

EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ OHYBOVÉ PEVNOSTI DESEK Z UHPC ■ EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FLEXURAL STRENGTH OF SLABS MADE OF UHPC

Milan Holý, Petr Tej, Jiří Kolísko,
Lukáš Vráblík

Článek je zaměřen na stanovení ohybové pevnosti tenkých desek z ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého ocelovými vlákny (UHPC). Únosnost prvků bez betonářské výztuže vyztužených pouze rozptýlenou výztuží v podobě drátků v ohybu je ovlivněna především orientací a distribucí vláken a projevuje se u nich size-effect. Speciální tělesa – deskové pruhy o tloušťkách 40, 50, 60, 70 a 80 mm – byla testována ve čtyřbodovém ohybu na rozpětí 1 900 mm a ve třibodovém ohybu na rozpětí 600 mm v poloze stejné jako při betonáži a obrácené dnem vzhůru. Vyhodnocené ohybové pevnosti byly porovnány s pevnostmi stanovenými referenčními ohybovými zkouškami na trémciích o velikostech 150 × 150 × 700 mm, 100 × 100 × 400 mm a 40 × 40 × 160 mm. Byly vyhodnoceny vlivy velikosti prvku, tloušťky desky, rozpětí a polohy vzhledem k betonáži na únosnost v ohybu. Experimenty byly dále podpořeny numerickou simulací. ■ This paper focuses on the determination of the flexural strength of thin slabs made of the Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC). The load-bearing capacity in bending of elements reinforced only with steel fibres (used as a scattered reinforcement) is primarily influenced by the orientation and distribution of the fibres. A size-effect occurs in these elements. Bending tests were executed on some special test specimens – slabs strips. The slab strips of various thickness of 40, 50, 60, 70 and 80 mm were tested in 4-point bending tests with span of 1 900 mm and in 3-point bending tests with span 600 mm. Half of the test specimens was tested in casting position, the other half was tested upside down. The obtained values of the flexural strength were compared to values from reference bending tests of the beams 150 × 150 × 700 mm, 100 × 100 × 400 mm and 40 × 40 × 160 mm. Influence of the different size of the tested specimen, of the slab thickness, of the span size and of the positioning of the slab with respect to the direction of casting on the flexural strength are evaluated. The experiments were further supported by numerical simulation.

Vzhledem k tomu, že tahová odezva vláknobetonů obecně není pevně definovaná materiálová vlastnost, byly v rámci vývoje segmentů mostovky pro spřažené dřevo-UHPC (ultra vysokohodnotný beton vyztužený ocelovými vlákny) lávky provedeny speciální ohybové zkoušky za účelem stanovení pevnosti v tahu za ohybu pro konkrétní okrajové podmínky.

EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

V současné době probíhá na Kloknero-vě ústavu ČVUT ve spolupráci se společnostmi Novák & Partner vývoj technologie spřažené dřevo-betonové lávky s využitím prefabrikovaných segmentů mostovky z UHPC. Koncepčně byly segmenty navrženy jako tenké desky konstantní tloušťky z UHPC vyztužené pouze rozptýlenou výztuží v podobě ocelových drátků. Segmenty jsou uloženy na dvou dřevěných trámech, se kterými jsou spřaženy. V podélném směru segmenty spolupůsobí s trámy a jsou namáhány převážně tlakovou silou a ohybem. V příčném směru staticky působí jako prostý nosník s převalnými konci. Pro návrh jejich tloušťky je rozhodující únosnost v příčném směru, ve kterém jsou namáhané pozitivním i negativním ohybovým momentem a smykovou silou.

Pevnost vláknobetonů v tahu

Odezva daného materiálu na vnější silové zatížení se nazývá mechanická vlastnost a bývá charakterizována fyzikální veličinou, nejčastěji napětím (pevností) a deformací (mezním přetvořením). Tahová odezva vláknobetonů není obecně pevně definovaná materiálová vlastnost. Hodnota tahové pevnosti je závislá nejen na konkrétní receptuře, množství a vlastnostech použitých vláken a typu zkoušky, ale závisí zejména také na uspořádání a orientaci vláken v konkrétním průřezu a vyhodnocovaném směru. Uspořádání a orientace vláken jsou silně ovlivněny rozměrovým efektem (size-effect – menší tělesa vykazují vyšší pevnost) a stěnovým efektem (wall-effect – dochází k usměrnění vláken o stěny formy, projevuje se nejvíce u tenkých prvků). Uspořádání a orientace vláken závisí kromě tvaru a velikosti konkrétního prvku také na způsobu jeho výroby. Tato problematika byla studována již mnoha autory po celém světě a je podrobně zpracována např. v [7], [10], [13].

Uspořádání a orientace vláken (v tomto případě ocelových drátků) v betonové matici tedy není homogenní. Drátky v blízkosti bednění se orientují podélně s bedněním. Vlivem gravitace mohou drátky sedat od vrchu dolů a orientovat se spíše do vodorovné pozice. Při horním povrchu desky tak např. při nevhodné konzistenci může dojít k částečné

absenci drátků a naopak při spodním povrchu může dojít k jejich větší koncentraci.

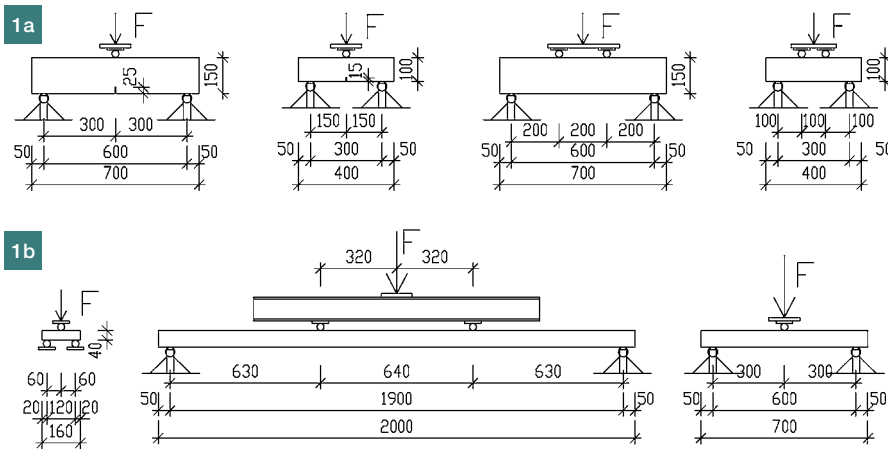
U betonů běžných pevností se aplikují tři způsoby stanovení pevnosti v tahu: test příčným tahem, ohybem anebo prostým tahem. Každý test poskytuje jinou hodnotu – pevnost v prostém tahu, pevnost v tahu za ohybu (ohybová pevnost) a pevnost v příčném tahu. Pro účely materiálu UHPC jsou podstatné testy v ohybu či prostém tahu, ze kterých je možno odvodit skutečné materiálové charakteristiky pro návrh prvků.

Zkušební tělesa pro stanovení ohybové pevnosti

Na základě různých platných norem existuje pro stanovení pevnosti betonu v tahu za ohybu více typů zkoušek, které se liší zejména velikostí vzorků a statickým schématem. Zkoušky se provádějí většinou na trémciích namáhaných čtyřbodovým či třibodovým ohybem se zářezem či bez zářezu. O správnosti aplikace a interpretovatelnosti výsledků konkrétního zkušební postupu pro vláknobetonové konstrukce se vedou neustále diskuze, proto bylo provedeno pro porovnání více různých typů zkoušek.

Byly provedeny zkoušky ve třibodovém ohybu na trémciích 100 × 100 × 400 mm a 150 × 150 × 700 mm se zářezem (dle ČSN EN 14651+A1 [3]) a ve čtyřbodovém ohybu na trémciích 150 × 150 × 700 mm a 100 × 100 × 400 mm (dle ČSN P732452 [6]). Vzhledem k jemnozrnnosti UHPC byly provedeny testy také na trémciích 40 × 40 × 160 mm (pro testování cementu dle ČSN EN 196-1 [4]) ve třibodovém ohybu bez zářezu (podle ČSN EN 12390-5 [5]). U testů ve třibodovém ohybu se zářezem byly osazeny senzory pro měření rozevření trhliny CMOD.

Je nutno upozornit, že normové zkušební trémky mají rozpětí, které je pouze malým násobkem výšky průřezu, a proto se na jejich průhybu významnou měrou podílí smykové deformace (jejich podíl činí pro třibod cca 18 % a pro čtyřbod cca 14 % z celkového průhybu). Současné normy nezohledňují při odvozování materiálového diagramu z naměřené závislosti síla-průhyb z ohybové zkoušky vliv smykových deformací a dochází k poměrně značným odchýlkám ve výpočetní predikci průhybů, podrobněji ve [12].



Tab. 1 Materiálové charakteristiky UHPC s 2 % drátků (průměrné hodnoty)

Tab. 1 Material properties of UHPC with 2 % of fibres (mean values)

Materiálová charakteristika	Jednotka	Hodnota
objemová hmotnost	[kg/m ³]	2 450
pevnost v tlaku (krychle a = 100mm)	[MPa]	144,2
pevnost v tlaku (válec Ø 150mm)	[MPa]	131,0
pevnost v tlaku (válec Ø 100mm)	[MPa]	141,7
modul pružnosti	[GPa]	49,6

V rámci experimentálního programu byla navržena speciální zkušební tělesa půdorysných rozměrů 2 000 × 250 mm o tloušťkách 40, 50, 60, 70 a 80 mm, která byla testována ve čtyřbodovém ohybu s rozpětím podpor 1 900 mm (obr. 2). Neporušené krajní třetiny nosníku byly po zkoušce dále testovány ve třibodovém ohybu s rozpětím 600 mm (obr. 3). Polovina zkušebních těles byla zkoušena v poloze stejné jako při betonáži (normální poloha – N) a druhá polovina horním povrchem dolů (obrácená poloha – R). Schémata všech zkoušek jsou na obr. 1.

Materiálové charakteristiky

Testovaná receptura UHPC byla složena z cementu CEM II 52,5 N, jemného kameniva o velikosti do 2 mm, strusky, křemičitého úletu, vody, superplastifikátoru a ocelových drátků. Vodní součinitel byl cca 0,24. Drátky byly použity nedeformované, válcové, potažené mosazí o pevnosti 2 200 MPa, délky 13 mm a průměru 0,2 mm s objemovým podílem 2 %. Základní materiálové vlastnosti stanovené experimentálně ve stáří 28 dní jsou uvedeny v tab. 1.

VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Výsledky experimentů jsou záznamy závislosti síly na průhybu (obr. 5 a 6), ze kterých je patrný materiálový diagram a ze kterých se následně vyhodnotí

ohybová pevnost za předpokladu aplikace teorie lineární pružnosti. Tahová pevnost v ohybu je stanovena z maximální naměřené síly za předpokladu lineárně elastického rozdělení napětí po výšce průřezu a průřezové plochy v místě porušení. Je nutno poznamenat, že aplikace lineárně elastické teorie zakotvená v normových předpisech neodpovídá skutečnému průběhu napětí v singulárních oblastech, zejména pak v případě třibodového ohybu se zářezem.

Průměrné ohybové pevnosti vyhodnocené z jednotlivých typů zkoušek jsou shrnuty v tab. 2, kde jsou také procentuálně porovnány vzhledem ke zkoušce ve čtyřbodovém ohybu na trámcích 150 × 150 × 700 mm (test č. 1), u které byla vyhodnocená pevnost nejmenší. Dále jsou u těles se stejnými rozměry průřezu stanoveny také procentuální rozdíly mezi tří- a čtyřbodovým ohybem.

Vyhodnocené pevnosti v tahu za ohybu dosáhly v případě malých trámů 40 × 40 × 160 mm hodnoty více než dvojnásobné (2,4x) oproti trůmům 150 × 150 × 700 mm. Tento výsledek potvrzuje skutečnost, že zejména vliv stěnového efektu (usměrnění drátků) je u malých těles naprosto zásadní. Rozdíly mezi tří- a čtyřbodovým ohybem byly zaznamenány okolo 8 až 9 %

u normových těles, u speciálních těles s výrazně větším rozpětím dosahovaly až k cca 25 %. Rozdíly mezi tří- a čtyřbodovým ohybem jsou dány zejména skutečností, že v případě třibodového ohybu je místo porušení pevně definováno, zatímco u čtyřbodového ohybu dochází k porušení v nejslabším místě ve vnitřní třetině rozpětí nosníku. Únosnost desek v obrácené poloze byla průměrně o cca 20 % nižší oproti normální poloze, ve které byly desky betonovány. Tento rozdíl byl dán nerovnoměrným rozdělením drátků po výšce průřezu způsobeným vlivem gravitace a méně vhodnou konzistencí.

V diagramu na obr. 4 jsou vyhodnocené průměrné hodnoty ohybové pevnosti speciálních těles pro jednotlivé tloušťky desek 40 až 80 mm. Červené sloupce znázorňují výsledky ze čtyřbodového ohybu, modré sloupce výsledky ze třibodového ohybu pro tělesa v normální (N) a obrácené poloze (R).

1 Schémata provedených zkoušek:

a) normová tělesa, b) speciální tělesa

2 Zkouška speciálního tělesa ve čtyřbodovém ohybu **3** Zkouška speciálního tělesa ve třibodovém ohybu **1** Test set-ups of performed bending tests: a) specimens according to standards b) special specimens **2** 4-point bending test **3** 3-point bending test



Čárkovanou čarou je vyznačen trend klesající pevnosti s rostoucí tloušťkou desky.

Ze zkušeností s aplikací UHPC vyplývá, že tenčí desky se chovají výrazně duktilněji než desky tlustší. Ze záznamů zkoušek ve čtyřbodovém ohybu na obr. 6 je toto chování dobře patrné u desek tloušťky 40, 60 a 80 mm, kdy pro desky tloušťky 40 mm je porušení dosaženo při cca dvojnásobném průhybu oproti deskám tloušťky 80 mm. Zkušební tělesa tloušťky 50 mm ve čtyřbodovém ohybu zcela vybočují z důvodu lokálních poruch v distribuci drátků, u tříbodového ohybu lze pozorovat pouze lehkou sníženou únosnost v normální poloze. Desky tloušťky 70 mm vykazují nižší pevnost a duktilitu oproti očekávání ve všech případech.

NUMERICKÁ SIMULACE

V programu Atena byly namodelovány zkoušky ve tří- a čtyřbodovém ohybu pro vyšetřované tloušťky desek 40 až 80 mm. Pro simulaci materiálu UHPC byl aplikován jeden materiálový model Nonlinear cementitious 2 pro celý průřez. Pro daný typ zkoušky byly použity vždy stejné materiálové parametry pro všechny tloušťky desek, aby byly lépe patrné odchylky dané rozdílnou distribucí vláken pro různé tloušťky desek. Výsledné zatěžovací křivky jsou zaneseny do grafů na obr. 5 a 6.

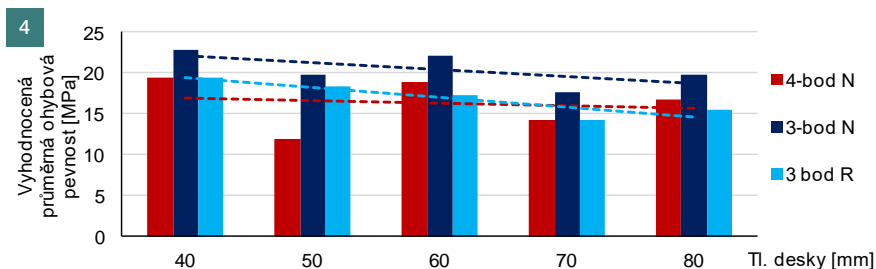
Numerickou simulaci v programu Atena lze dosáhnout velmi dobré shody s experimenty, ovšem při aproximaci průřezu prvků z UHPC homogenním materiálem nelze materiálový model zcela univerzálně aplikovat pro různé okrajové podmínky a je nutno jej kalibrovat pro konkrétní případy dané velikostí, tvarem a způsobem odlévání prvku do formy. Určitým řešením pro možnost částečně univerzální aplikace by mohl být vrstvičkový model, který by zohledňoval rozdílnou distribuci drátků po výšce průřezu. Tento model je složen z více vrstev s různými materiálovými parametry a v současnosti se zabýváme jeho laděním.

ZÁVĚR

Vyhodnocená ohybová pevnost (pevnost v tahu za ohybu) UHPC se významně liší v závislosti na velikosti zkušební tělesa a typu zkoušky. Trámce o velikosti 40 × 40 × 160 mm vykazovaly až 2,4× větší ohybovou pevnost než trámce o velikosti 150 × 150 × 700 mm. Tento výsledek potvrzuje skutečnost, že vliv zejména stěnového efektu (usměrnění drátků) na mechanické vlastnosti je u malých

těles naprosto zásadní. Dále byl pozorován určitý trend rostoucí duktility a ohybové pevnosti se snižující se tloušťkou desky. Z testů ve čtyřbodovém ohybu byla vyhodnocena nižší ohybová pevnost oproti testům ve tříbodovém ohybu. Rozdíly mezi tří- a čtyřbodovým ohybem byly zaznamenány okolo 8 až 9 % u normových těles, u speciálních těles s výrazně větším rozpětím dosahovaly

až k cca 25 %. Rozdíly mezi tří- a čtyřbodovým ohybem jsou dány zejména skutečností, že v případě tříbodového ohybu je místo porušení pevně definováno, zatímco u čtyřbodového ohybu dochází k porušení v nejslabším místě ve vnitřní třetině rozpětí nosníku. Ohybová pevnost u deskových těles betonovaných ve vodorovné poloze byla cca o 20 % nižší při zatěžování v obrácené



4 Porovnání ohybové pevnosti vyhodnocené z testů na deskových pruzích 5 Záznamy zkoušek deskových pruhů tloušťky 40 až 80 mm ve tříbodovém ohybu, doplněno numerickou simulací v programu Atena (stejný materiálový model, různé tloušťky desek) 6 Záznamy zkoušek deskových pruhů tloušťky 40 až 80 mm ve čtyřbodovém ohybu, doplněno numerickou simulací v programu Atena (stejný materiál, různé tloušťky desek) ■ 4 Comparison of flexural strength values from bending tests on slab strips 5 Load-deflection diagram of 3-point bending tests on slab strips with thicknesses of 40-80 mm supplied with numerical simulation in the Atena program (the same material model for all thicknesses used) 6 Load-deflection diagram of 4-point bending tests on slab strips with thicknesses of 40-80 mm supplied with numerical simulation in the Atena program (the same material model for all thicknesses used)

Literatura:

- [1] *Ultra high performance fibre-reinforced concrete: Interim Recommendations*. Revised edition. AFGC publication. France: AFGC (Association Francaise de Génie Civil), 2013.
- [2] ČERVENKA, V., ČERVENKA, J., PUKL, R. ATENA – A tool for engineering analysis of fracture in concrete. *Sadhana*. 2002, Vol. 27, No. 4.
- [3] ČSN EN 14651+A1. *Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality, residual)*. Prague: ČNI, 11/2008.
- [4] ČSN EN 196-1. *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*. Prague: ÚNMZ, 10/2016.
- [5] ČSN EN 12390-5. *Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens*. Prague: ÚNMZ, 10/2009.
- [6] ČSN P732452. *Fibre-reinforced concrete – Testing of hardened fibre-reinforced concrete*. Prague: ÚNMZ, 06/2015.
- [7] DUQUE, L. F. M., VARGA, I., GRAYBEAL, B. A. Fibre Reinforcement Influence on the Tensile Response of UHPFRC. In: *First International Interactive Symposium on UHPC 2016*. Des Moines, IOWA, USA, 2016.
- [8] HOLÝ, M., ČÍTEK, D., TEJ, P., VRÁBLÍK, L. Ohybová pevnost tenkých desek z UHPFRC. In: *25. Betonářské dny 2018. Sborník příspěvků konference*. Praha: ČBS, 2018. ISBN 978-80-906759-6-4
- [9] HOLÝ, M., ČÍTEK, D., TEJ, P., VRÁBLÍK, L. Material Properties of Thin UHPC Slabs Used for Timber-Concrete Composite Bridge. In: *The 10th International Conference on Short and Medium Span Bridges (SMSB 2018)*. Quebec, Canada, 2018.
- [10] KOLÍSKO, J., RYDVAL, M., HUŇKA, P. UHPC – Assessment of Steel Fibre Distribution and Matrix Homogeneity. In: *fib Symposium Tel Aviv 2013 Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling & Construction – Proceedings*. Tel Aviv, Israel: IACIE, 2013. pp. 113–116.
- [11] KOLÍSKO, J., BOUŠKA, P., ČÍTEK, D., HUŇKA, P., RYDVAL, M., VOKÁČ, M. *Metodika 1 – Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky* [online]. Výstup projektu TAČR TA 010110269. Klokernův ústav ČVUT v Praze, 2014. Dostupné z: <http://www.klok.cvut.cz/wp-content/uploads/2016/02/Methodika-1-N%C3%A1vrh-a-zkoušky%20pro%20UHPC.pdf>
- [12] PADEVĚZ, P., KŘÍSTEK, V., STROBACH, C. Efekt smykových deformací při ohybových zkouškách kvazikřehkých materiálů. In: *25. Betonářské dny 2018. Sborník příspěvků konference*. Praha: ČBS, 2018. ISBN 978-80-906759-6-4
- [13] ZHOU, B., UCHIDA, Y. Fiber orientation in ultra high performance fiber reinforced concrete and its visualization. In: *Proceedings of 8th International conference on Fracture Mechanics of concrete and Concrete Structures FraMCoS-8*. Toledo, Spain, 2013.

Tab. 2 Porovnání hodnot pevností v tahu za ohybu vyhodnocených z různých typů ohybových zkoušek | **Tab. 2** Comparison of evaluated flexural strength from different types of bending tests

Test č.	Typ zkoušky	Vyhodnocená průměrná ohybová pevnost [MPa]	Porovnání s testem č. 1 [%]	Srovnání 3bod a 4bod [%]
1	4bod, 150 x 150 x 700mm	12,5	100	8
2	3bod, 150 x 150 x 700mm se zářezem	13,5	108	
3	4bod, 100 x 100 x 400mm	17,5	140	9
4	3bod, 100 x 100 x 400mm se zářezem	19,1	153	
5	3bod, 40 x 40 x 160mm bez zářezu	29,9	239	-
6	4bod, tloušťka 40 až 80mm, rozpětí 1 900mm, normálně	16,3	130	25
7	3bod, tloušťka 40 až 80mm, rozpětí 600mm, normálně	20,4	164	
8	3bod, tloušťka 40 až 80mm, rozpětí 600mm, obráceně	17,0	136	-

pozici. Tento rozdíl byl dán nerovnoměrným rozdělením drátků po výšce průřezu vlivem gravitace. Numerickou simulací v programu Atena lze dosáhnout velmi dobré shody s experimenty, ovšem při aproximaci průřezu prvků z UHPC homogenním materiálem nelze materiálový model zcela univerzálně aplikovat pro různé okrajové podmínky a je nutno jej kalibrovat pro konkrétní případy. Na závěr je nutno upozornit na to, že aplikace lineárně elastické teorie zakotvená v normových předpisech pro stanovení ohybové únosnosti neodpovídá skutečnému průběhu napětí v singulárních oblastech, a také na to, že tyto normy nezohledňují při odvozování materiálového diagramu z naměřené závislosti síla-průhyb z ohybové zkoušky vliv smykových deformací, podrobněji v [12].

Experimenty byly provedeny s podporou TAČR v rámci projektu TH02020730 – Využití UHPC pro moderní návrh progresivních sražených dřevo-betonových mostních konstrukcí.

Ing. Milan Holý

Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí
a Kloknerův ústav ČVUT v Praze
milan.holy@fsv.cvut.cz



Ing. Petr Tej, Ph.D.

Kloknerův ústav ČVUT v Praze
petr.tej@cvut.cz



doc. Ing. Jiří Kolisko, Ph.D.

Kloknerův ústav ČVUT v Praze
jiri.kolisko@cvut.cz



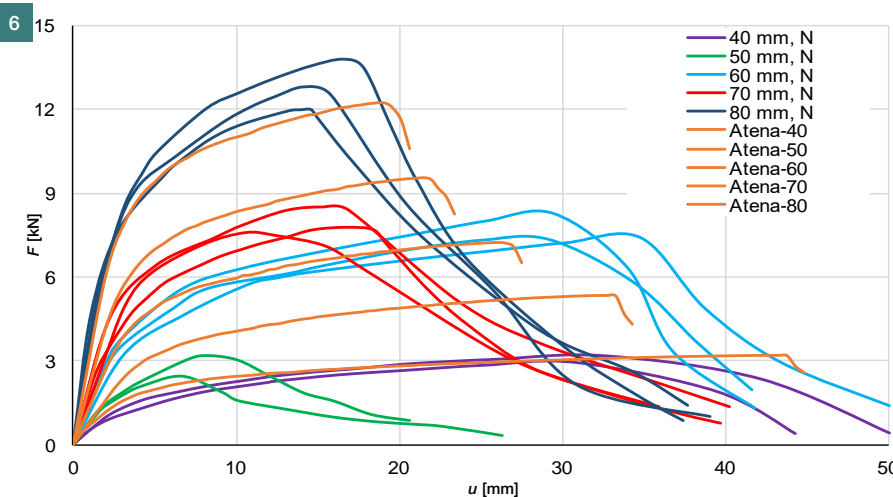
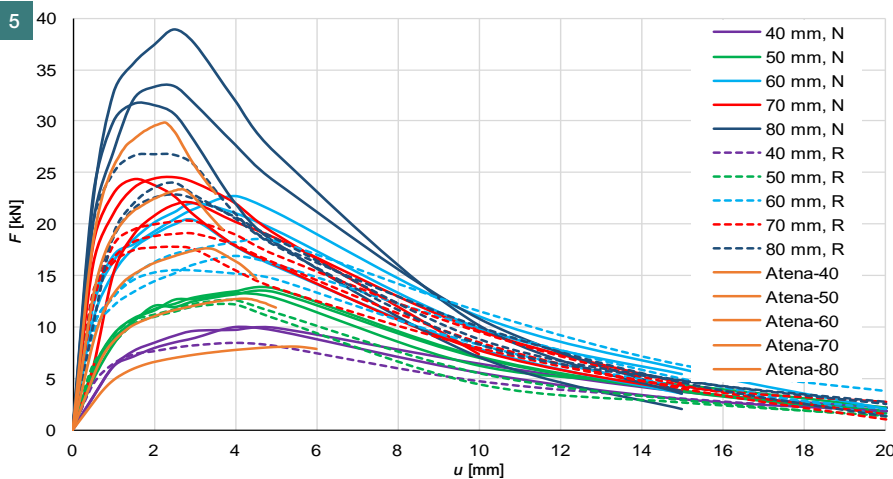
doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových
a zděných konstrukcí
a Novák & Partner, spol. s r. o.
lukas.vrablik@fsv.cvut.cz



Článek byl posouzen odborným lektorem.

The article was reviewed.





Česká betonářská společnost ČSSI
www.cbsbeton.eu



Konference s mezinárodní účastí

26. BETONÁŘSKÉ DNY 2019

spojená s výstavou **BETON 2019**

20. a 21. listopadu 2019 | Hradec Králové, Kongresové centrum ALDIS