

# PREFABRIKOVANÉ NOSNÍKY ULOŽENÉ OZUBEM, ČÁST 2: EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM A NUMERICKÁ ANALÝZA

## ■ PRECAST DAPPED-END BEAMS, PART 2: EXPERIMENTAL PROGRAM AND NONLINEAR ANALYSIS

Michal Hasa, Miloš Zich

Článek se zabývá problematikou detailu uložení prvku ozubem a volně navazuje na předcházející příspěvek autorů. Jsou prezentovány zatěžovací a materiálové zkoušky a navazující fyzikálně nelineární analýza metodou konečných prvků, které byly provedeny zejména za účelem verifikace výpočetního postupu a studie vlivu použitého množství svislé a šikmé vyvšovací výztuže na únosnost a chování detailu během zatěžování. Byla prokázána dostatečná bezpečnost používaného výpočetního postupu. Výsledky poukazují zejména na vhodnost používání šikmé vyvšovací výztuže s ohledem na vznik, rozvoj a výslednou šířku trhlin. ■ This article focuses on the detail of a dapped-end beam and is a follow-up to the previous contribution of the authors. Load and material tests and follow-up nonlinear finite element analysis are presented, which were performed especially with a view to verify the design procedure and the study of influence of the used ratio of vertical to inclined hanger reinforcement on the bearing capacity and behaviour of the detail under load. Sufficient safety of the used design procedure has been proofed. The results point out to the adequacy of using the inclined hanger reinforcement in relation to formation, development and final width of the cracks.

Článek volně navazuje na příspěvek [1], který se zabýval dimenzováním detailu uložení prvku ozubem metodou příhradové analogie. Za největší nevýhodu této metody je však nutné označit její nejednoznačnost (nejedinečnost příhradového modelu), neboť pro jednu modelovou situaci lze totiž teoreticky nalézt nekonečně mnoho řešení. Jedno z možných řešení pro výše uvedený detail je navrženo a prakticky aplikováno v práci [2] a bylo také prezentováno ve výše zmíněném příspěvku.

Pro ověření poměrně komplexního výpočetního postupu, který lze nalézt v práci [2], byl navržen experiment, který by – mimo jiné – také prověřil vliv poměru svislé a šikmé vyvšovací výztuže na únosnost a chování detailu během zatěžování a relevantnost požadavku na rozmístění svislých vyvšovacích třmínků podle německých doporučení (více [1], příp. [2]). V rámci experimentu

byly také provedeny doprovodné materiálové zkoušky betonu, pro které byla vyrobena zkušební tělesa během betónáže nosníků. Výsledky těchto zkoušek sloužily spolu s inspekčními certifikáty použité výztuže jako podklad pro srovnávací fyzikálně nelineární analýzu metodou konečných prvků softwarem ATENA.

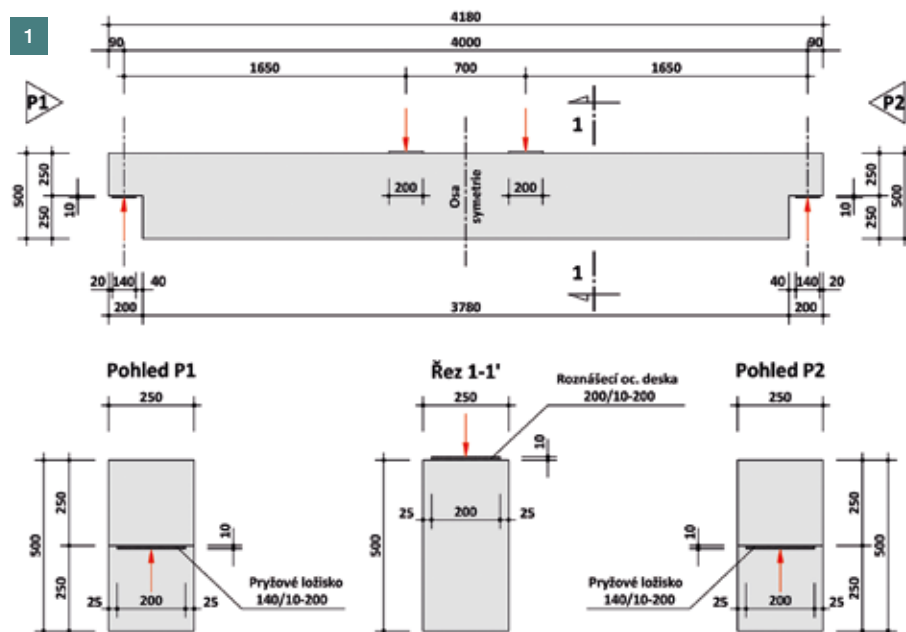
Cílem tohoto příspěvku je prezentovat výsledky provedeného experimentu a navazující numerické analýzy včetně jejich základního srovnání.

### NÁVRH EXPERIMENTU

S ohledem na možnosti testovacího zařízení, ale také s ohledem na praktický a proveditelný způsob vyztužení, který by umožňoval jeho jistou dife-

renciaci vzhledem ke sledovaným parametřům, byl navržen nosník průřezu 500 × 250 mm o teoretickém rozpětí 4 000 mm. Výška ozubu v místě uložení byla zvolena jako polovina výšky nosníku (prakticky nejčastější způsob řešení), jeho vyložení bylo navrženo 200 mm (obr. 1). Poznamenejme, že rozpětí nosníku bylo konfigurováno také s ohledem na dostatečný odstup řešeného detailu od působícího zatížení. Vzdálenost mezi oblastí vyvšovací výztuže ve zhlaví a působícím zatížením odpovídala zhruba známé maximální délce šikmého řezu (2,5z, kde z je rameno vnitřních sil).

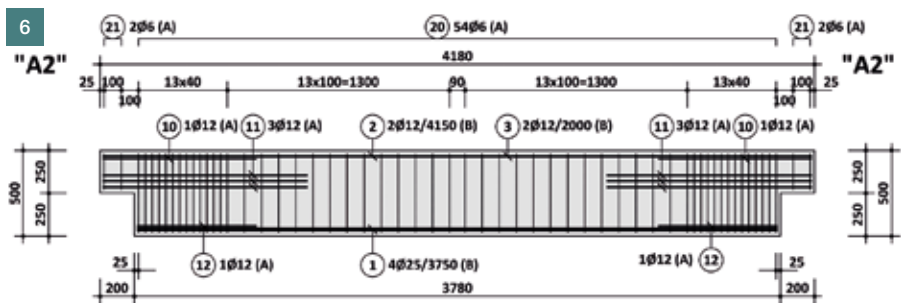
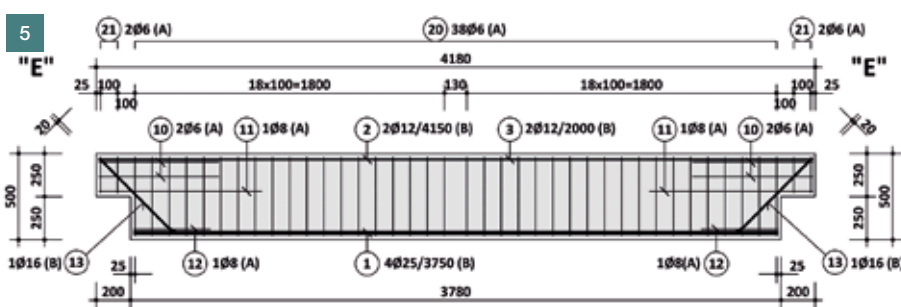
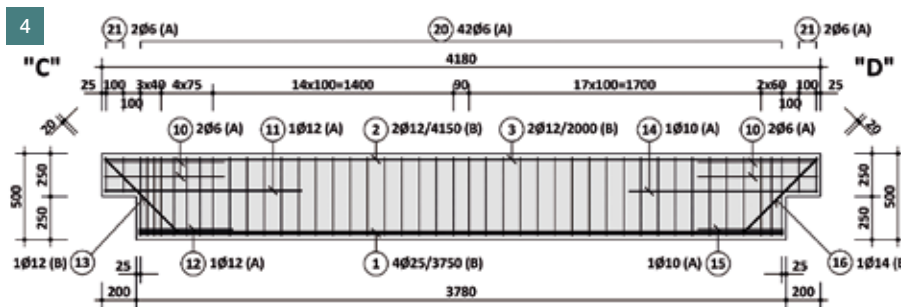
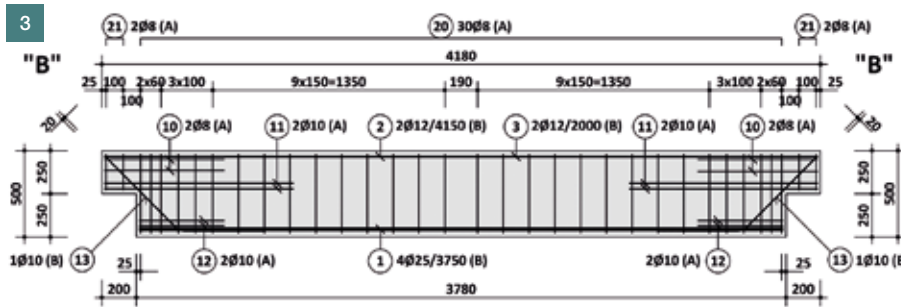
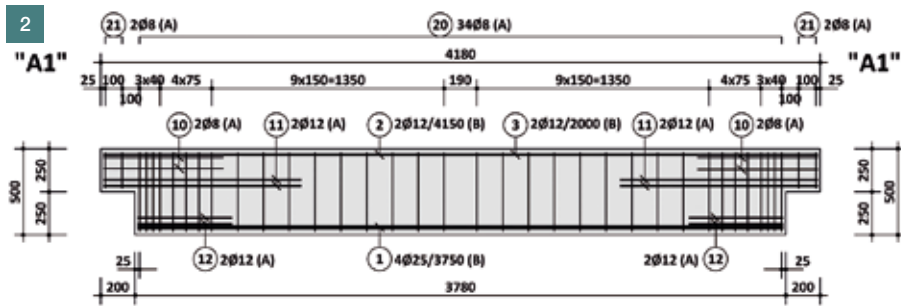
Celkem bylo navrženo šest různých typů vyztužení zhlaví pracovním označe-



Tab. 1 Predikované únosnosti jednotlivých typů zhlaví ■ Tab. 1 Predicted bearing capacities of individual dapped ends

Nosník	Zhlaví	Podíl svislé vyvšovací výztuže	Podíl šikmé vyvšovací výztuže	Predikovaná hodnota únosnosti $V_{pred}$ [kN]
		[%]	[%]	
T1	A1	100	0	200
T2	B	73	27	205
T3	C	58	42	186
	D	44	56	186
T4	E	28	72	193
T5	A2	100	0	198

\* Predikovaná hodnota únosnosti byla vztažena k charakteristické mezi kluzu betonářské výztuže  $f_{yk} = 500$  MPa, viz [2].



ných A1, A2, B, C, D a E. Způsob jejich vyztužení byl zvolen tak, aby bylo ve všech případech výpočtově dosaženo zhruba stejné únosnosti a také aby o porušení ozubu vždy rozhodovala téměř současně únosnost vyvšovací výtzuže a vodorovné výtzuže ozubu, příp. její zakotvení. Zhlaví A1 a A2 byla vyztužena pouze svislými třímínky a vodorovnými smyčkami a vzájemně se lišila pouze oblastí, na které byly vyvšovací třímínky rozmístěny. Zhlaví B, C, D a E byla vyztužena také šikmou výtzuží ve formě prostorové smyčky a vzájemně se lišila podílem svislé a šikmé vyvšovací výtzuže (tab. 1). Vyjma zhlaví A2 byl u všech zhlaví splněn požadavek na rozmístění svislých třímínek podle německých doporučení (více v [1], příp. [2]).

Vzhledem k předpokládanému rozsahu experimentu a podobnosti zhlaví C a D bylo nakonec vyrobeno pouze pět nosníků označených T1 až T5, z nichž nosník T3 měl rozdílně vyztužená zhlaví. Z hlediska ohybu a smyku byly nosníky nadimenzovány tak, aby primárně došlo k porušení v místech jejich zhlaví. Vyztužení jednotlivých nosníků a jejich zhlaví je uvedeno na obr. 2 až 6 a také na obr. 7 až 12.

Nosníky byly navrženy z betonu pevnostní třídy C35/45 a výtzuže B500A, resp. B500B (tažnost jednotlivých položek výtzuže je uvedena na obr. 2 až 6 vždy v závorce). Navržená geometrie i vyztužení odpovídají reálnému zhlaví.

V každém zhlaví byly před betonáží nosníků umístěny odporové tenzometry pro měření poměrných přetvoření na:

- prvním třímínku první sady vyvšovací výtzuže,
- posledním třímínku první sady vyvšovací výtzuže,
- šikmé vyvšovací výtzuži,
- první smyčce tahové výtzuže ozubu.

Výroba nosníků proběhla ve výrobní hale firmy IP systém a.s. v Olomouci. Při výrobě jednotlivých nosníků byla také zhotovena zkušební tělesa pro provedení doprovedných materiálových zkoušek betonu.

1 Tvar zkušebního nosníku a schéma zatěžovací zkoušky 2 Vyztužení nosníku T1 (zhlaví A1) 3 Vyztužení nosníku T2 (zhlaví B) 4 Vyztužení nosníku T3 (zhlaví C a D) 5 Vyztužení nosníku T4 (zhlaví E) 6 Vyztužení nosníku T5 (zhlaví A2)

1 Beam specimen and loading test arrangement 2 Beam reinforcement T1 (dapped end A1) 3 Beam reinforcement T2 (dapped end B) 4 Beam reinforcement T3 (dapped ends C and D) 5 Beam reinforcement T4 (dapped end E) 6 Beam reinforcement T5 (dapped end A2)

## MATERIÁLOVÉ ZKOUŠKY BETONU

Součástí experimentu byly také materiálové zkoušky betonu, a to krychelné a hranolové pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a modulu pružnosti. Celkem bylo vyrobeno deset zkušebních těles – šest hranolů o rozměrech 400 × 100 × 100 mm a čtyři krychle o hraně 150 mm. Zkoušky proběhly v laboratořích Fakulty stavební VUT v Brně a jejich výsledky jsou uvedeny v tab. 2 až 4.

Na základě výsledků zkoušek lze konstatovat, že ačkoli průměrná válcová pevnost betonu v tlaku  $f_{cm}$  (uvažujeme-li ji jako cca 80 až 85 % z průměrné krychelné pevnosti v tlaku, tj.  $f_{cm} = \text{cca } 0,825 f_{cm,cube} \rightarrow 64,7 \text{ MPa}$ ) odpovídala pevnostní třídě až C55/67 ( $f_{cm} = 63 \text{ MPa}$ ), průměrná tahová pevnost betonu  $f_{ctm}$  (na základě přepočtu mezi průměrnou pevností betonu v tahu za ohybu  $f_{ctm,fl}$  a průměrnou pevností v prostém tahu  $f_{ctm}$  podle [3]  $\rightarrow 2,76 \text{ MPa}$ ) odpovídala přechodu mezi pevnostními třídami C25/30 a C30/37 ( $f_{ctm} = 2,6$  až  $2,9 \text{ MPa}$ ) a modul pružnosti odpovídal pouze pevnostní třídě betonu C25/30 ( $E_{cm} = 30 \text{ GPa}$ ) podle Tab. 3.1 normy [4].

Podle dostupných informací mělo kamenivo použité k výrobě zkušebních nosníků majoritní zastoupení křemene a pískovce, což znamená, že by měl být normový „tabulkový“ modul pružnosti redukován až o 30 %, viz článek 3.1.3 (2) normy [4]. Za tohoto předpokladu by pak bylo možné považovat naměřený modul pružnosti za dostatečný (pro projektovanou třídu betonu C35/45 vychází  $E_{cm,red} = 23,8 \text{ GPa}$ , pro třídu C55/67 vychází  $E_{cm,red} = 26,6 \text{ GPa}$ ). Nicméně, problematika „tabulkových“ hodnot modulu pružnosti uváděných v normě [4] již byla v odborných kruzích několikrát diskutována se závěrem, že jsou tyto hodnoty nadhodnoceny, viz také např. [5].

## PRŮBĚH A VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK

Zatěžovací zkoušky nosníků probíhaly v laboratořích Fakulty stavební VUT v Brně. Nosníky byly při zkoušce uloženy přes pryžová ložiska na ocelové zkušební rámy a zatěžovány dvěma silami podle obr. 1. Síly byly vyvozovány hydraulickými lisami přes ocelové roznášecí desky. U nosníků T1, T2 a T3 byla zkouška ukončena dosažením extrémní síly, při které již nedocházelo k jejímu růstu, ale docházelo pouze ke zvětšování deformací. U nosníků T4 a T5 bylo i po tomto okamžiku prováděno další přitěžování, a to až do jejich úplné-

**Tab. 2** Naměřené krychelné pevnosti betonu v tlaku (podle [9]) ■ **Tab. 2** Measured compressive cube strength of concrete [9]

Označení vzorku	Stáří [d]	Rozměry			Hmotnost [kg]	Síla při porušení [kN]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
		a [mm]	b [mm]	h [mm]				
T2/1	44	149,4	149,6	150,3	8,007	1 719,5	2 384	76,9
T2/2	44	150,3	149,1	150,7	8,040	1 731,4	2 381	77,3
T3/1	43	149,5	149,6	150,3	8,008	1 723,5	2 383	77,1
T3/2	43	150,3	149,6	150,3	8,057	1 851,1	2 384	82,3
Průměr								78,4

**Tab. 3** Naměřené hranolové pevnosti betonu v tlaku a moduly pružnosti (podle [9]) ■

**Tab. 3** Measured compressive prismatic strength and elastic modulus of concrete [9]

Označení vzorku	Stáří [d]	Rozměry			Hmotnost [kg]	Síla při porušení [kN]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Hranolová pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
		a [mm]	b [mm]	l [mm]					
T1	45	100,6	100,8	400,1	9,519	661,5	2 348	65,3	*
T3	43	100,6	101,2	400,1	9,566	665,0	2 348	65,3	30 200
T5/1	41	100,8	100,2	400,1	9,527	596,8	2 359	59,1	*
T5/2	41	100,6	99,9	400,4	9,532	591,5	2 367	58,8	29 300
Průměr								62,1	29 750

\* Vzorky T1 a T5/1 sloužily pro nastavení úrovně zatěžování při zjišťování modulu pružnosti.

**Tab. 4** Naměřené pevnosti betonu v tahu za ohybu (podle [9]) ■ **Tab. 4** Measured flexural tensile strength of concrete [9]

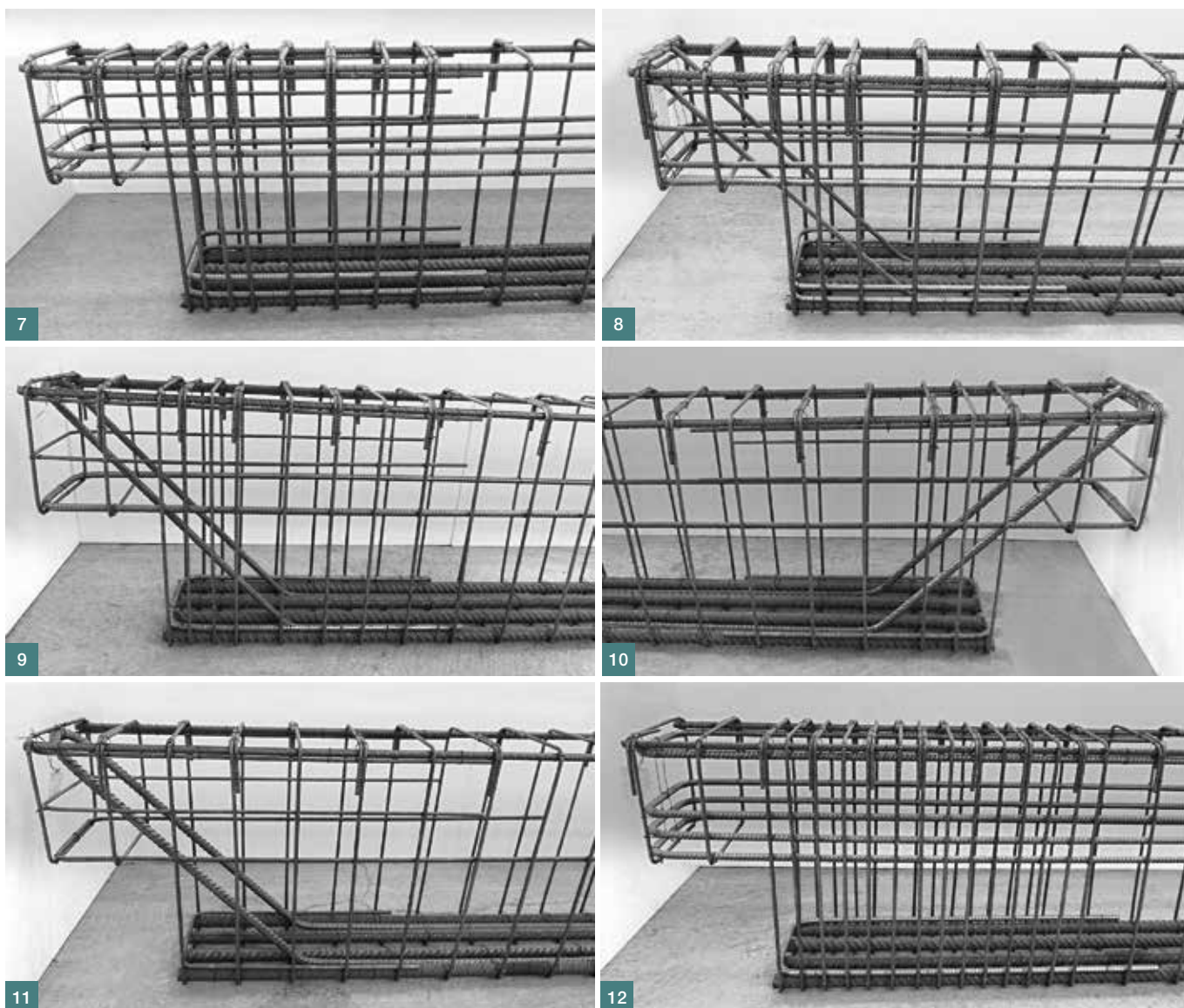
Označení vzorku	Stáří [d]	Rozměry			Hmotnost [kg]	Síla při porušení [kN]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
		a [mm]	b [mm]	l [mm]				
T2	44	101,0	101,3	400,2	9,562	17,1	2336	4,96
T4	42	100,6	101,4	400,0	9,567	14,5	2343	4,23
Průměr								4,60

**Tab. 5** Mez únosnosti jednotlivých zhlaví ■ **Tab. 5** Ultimate bearing capacities of individual dapped ends

Nosník	Zhlaví	Podíl svislé vyvážovací výztuže	Podíl šikmé vyvážovací výztuže	Predikovaná hodnota únosnosti $V_{pred}$	Mezní únosnost stanovená experimentálně	Poměr $V_{exp}/V_{pred}$
		[%]	[%]	[kN]	[kN]	[-]
T1	A1	100	0	200	266	1,33
T2	B	73	27	205	282	1,38
T3	C	58	42	186	277	1,49
	D	44	56	186		
T4	E	28	72	193	274	1,42
T5	A2	100	0	198	252	1,27

**Tab. 6** Šířky trhlin pro různé intenzity zatížení ■ **Tab. 6** Widths of the cracks for different load intensities

Nosník	Zhlaví	Podíl svislé vyvážovací výztuže	Podíl šikmé vyvážovací výztuže	Maximální šířka trhlin při zatížení 80 kN	Maximální šířka trhlin při zatížení 140 kN	Maximální šířka trhlin při mezním zatížení
		[%]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]
T1	A1	100	0	0,20	0,60	4,00
T2	B	73	27	0,20	0,30	1,50
T3	C	58	42	0,10	0,25	3,00
	D	44	56	0,10	0,25	2,00
T4	E	28	72	0,10	0,25	1,50
T5	A2	100	0	0,25	0,70	4,00



**Tab. 7** Průměrné materiálové charakteristiky použitého betonu (podle [9]) ■ **Tab. 7** Average material properties of used concrete [9]

Krychelná pevnost v tlaku	$f_{cm,cube}$	[MPa]	78,4
Hranolová pevnost v tlaku	$f_{cm,prism}$	[MPa]	62,1
Pevnost v tahu za ohybu	$f_{ctm,fl}$	[MPa]	4,6
Modul pružnosti	$E_c$	[MPa]	29 750

**Tab. 8** Vybrané parametry materiálového modelu SBETA s označením veličin (podle [6]) ■ **Tab. 8** Selected parameters of constitutive model SBETA with magnitudes designated according to [6]

Krychelná pevnost v tlaku (výchozí)	$f_{cu}$	[MPa]	78,4
Tahová pevnost (upravená)	$f_t$	[MPa]	2,76
Modul pružnosti (upravený)	$E_c$	[MPa]	29 750
Lomová energie (upravená)	$G_f$	[N/m]	69

ho porušení. V obou případech došlo k destrukci v místě zhlaví.

Při zkoušce byla prováděna následující měření:

- měření změn sil v jednotlivých hydraulických lisech,
- měření změn svislých posunů (průhybů na krajích a uprostřed nosníku),
- měření zkrácení betonu ve směru předpokládané hlavní tlačené diagonály,
- měření změn poměrných přetvoření na vybraných položkách betonářské výztuže.

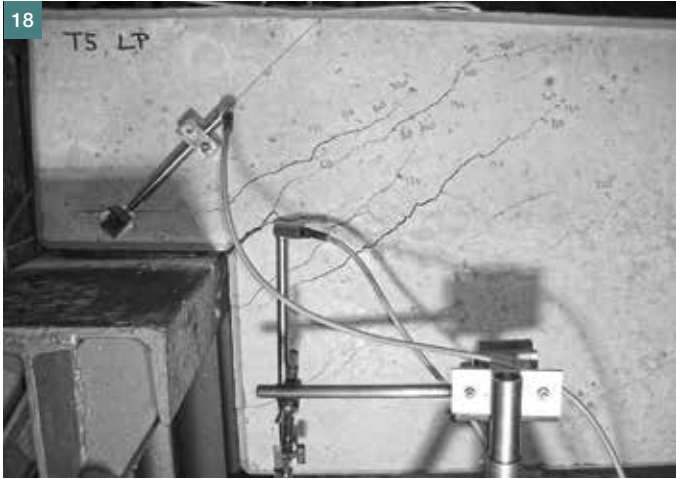
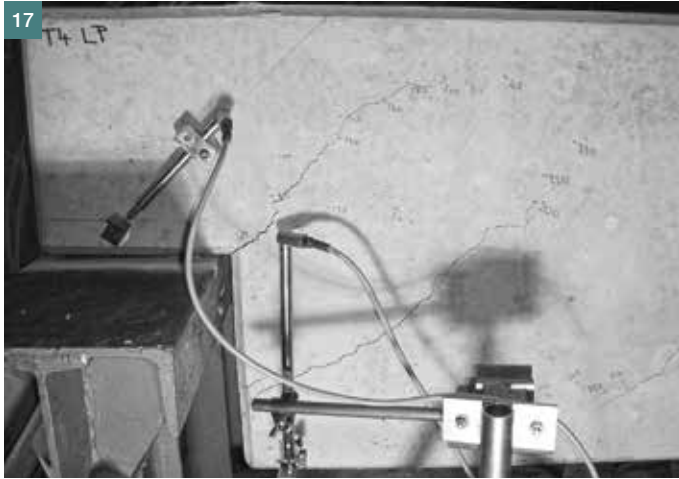
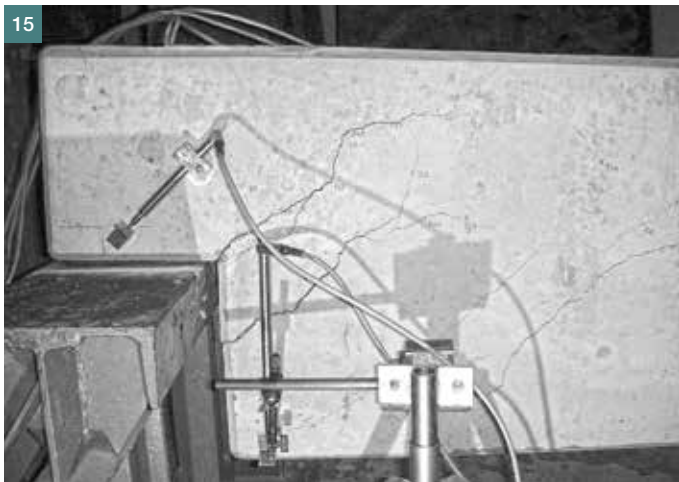
U všech typů vyztužení bylo dosaženo zhruba stejné hodnoty únosnosti.

Mírně vyšší únosnost vykázala zhlaví se šikmou výztuží (tab. 5). Absence šikmé výztuže měla ovšem zásadní vliv na vznik, rozvoj a výslednou šířku trhlin. Zhlaví opatřená šikmou výztuží vykazovala ve všech stádiích zatěžování zhruba poloviční šířku trhlin než zhlaví, která tuto výztuž neměla (tab. 6 a obr. 13 až 18). Způsob porušení zhlaví E a A2 je zobrazen na obr. 19. Výrazně negativní vliv nedodržení požadavku na rozmístění svislých třmínků se v případě zhlaví A2 sice neprokázal, nicméně, u tohoto zhlaví bylo jednak dosaženo nejnižší únosnosti a jednak nebylo možné pozorovat prakticky žádné duktilní chování.

**7** Výztuž zhlaví A1 **8** Výztuž zhlaví B **9** Výztuž zhlaví C **10** Výztuž zhlaví D **11** Výztuž zhlaví E **12** Výztuž zhlaví A2 ■ **7** Dapped-end reinforcement A1 **8** Dapped-end reinforcement B **9** Dapped-end reinforcement C **10** Dapped-end reinforcement D **11** Dapped-end reinforcement E **12** Dapped-end reinforcement A2

## NUMERICKÁ ANALÝZA EXPERIMENTU

Pro fyzikálně nelineární analýzu byl použit program ATENA 2D verze 5 firmy Červenka Consulting s. r. o. Úloha byla modelována jako rovinná napjatost a bylo využito symetrie geometrie a zatížení (obr. 20).



Pro beton byl použit materiálový model SBETA [6], s vybranými parametry upravenými v závislosti na výsledcích materiálových zkoušek. Vzhledem k tomu, že zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a modulu pružnosti nebyly provedeny pro všechny nosníky (zhlaví), byla pro nelineární analýzu uvažována pouze jedna sada průměrných parametrů betonu shodná pro všechna zhlaví (tab. 7).

Pro stanovení potřebné hodnoty průměrné pevnosti betonu v prostém tahu  $f_{ctm}$  byl použit převodní vztah mezi touto pevností a naměřenou průměrnou pevností v tahu za ohybu  $f_{ctm,fl}$  z Model Code 1990 [3]. Pro výpočet lomové energie, která s pevností betonu v tahu přímo souvisí, byl použit výchozí vztah z teoretického manuálu [6]. V tab. 8 jsou uvedeny vybrané parametry modelu SBETA, které byly uvažovány ve výpočtu.

Výztuž byla modelována pomocí bilineárního pracovního diagramu se zpevněním a omezeným poměrným přetvořením. Jednotlivým položkám výztuže byly přiřazeny parametry odpovídající hodnotám z inspekčních certifikátů od výrobců (tab. 9). Poměrné přetvoření na mezi kluzu bylo dopočteno za předpokladu modulu pružnosti betonářské oceli  $E = 200$  GPa.

**Tab. 9** Parametry použité výztuže (podle [10]) ■ **Tab. 9** Parameters of used reinforcement according to [10]

Použitá betonářská ocel		Mez kluzu $R_e / R_{p0,2} (f_y / f_{0,2})$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu $R_m (f_t)$ [MPa]	Celkové prodloužení při max. zatížení $A_{gt} (\epsilon_U)$ [%]
Průměr	Značka oceli			
6	B500A	548	597	4,4
8		574	614	4,4
10		580	626	4,3
12		574	626	5,0
10		559	631	10,0
12	B500B	554	636	16,5
14		562	622	9,7
16		580	651	14,0
25		536	629	11,9

**Tab. 10** Srovnání vypočtených a naměřených mezních únosností ■ **Tab. 10** Comparison between calculated and measured ultimate bearing capacities

Nosník	Zhlaví	Podíl svislé vyvážovací výztuže	Podíl šikmé vyvážovací výztuže	Mezní únosnost stanovená nel. výpočtem $V_{NFEA}$	Mezní únosnost stanovená experimentem $V_{exp}$	Poměr $V_{NFEA}/V_{exp}$
		[%]	[%]	[kN]	[kN]	[-]
T1	A1	100	0	275	266	1,03
T2	B	73	27	280	282	0,99
T3	C	58	42	273	277	0,99
	D	44	56	274		0,99
T4	E	28	72	280	274	1,02
T5	A2	100	0	258	252	1,02

**Tab. 11** Srovnání vypočtených a naměřených průhybů a šířek trhlin při mezním zatížení ■

**Tab. 11** Comparison between calculated and measured deflections and crack widths

Nosník	Zhlaví	Nelineární výpočet		Experiment	
		Průhyb při mezním zatížení (relativní)	Max. šířka trhlin při mezním zatížení	Průhyb při mezním zatížení (relativní)	Max. šířka trhlin při mezním zatížení
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
T1	A1	20,2	3,10	19,4	4,00
T2	B	25,1	3,20	26,2	1,50
T3	C	19,0	3,30	25,7	3,00
	D	19,7	3,60		2,00
T4	E	24,9	1,90	22,2	1,50
T5	A2	16,1	4,40	17,1	4,00

**Tab. 12** Experimentálně zjištěný a vypočtený stupeň bezpečnosti pro jednotlivá zhlaví ■

**Tab. 12** Experimental and calculated safety factor for individual dapped ends

Nosník	Zhlaví	Podíl svislé vyvážovací výztuže	Podíl šikmé vyvážovací výztuže	Únosnost podle DIN 1045-88 [7] odpovídající cca $V_{char}$	St. bezpečnosti stanovený experimentálně $S_{exp}$	St. bezpečnosti stanovený nel. výpočtem $S_{NFEA}$
		[%]	[%]	[kN]	[-]	[-]
T1	A1	100	0	114	2,33	2,41
T2	B	73	27	117	2,41	2,39
T3	C	58	42	106	2,61	2,58
	D	44	56	106	2,61	2,58
T4	E	28	72	110	2,49	2,55
T5	A2	100	0	113	2,23	2,28

**13** Zhlaví A1 při dosažení mezního zatížení, maximální šířka trhliny 4 mm **14** Zhlaví B při dosažení mezního zatížení, maximální šířka trhliny 1,5 mm **15** Zhlaví C při dosažení mezního zatížení, maximální šířka trhliny 3 mm **16** Zhlaví D při dosažení mezního zatížení, maximální šířka trhliny 2 mm **17** Zhlaví E při dosažení mezního zatížení, maximální šířka trhliny 1,5 mm **18** Zhlaví A2 při dosažení mezního zatížení, maximální šířka trhliny 4 mm **19** Porušení: a) zhlaví E, b) zhlaví A2 ■ **13** Dapped end A1 at an ultimate load, max. crack width 4 mm **14** Dapped end B at an ultimate load, max. crack width 1.5 mm **15** Dapped end C at an ultimate load, max. crack width 3 mm **16** Dapped end D at an ultimate load, max. crack width 2 mm **17** Dapped end E at an ultimate load, max. crack width 1.5 mm **18** Dapped end A2 at an ultimate load, max. crack width 4 mm **19** Failure mode of: a) dapped end E, b) dapped end A2

Roznášecí ocelová deska byla modelována jako pružný materiál s modulem pružnosti  $E = 210$  GPa a Poissonovým číslem  $\mu = 0,3$ . Podepření simulující uložení nosníku na elastomerickém ložisku bylo modelováno zjednodušeně pomocí pružiny s lineárním chováním v tlaku a s vyloučeným přenosem tahu. Tuhost pružiny byla stanovena reverzní analýzou na základě pozorovaného chování ložiska během zkoušek a byla uvažována hodnotou  $E = 0,03$  GPa ( $30 \text{ MN/m}^2$ ).

**VÝSLEDKY NUMERICKÉ ANALÝZY A JEJICH SROVNÁNÍ S EXPERIMENTEM**

Pro stanovení mezního zatížení bylo použito řízené deformace v místě působící síly, a to s konstantním přírůstkem  $1,0 \text{ mm}$ /zatěžovací krok (obr. 21).

Hodnoty mezních únosností se velmi dobře shodují s hodnotami naměřenými při zatěžovací zkoušce (tab. 10). Na obr. 22 lze pozorovat velmi dobrou shodu mezi nelineárním výpočtem a experimentem. Nepatrně rozdílné výsledky v porovnání s experimentem byly dosaženy v rámci průhybů a šířek trhlin (tab. 11). Tvar trhlin v jednotlivých zhlavích při mezním zatížení je uveden na obr. 23.

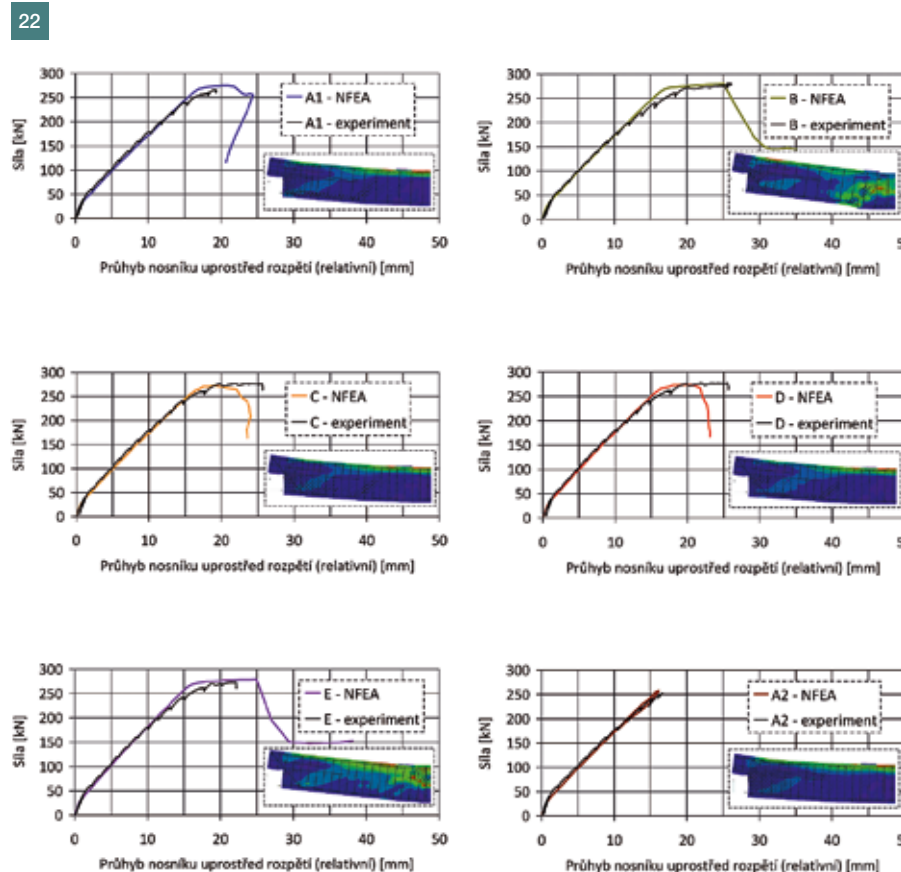
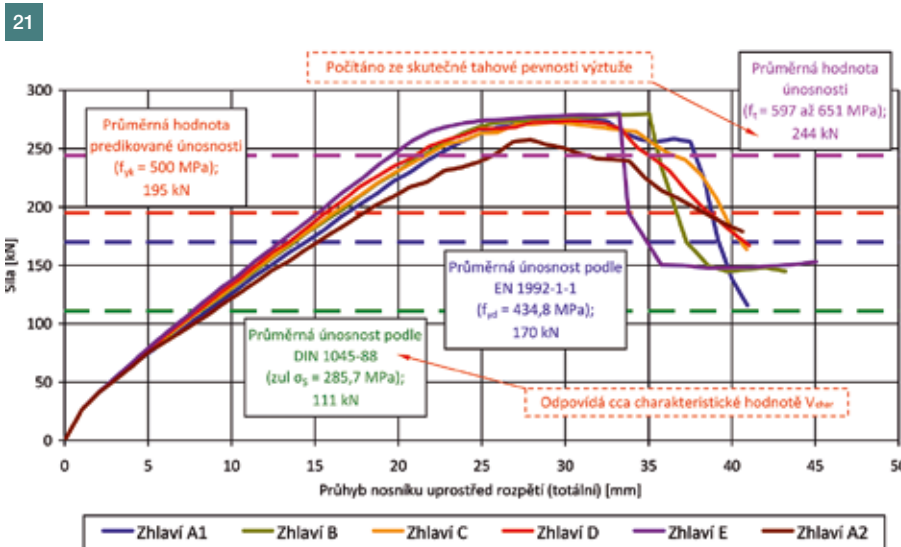
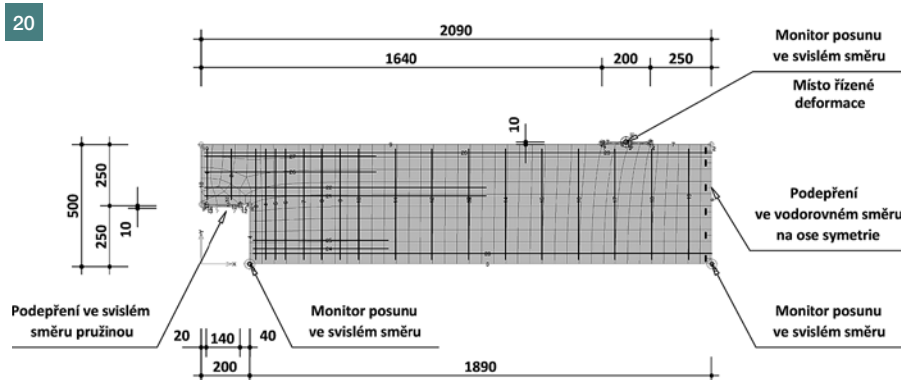
Mírnou neshodu mezi výsledky experimentu a numerické analýzy bylo však možné pozorovat v rámci srovnatelných naměřených a vypočtených poměrných přetvoření na vybraných položkách výztuže. Přestože použité tenzometry měly být svými parametry pro experiment dostačující, většina z nich selhala mnohem dříve, než bylo vůbec dosaženo mezního zatížení. Nelineární analýza však prokázala, že z praktického hlediska byl předpoklad výpočtu o namáhání veškeré vyvážovací výztuže a vodorovné výztuže ozubu v mezním stavu (při mezním zatížení) napětím na mezi kluzu splněn. Zatímco u zhlaví A2 se způsob porušení při experimentu a při nelineární

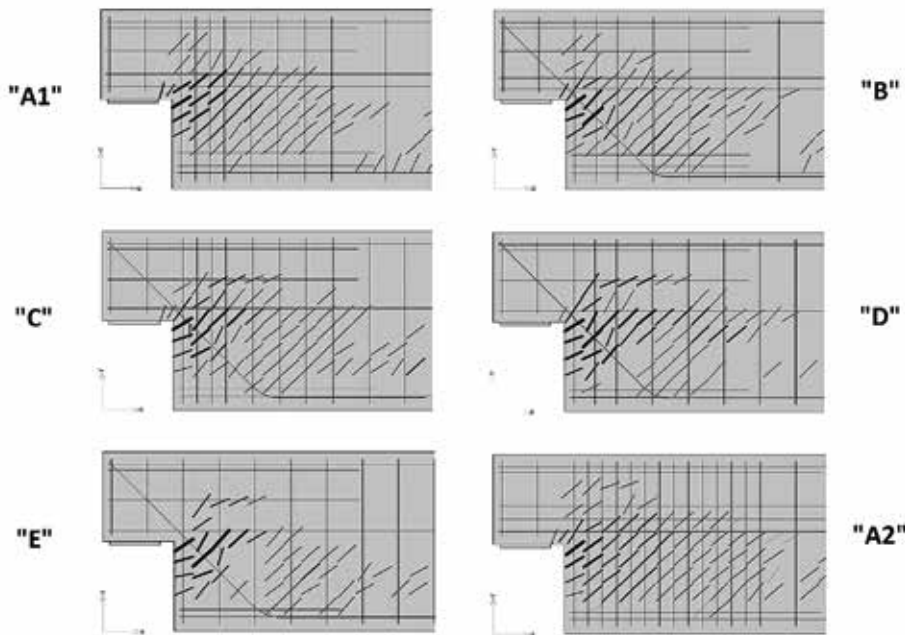
**20** Model v programu ATENA (zhlaví A1)

**21** Velikost působící síly v závislosti na průhybu uprostřed nosníku **22** Srovnání zatěžovacích zkoušek a nelineární analýzy pro jednotlivá zhlaví

**23** Tvar trhlin v jednotlivých zhlavích při dosažení mezního zatížení (zobrazeny jsou pouze trhliny šířky větší než  $0,30 \text{ mm}$ )

**20** Model in software ATENA (dapped end A1) **21** Intensity of acting force as a function of midspan deflection **22** Comparison between load tests and nonlinear analysis for individual dapped ends **23** Crack pattern in individual dapped ends at an ultimate load (cracks wider than  $0.30 \text{ mm}$  are displayed only)





23

analýze shodoval, u zhlaví E se způsob porušení při experimentu nelineární analýzou prokázal nepodařilo.

Bezpečnost návrhu lze vyjádřit pomocí stupně bezpečnosti  $s$ , který – analogicky ke starším normovým ustanovením – uvažujeme jako poměr naměřené nebo vypočítané mezní únosnosti a charakteristické (normové) hodnoty účinku zatížení. Stejný princip posouzení byl v podstatě uplatňován i při navrhování podle německé normy DIN 1045 z roku 1988 [7], podle které byla jednotlivá zhlaví v práci [2] také posuzována. Únosnost podle této normy lze tedy v podstatě považovat za maximální možnou charakteristickou hodnotu účinku zatížení ve smyslu dnešních norem (tab. 12). Stupeň bezpečnosti se pro jednotlivá zhlaví pohyboval v rozmezí 2,23 až 2,61 v případě experimentu, resp. 2,28 až 2,58 v případě nelineární analýzy (také tab. 12). Vzhledem k předpokládanému způsobu porušení (porušení vyvážovací výztuže, příp. vodorovné výztuže ozubem) lze tyto hodnoty v kontextu normy DIN 1045-88 [7], příp. normy ČSN 73 2001 [8], považovat za hodnoty dostatečné (bezpečné).

## ZÁVĚR

Experiment a jeho následná fyzikálně nelineární analýza úspěšně ověřily výpočetní postup používaný pro dimenzování detailu uložení prvku ozubem. Z výsledků také vyplývá, že volba poměru svislé a šikmé vyvážovací výztuže nemá v rámci praktického vyztužování zásadní vliv na mezní únosnost, ale pouze na vznik, rozvoj a výslednou

šířku trhlin. S ohledem na jejich omezení v provozním stadiu se doporučuje používat alespoň konstrukční šikmou výztuž. Výrazně negativní vliv nedodržení požadavku na rozmístění svislých třmínků se v tomto případě neprokázal, nicméně s ohledem na „duktilitu detailu“ se doporučuje tento požadavek pokud možno dodržovat. Podrobnější výsledky lze nalézt v práci [2].

Poděkování patří Ing. Petru Daňkovi, Ph.D., z Ústavu stavebního zkušebnictví, který prováděl osazování tenzometrů, materiálové zkoušky betonu a vlastní měření při zatěžovacích zkouškách nosníků.

Článek byl vytvořen v rámci projektu TH03020446 „Vývoj dispozičně variabilnější panelové soustavy pro bytové domy“ s finanční podporou TA ČR.

Experimentální část výzkumu byla realizována firmou IP systém a.s. ve spolupráci s Ústavem betonových a zděných konstrukcí FAST VUT v Brně v rámci inovačního vouchery č. 2013050011 Jihomoravského kraje.

Ing. Michal Hasa, Ph.D.  
IP systém a.s.  
michal.hasa@ipsystem.cz



doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.  
Fakulta stavební VUT v Brně  
zich.m@fce.vutbr.cz



Článek byl posouzen odborným lektorem.  
The article was reviewed.

## Literatura:

- [1] HASA, M., ZICH, M. Prefabrikované nosníky uložené ozubem, Část 1: Dimenzování metodou příhradové analogie. *Beton TKS*. 2019, roč. 19, č. 2, s. 52–60.
- [2] HASA, M. *Návrh a posouzení prefabrikovaných nosníků uložených ozubem*. Brno, 2018. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí.
- [3] CEB-FIP Model Code: 1990. *Design Code*. London: Thomas Telford, 1993. ISBN 0-7277-1696-4
- [4] ČSN EN 1992-1-1: 2011. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2011.
- [5] Technická pravidla ČBS 05. *Modul pružnosti betonu*. Praha: Česká betonářská společnost ČBSI, 2016. ISBN 978-80-906097-5-4
- [6] ČERVENKA, V., JENDELE, L., ČERVENKA, J. *ATENA Program Documentation. Part 1. Theory*. Prague: Červenka Consulting, únor 2016.
- [7] DIN 1045: 1988. *Beton und Stahlbeton: Bemessung und Ausführung*. Berlin: Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Juli 1988.
- [8] ČSN 73 2001: 1970. *Projektování betonových staveb*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, červenec 1970.
- [9] ZICH, M., DANĚK, P., SLÁNSKÝ, B. *Experimentální ověření únosnosti smykových ozubů prefabrikovaných nosníků. Výzkumná zpráva*. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, 2014.
- [10] *Inspekční certifikáty č. 924/13/a, 1104/13/a, 1143/13/a a 1169/13/a* (f. Železářny-Annahütte, spol. s r. o., 2013), č. 1000086550, 1000134024 a 1000123215 (f. ArcelorMittal Ostrava, a. s., 2013), č. 73525009 (f. CELSA Huta Ostrowiec Sp. z o. o., 2013) a č. 80995165 125800E726 (f. CMC Poland Sp. z o. o., 2013).