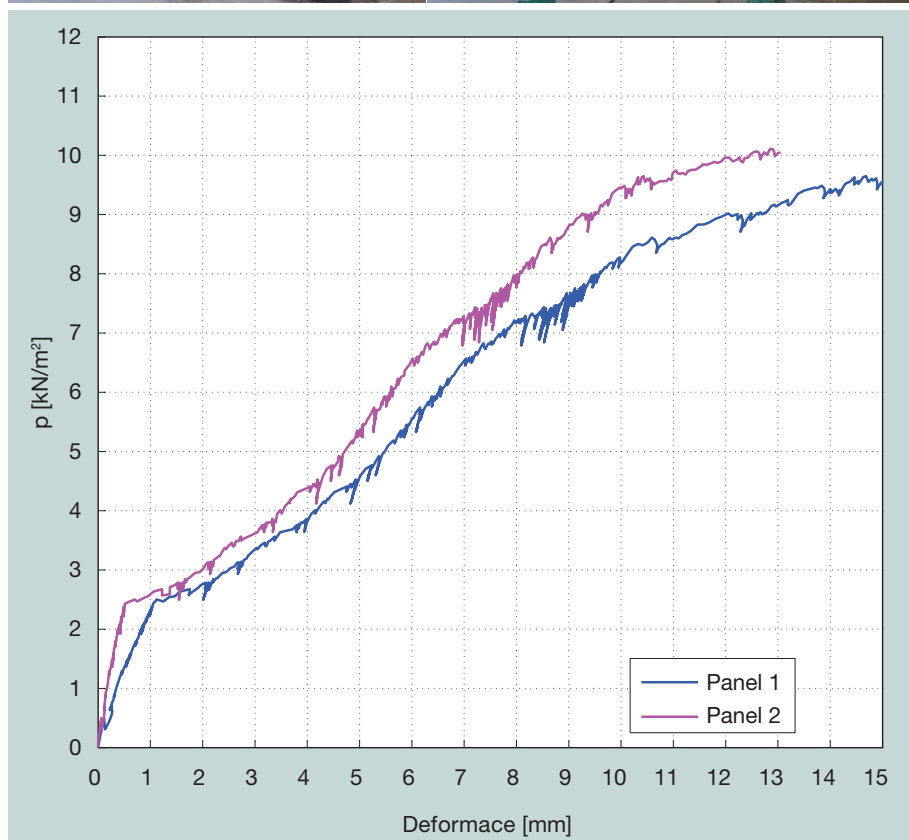
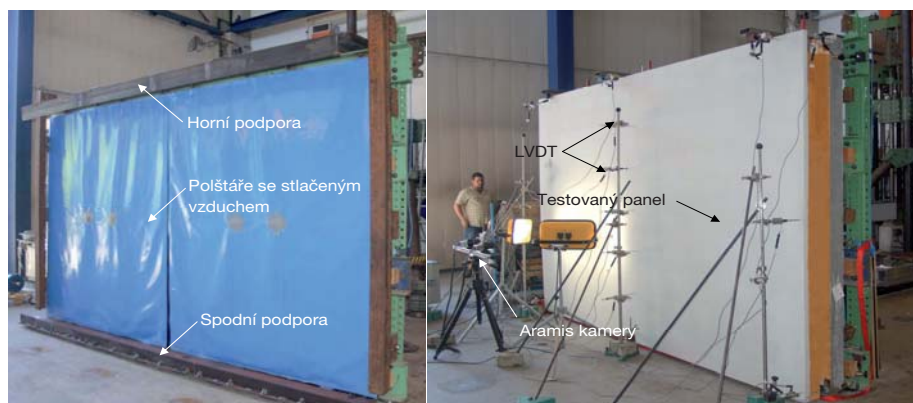
Pracovní diagramy ukázaly (obr. 5), že všechny konfigurace měly vliv na smykovou únosnost segmentů. Výsledky navíc prokazují, že segmenty s EPS izolací mají výrazně vyšší smykovou únosnost ( $F_{max} = 6,2$  kN) než segmenty s Kingspan izolací ( $F_{max} = 2,5$  kN). Toto chování lze vysvětlit výrazně vyšší soudržností EPS izolace s HPC betonem. Segmenty s žebrem ukázaly očekávanou vyšší smykovou únosnost než segmenty bez žebříků.

Typický způsob porušení segmentů sendvičového systému během smykové zkoušky zahrnuje kombinaci ztráty soudržnosti mezi vrstvami HPC betonů a tepelné izolace doprovázenou ztrátou stability tlačných diagonál a přetržením tažených diagonál pásů čedičových vláken (obr. 6).

### Zkoušky v ohybu

K rozšíření znalostí získaných ze smykových zkoušek bylo navrženo a zkoušeno šestnáct sendvičových prvků 450 x 2 000 mm ve čtyřbodovém ohybu (obr. 7). Pro porovnání chování panelu v ohybu bylo vyšetřováno různé umístění a délky čedičových pásů. Panely ukázaly vysoký stupeň kompozitního chování a daly tak základ pro návrh skutečných panelů [5].

Pro zkoušky panelů ve skutečné velikosti byly vybrány dva panely, jež byly použity v pilotním Connovate projektu a navrženy podle doporučení získaných znalostí. Velikost pane-



Obr. 4 Přední a boční pohled na instrumentaci smykové zkoušky ■ Fig. 4 Front and side view of shear test instrumentation

Obr. 5 Pracovní diagramy segmentů testovaných ve smyku ■ Fig. 5 Load-deflection diagrams of segments tested in shear

Obr. 6 Typický způsob porušení segmentů testovaných ve smyku ■ Fig. 6 Typical failure modes of shear test specimen

Obr. 7 a) Zkoušky panelů ve čtyřbodovém ohybu, b) schéma zkoušky ■ Fig. 7 a) Testing of panels in four-point bending, b) Scheme of testing

Obr. 8 Pohled na instrumentaci skutečného panelu před zkouškou ■ Fig. 8 The view on instrumentation of the full-scale test prior testing

Obr. 9 Pracovní diagramy ■ Fig. 9 Load-deflection diagrams

lů byla stanovena 4 m na délku a 2,7 m na výšku.

Zkušební rám se skládal ze dvou podpor, spodní bránila posunům v rovině panelu a ve směru bočního zatížení, zatímco horní bránila pouze posunům ve směru bočního zatížení. Nastavení zkoušky umožňovalo současně panely zatížit vlastní vahou a bočním zatížením. Boční zatížení simulující zatížení větrem bylo vnášeno pomocí obřího polštáře se stlačeným vzduchem opírajícím se do zadní stěny panelu.

Cílem experimentu bylo získat co nejvíce informací o skutečném chování panelu a následné ověření analýzou modelu pomocí MKP softwaru.

Horizontální deformace a relativní deformace mezi oběma HPC stěnami byly měřeny pomocí LVDT senzorů na sedmácti různých místech (obr. 8).

Byla použita optická technika Aramis umožňující měření deformací a napětí na povrchu panelu před a po zatížení. Aramis byl umístěn tak, aby snímal oblast přibližně uprostřed výšky panelu, kde byly očekávány první trhliny v důsledku největšího ohybového momentu.

Zatížení bylo vneseno ve třech cyklech: zatížení odpovídající návrhovému zatížení větrem; odtížení a zatížení do absolutního porušení.

Výsledky zkoušek ukázaly vysoký stupeň kompozitního chování. U panelu 1 (obr. 9) byl naměřen nižší stupeň kompozitního chování v důsledku nižšího stupně vyztužení čedičovými vlákny. Dále zkoušky potvrdily, že vhodným výběrem spojení pomocí čedičových vláken může projektant dosáhnout požadovaného stupně kompozitního chování.

### POŽÁRNÍ ODOLNOST

Zajímavých výsledků bylo dosaženo při zkouškách systému v oblasti požární odolnosti. Návrh systému s vrstvami HPC betonu jen 30 mm je velmi neobvyklé. Pro popisovaný sendvičový systém nebylo možno uplatnit stávající normy ani předpisy. Teorie, která by vysvětlovala chování HPC betonu; vazbu mezi HPC betonem a izolací, či spolupůsobení čedičových vláken s HPC betonem během požáru, také doposud neexistovala. Během pěti let se podařilo vyvinout HPC beton, který vydrží více než 1050 °C (ISO 834 návrhová teplotní křivka v požáru) po dobu 2 h bez známek odprýskávání, které je typickým jevem u podobných typů betonů. Dosažené výsledky otevírají možnosti pro nové aplikace HPC betonu, jehož chování zatím nebylo v souladu s vysokými požadavky na požární odolnost.

Při vyhodnocování požárních zkoušek byly objasněny i některé přenosové jevy v HPC betonu a rozšířeny znalosti chování sendvičových konstrukcí při požáru [6]. V červenci roku 2013 byly uskutečněny statické požární zkoušky pro zatížené sendvičové panely. Panely byly zatíženy vahou 60 t a vystaveny požáru (ISO 834 návrhová teplotní křivka v požáru) po dobu 60 a 120 min. Na základě těchto zkoušek panely Connovate získaly mezinárodní certifikaci pro požární odolnost, a je tedy možno v nejbližší době očekávat jejich rozšíření do ostatních zemí Evropské unie.





Obr. 10 První série úspěšných zkoušek požární odolnosti ■  
Fig. 10 The first series of successfully passed fire certification testing.

Obr. 11 Vila Vid pilotní Connovate projekt ■  
Fig. 11 Villa Vid the pilot Connovate project

Obr. 12 Vila Vid pilotní Connovate projekt – vnitřní pohled ■  
Fig. 12 Villa Vid the pilot Connovate project – Interior look

Obr. 13 Administrativní budova v Horsens, Dánsko ■ Fig. 13 Office house in Horsens, Denmark

Obr. 14 Studentské koleje v přístavu, Aarhus, budova navržena na prestižní britskou cenu WAN Sustainable Buildings Award 2012 ■  
Fig. 14 Student accommodation tower block at Aarhus harbor has been long listed for the prestigious British sustainability price WAN Sustainable Buildings Award 2012



## ZÁVĚR

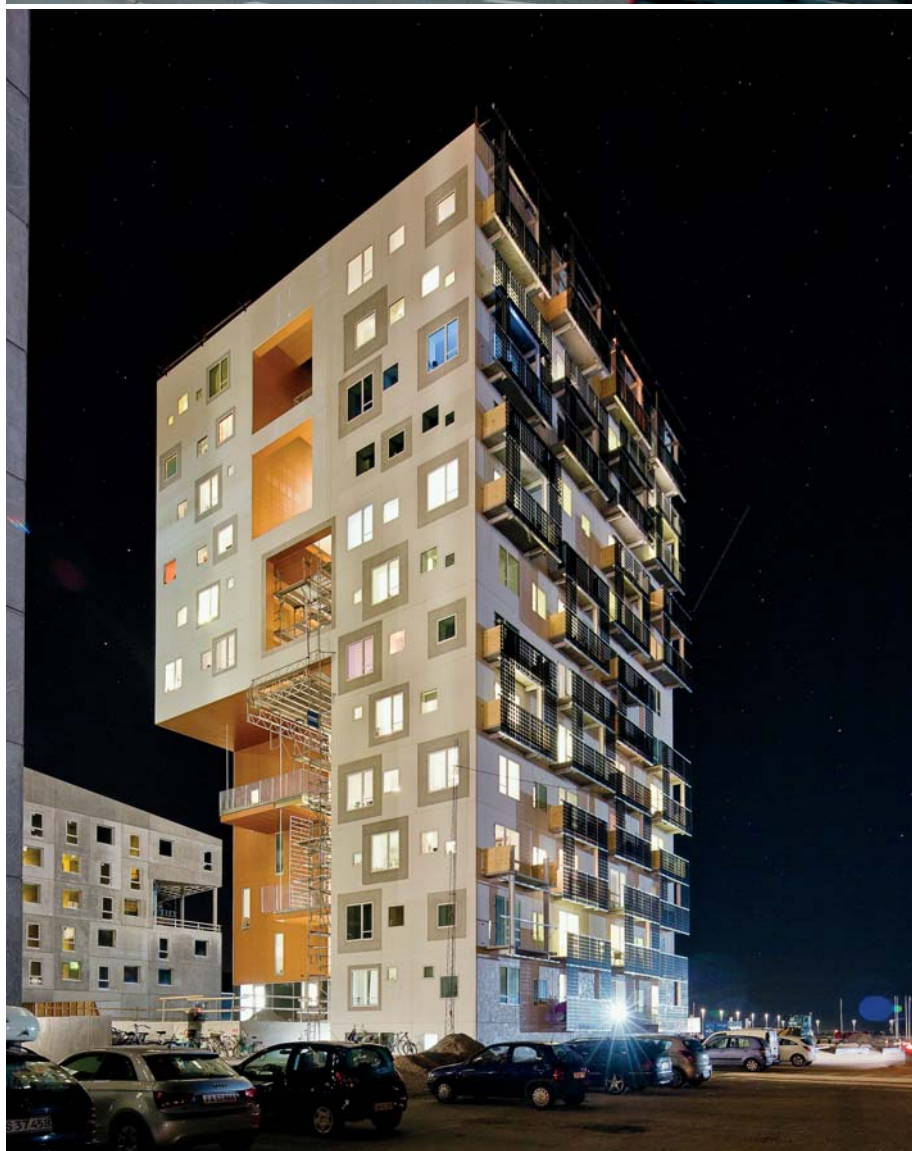
Cílem článku je představit nový tenkostěnný sendvičový systém z HPC betonu vyztuženého pomocí čedičových vláken. Systém se vyznačuje vysokou statickou únosností, tepelně izolační schopností a šetrností k životnímu prostředí.

Vývoj systému byl detailně popsán od zkoušek segmentů sendvičového systému ve smyku až po panely ve skutečných velikostech zatěžované spojitým zatížením.

Systém Connovate kombinuje nejnovější stavební trendy s tradičním

## Literatura:

- [1] Hansen S., Vanhoutteghem L. (2012): "A method for economic optimization of energy performance and indoor environment in the design of sustainable buildings, Publ. in proc. to 5<sup>th</sup> Intern. Building Physics Conference, Kyoto, Japan
- [2] Rizkalla S. H., Hassan T. K., Lucier G. (2009): "FRP Shear Transfer Mechanism for Precast, Prestressed Concrete Sandwich Load-Bearing Panels", Special Publ., Vol. 265, 603–625
- [3] Hodický K., Hulín T., Schmidt J. W., Stang H. (2013): "Assessment risk of fracture in thin-walled fiber reinforced and regular High Performance Concretes sandwich elements", Publ. in proc. to 8<sup>th</sup> Intern. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Toledo, Spain
- [4] Einea A., Salmon D. C., Tadros M. K. and Culp T. (1994): "A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system", PCI Journal, 39(4), 90–101
- [5] Hodický K., Hulín T., Schmidt J. W., Stang H. (2013): "Performance of new thin-walled concrete sandwich panel system reinforced with BFRP shear connectors", Publ. in proc. to Asia-Pacific Conf. on FRP in Structures, Melbourne, Australia
- [6] Hulín T., Hodický K., Schmidt J. W., Stang H. (2013): "A model for spalling of HPC thin plates exposed to fire", Publ. in proc. to 5<sup>th</sup> Intern. conf. on Structural engineering, mechanics and computation, Cape Town, SAR



prefabrikovaným řešením. Na základě prvních úspěšných užití systému na různých typech bytových administrativních budov v Dánsku (obr. 11 až 14) lze očekávat, že systém brzy najde uplatnění i mezinárodním trhu.

Kamil Hodický, M.Sc.  
e-mail: kamh@byg.dtu.dk  
www.connovate.dk

Thomas Hulin, M.Sc.  
e-mail: thuh@byg.dtu.dk

oba: Technical University  
of Denmark  
Dept. of CE, Sect. of SE  
Brovej, Building 118, Kgs. Lyngby  
DK-2800  
Denmark

Text článku byl posouzen odborným lektorem