

EVIDENČNÍ FORMULÁŘ

1. Tvůrce(i):

<i>Jméno a příjmení, titul:</i>	Oldřich Sucharda, Ing. Bc., Ph.D.
<i>Adresa bydliště:</i>	Tilschové 4/839, 709 00 Ostrava – Mar. Hory, ČR
<i>Název zaměstnavatele:</i>	VŠB – TU Ostrava
<i>Sídlo zaměstnavatele:</i>	17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava
<i>IČ zaměstnavatele:</i>	61989100
<i>Oddělení/útvary:</i>	Fakulta stavební, Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb
<i>Telefonní číslo/a:</i>	+420 597 321 382 <i>E-mail:</i> oldrich.sucharda@vsb.cz
<i>Příspěvek tvůrce (slovně):</i>	Experimentální zkoušky nosníků, vyhodnocení laboratorních zkoušek, numerické modelování nosníků a nelineární analýza
<i>Podíl na řešení v %:</i>	25
<i>Jméno a příjmení, titul:</i>	Vlastimil Bílek, doc. Ing., Ph.D.
<i>Adresa bydliště:</i>	9. května 781, 664 53 Újezd u Brna
<i>Název zaměstnavatele:</i>	ŽPSV s.r.o.
<i>Sídlo zaměstnavatele:</i>	Třebízského 207, 687 24 Uherský Ostroh
<i>IČ zaměstnavatele:</i>	46346741
<i>Oddělení/útvary:</i>	technické oddělení, inženýr technolog
<i>Telefonní číslo/a:</i>	+420 602 744 586 <i>E-mail:</i> bilek@zpsv.cz
<i>Příspěvek tvůrce (slovně):</i>	Vývoj nových receptur pokročilých betonů, zodpovědný za postup technologii výroby v betonárně – průmyslová výroba
<i>Podíl na řešení v %:</i>	25
<i>Jméno a příjmení, titul:</i>	Pavčina Matečková, Ing. Ph.D.
<i>Adresa bydliště:</i>	Křížkovského 22, 712 00 Ostrava
<i>Název zaměstnavatele:</i>	VŠB – TU Ostrava
<i>Sídlo zaměstnavatele:</i>	17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava
<i>IČ zaměstnavatele:</i>	61989100
<i>Oddělení/útvary:</i>	Katedra konstrukcí
<i>Telefonní číslo/a:</i>	+420 597 321 394 <i>E-mail:</i> pavlina.mateckova@vsb.cz
<i>Příspěvek tvůrce (slovně):</i>	Konstrukční návrh nosníků s využitím pokročilých betonů a koordinace projektu za VŠB – TU Ostrava
<i>Podíl na řešení v %:</i>	25
<i>Jméno a příjmení, titul:</i>	Stanislav Seitl, doc. Ing., Ph.D.
<i>Adresa bydliště:</i>	Větrná 614/18, Brno 635 00
<i>Název zaměstnavatele:</i>	Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.
<i>Sídlo zaměstnavatele:</i>	Žižkova 513/22, 616 62 Brno, Česká republika
<i>IČ zaměstnavatele:</i>	68081723
<i>Oddělení/útvary:</i>	Skupina vysokocyklové únavy
<i>Telefonní číslo/a:</i>	532290361 <i>E-mail:</i> seitl@ipm.cz
<i>Příspěvek tvůrce (slovně):</i>	Specializované zkoušky mechanických vlastností betonu – Brazílský test a únavové zkoušky, koordinace projektu za Ústav fyziky materiálů AV ČR
<i>Podíl na řešení v %:</i>	25

Handwritten signature

2. Informace o projektu

Název projektu, v rámci kterého předkládaný výsledek vznikl:

Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů

Evidenční číslo projektu přidělené poskytovatelem:

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004505

Doba řešení projektu:

01.01.2017 – 23.09.2019

Stručný popis projektu:

Projekt se zabývá vývojem receptur betonů pro návrh nosníků, zejména mostních nosníků, ale také dalších nosných konstrukcí. Nově vyvíjené směsi pokročilých betonů se vyvíjí s ohledem na maximální environmentální efekt a splnění požadavků udržitelného rozvoje betonových konstrukcí. Vyvíjeny byly zejména vysokopevnostní betony s optimalizovanou recepturou pro specifická návrhová kritéria a alkalicky aktivované betony, přičemž součástí projektu je optimalizace a ověření technologie výroby v průmyslových podmínkách. Konstruktivní prvky pak budou optimalizovány vzhledem k novým vlastnostem betonů, a to s důrazem na trvanlivost betonu a na jeho vlastnosti při únavovém zatížení. Vyvinuté betony budou ověřeny také experimentálně v rámci vybraných prototypových nosníků z navržené modulové řady. Vývoj pokročilých betonů a návrh nosníků zahrnuje pokročilé numerické modelování zohledňující skutečné chování nosného prvku vystaveného zatížení.

3. Kategorie výsledku:

☐ poloprovoz

☐ ověřená technologie

☒ prototyp

☐ certifikovaná metodika

☐ funkční vzorek

☐ software

☐ specializované mapy

☐ výzkumná zpráva

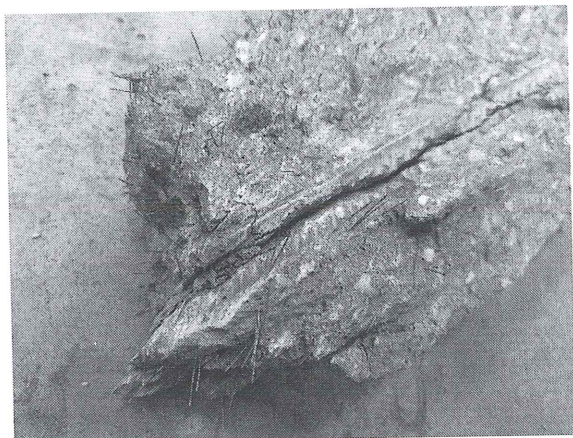
4. Název výsledku:

Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I

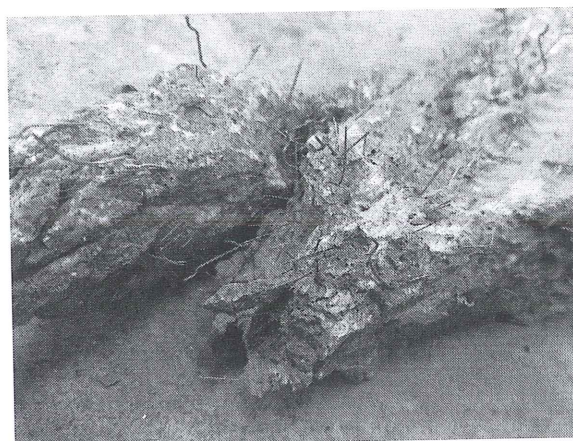
5. Stručný popis výsledku (co je podstatou výsledku a co je v něm nové):

Výsledkem výzkumu je návrh receptury vysokohodnotného betonu s kovovými drátky, který je vhodný pro štíhlé železobetonové nosníky v rámci navržené unifikované řady. Návrh receptury vysokohodnotného betonu zahrnuje dvě varianty použitých drátků. První varianta zahrnuje použití krátkých kovových vláken pro eliminaci účinků smršťování/dotvarování a zvětšení duktility betonu při porušení. Ve druhé variantě se jedná o užití hybridního vyztužení rovnými krátkými drátky a 3D drátky. Cílem modifikované varianty byla minimalizace třmínkové smykové výztuže, což vede ke zjednodušení technologie výroby, k úspoře materiálu a snížení hmotnosti. Mezi specifická návrhová kritéria navržené betonové směsi patřilo prodloužení trvanlivosti, výrazné zvýšení odolnosti a duktility.





Obr. 1 Struktura betonu – drátky MASTER



Obr. 2 Struktura betonu* – drátky MASTER + 3D

6. Technické parametry výsledku (uvedte technické aj. parametry charakterizující výstup):

6.1 Materiál

Receptura vysokopevnostního betonu je uvedena v Tab. 1. Výroba byla ověřena v průmyslové horizontální míchačce o objemu cca 1 m³ ve výrobním závodě ŽPSV s.r.o. v Liticích nad Orlicí. Betonáž proběhla 14.02.2019 a 23.05.2019*.

Tab. 1 Receptura vysokopevnostního betonu (14.02.2019, 23.05.2019*)

Složení	kg/m ³
CEM I 42,5 R	600
Metaver I	80
Glenium 300	20
Voda	140
0/4 Lípa	865
4/8 Litice	650
MASTERFIBER 482	40
Dramix® 3D 55/30BG*	40

*druhá varianta je určena pro minimalizaci smykové výztuže z betonářské výztuže

6.2. Lomověmechanické vlastnosti

Základní mechanické vlastnosti stanovené laboratorními zkouškami jsou shrnuty v Tab. 2, specifické a specializované zkoušky uvádí Tab. 3.

Tab. 2 Základní mechanické vlastnosti ze zkoušek v laboratoři

Vlastnost	Střední hodnota	Jednotky
Pevnost v tlaku – krychelná (28 dnů)	103	[MPa]
Pevnost v tlaku – krychelná (1 den)	38	[MPa]
Pevnost v tlaku – válcová (28 dnů)	87	[MPa]
Modul pružnosti – statický	41	[GPa]
Pevnost v tahu – příčná (kolmo)	6,6	[MPa]
Pevnost v tahu – příčná (rovnoběžně)	6,5	[MPa]

Tab. 3 Specifické a specializované zkoušky

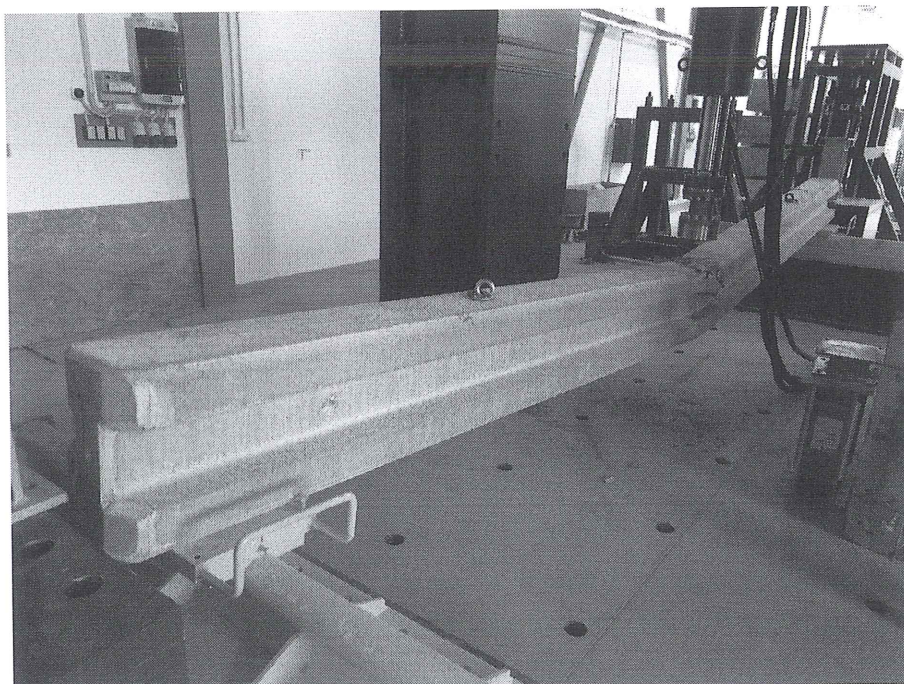
Vlastnost	Střední hodnota	Jednotky
Pevnost v tlaku – krychelná (28 dnů) (Prostý beton)	108	[MPa]
Pevnost v tahu – příčná (Prostý beton)	6,4	[MPa]
Specifická lomová energie (drátkobeton)	>165	[N/m]

Pro užití vysokopevnostního betonu je navržen modulová řada nosníku s různým vyztužením pro oblast použití v inženýrském a pozemním stavitelství. Z navržené modulové řady byl vybrán nosník délky 6,15 m pro rozpětí 5,95 m, který byl vybetonován ve dvou variantách drátkobetonu. Nosníky byly podrobeny zatěžovací zkoušce tříbodovým ohybem v Experimentálním stavebním centru na VŠB – TU Ostrava pro ověření mechanických vlastností a ověření mechanismu porušení a kolapsu.

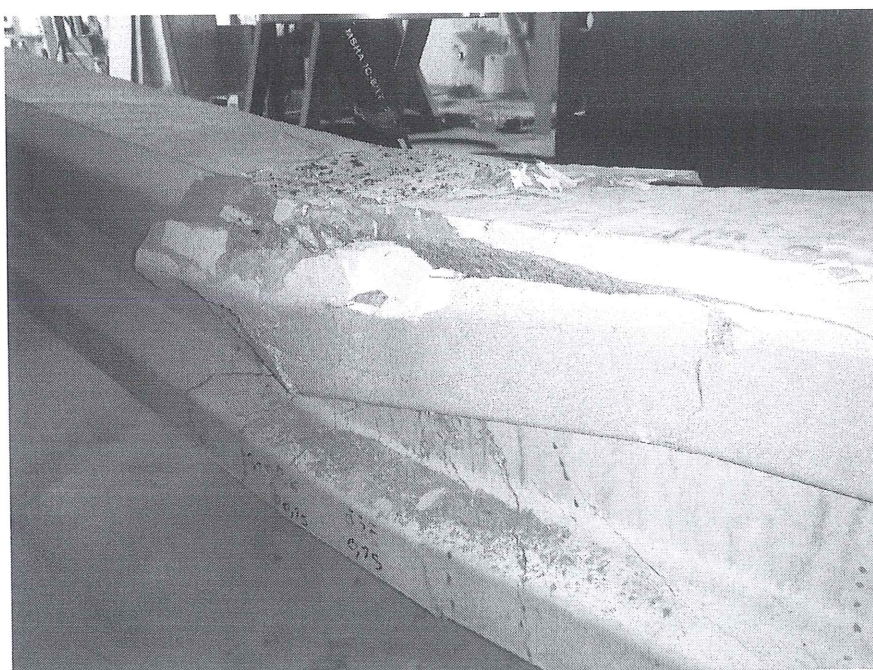
Experimentální zatěžovací zkouška proběhla na univerzálním zkušebním rámu, zatěžování se realizovalo pomocí hydraulického systému Bosch Rexroth o max. zatížení 400 kN. Vybrané fotografie ze zkoušek jsou zobrazeny pro nosník 16 – D1 na obr. 3 a 4. Základní průřez nosníku je tvaru I a má rozměr 250 x 350 mm, krytí hlavní nosné výztuže je 53 mm. Použitá výztuž je B500B. Souhrnné údaje o prototypových nosnících z návrhu a zkoušek jsou uvedeny v Tab. 4. Součástí pokročilého optimalizovaného návrhu nosníků bylo také numerické modelování s využitím simulačních technik, které zohledňuje zjištěné materiálové vlastnosti kompozitu. S ohledem na mechanismus porušení velkých nosníků se využilo se také malých konstrukčních prvků – nosníků bez smykové výztuže. Tyto se také modelovaly a využily při ověření chování a mechanismu porušení drátkobetonu. Ukázkové nosníky jsou zobrazeny na obr. 5 a výstup numerického modelování je na obr. 6.

Tab. 4 Souhrnné údaje o prototypových nosnících z návrhu a zkoušek

Vlastnost	Nosník 16 – D1	Nosník 15 – D2
Drátky	MASTER	MASTER + 3D
Délka [m]	6,15	6,15
Rozpětí [m]	5,95	5,95
Hlavní ohybová výztuž	4x Φ 25	4x Φ 25
Stupeň vyztužení	3,6 %	3,6 %
Smyková výztuž	2x Φ 8/200	2x Φ 8/200
Návrhová pevnost betonu [MPa]	52,93	52,93
Rozhodující kritérium návrhu	ohyb	ohyb
Maximální zatížení v ohybu (návrh. pevnosti materiálů) [kN]	138	138
Maximální zatížení ve smyku (návrh. pevnosti materiálů) [kN]	267	267
Maximální zatížení v ohybu (prům. pevnosti materiálů) [kN]	165	165
Maximální zatížení v smyku (prům. pevnosti materiálů) [kN]	320	320
Maximální zatížení / kolaps nosníku (exp. zatěžování) [kN]	222	208



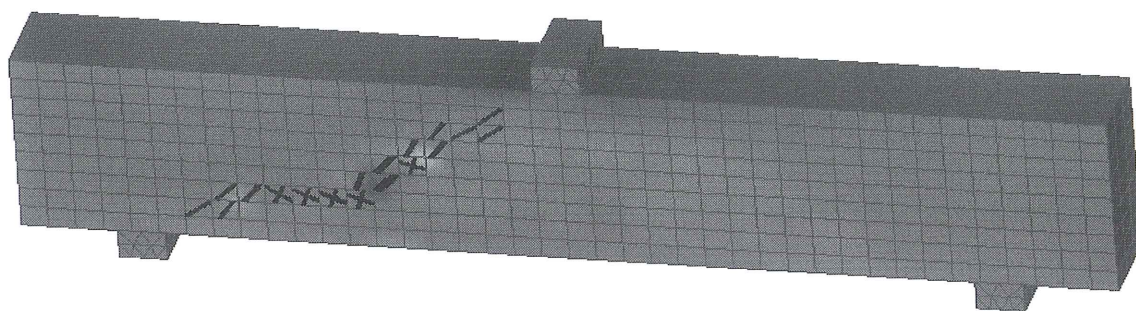
Obr. 3 Nosník 16 – D1 (celkový pohled – po zkoušce)



Obr. 4 Nosník 16 – D1 (po zkoušce)



Obr. 5 Malé konstrukční prvky – nosníky bez smykové výztuže



Obr. 6 Numerické modelování / nelineární analýza; malé konstrukční prvky – nosníky bez smykové výztuže

7. Ekonomické parametry výsledku (např. roční zvýšení objemu výroby, zisku, exportu, atd.):

Mezi hlavní ekonomické aspekty patří zejména posílení konkurenceschopnosti společnosti ve středoevropském měřítku, kdy získané znalosti ze specifik technologie výroby umožnily zvýšit efektivitu (cca o 10 %) a snížit časovou náročnost. Dochází k úspoře času a nákladů ve srovnání s běžnou výrobou. Předpokládá se také zvýšení tržeb, které je obtížné predikovat s ohledem na unikátnost výrobku.

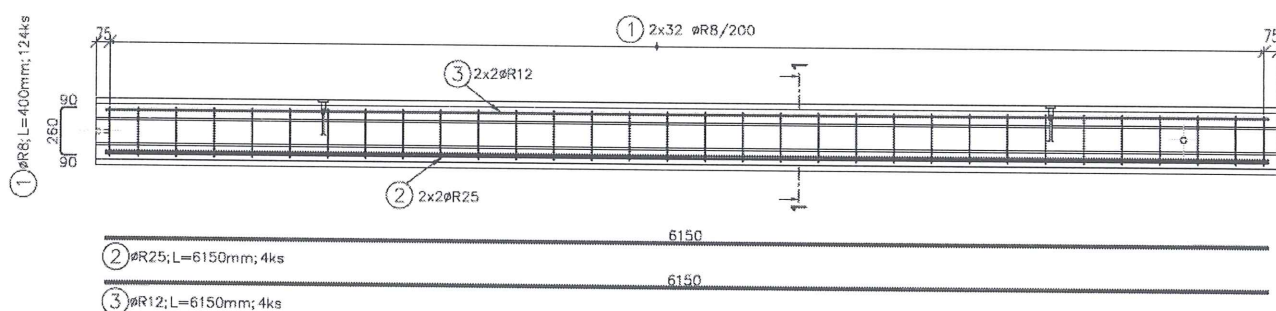
Hlavním uživatelem výsledku bude ŽPSV s.r.o. Nicméně výsledky projektu, které budou v jeho rámci dosaženy společně, budou ve společném vlastnictví smluvních stran. Pokud nelze objektivně určit podíly jednotlivých stran k výsledku, platí, že jsou podíly rovné. Výsledky ve společném vlastnictví je oprávněna samostatně využívat každá ze smluvních stran. Výnosy plynoucí z využití společně vlastněných výsledků třetími osobami budou rozděleny podle dohody smluvních stran, která zohlední tvůrčí přínos smluvních stran, množství vynaložené pracovní kapacity a výši vkladů jednotlivých smluvních stran na realizaci projektu. Účastníci projektu a tím i všichni členové řešitelského kolektivu budou dodržovat mlčenlivost o podstatných informacích, které by mohly vést k prozrazení skutečností o chráněném díle. Řešitel/zadatel i další řešitelé projektu mohou publikovat dílčí výsledky projektu, ale pouze v případě, že bude splněna výše uvedená podmínka. Detailně je zajištění práv duševního vlastnictví popsáno ve smlouvě o využití výsledků. (citace z Podnikatelského záměru z r. 2015)

Handwritten signature or mark.

8. Oblast průmyslové využitelnosti výsledku:

Vysokopevnostní beton je možné využít v inženýrském a pozemním stavitelství v případech realizace formou prefabrikace, kde je kladen výrazný důraz na celkovou trvanlivost a životnost konstrukcí. Výhody nachází zejména v případech uplatnění posouzení celkového dopadu životního cyklu konstrukce. Pro použití je zvolen typizovaný průřez a navržena modulová řada pro vysoké zatížení v průmyslovém a pozemním stavitelství. Mezi hlavní oblasti použití patří konstrukční prvky – trémové nosníky, kdy technologie výroby umožňuje využít vysokopevnostní beton pro všechny typické prvky nosných konstrukčních soustav. Pro návrh a výrobu je možné také využít již unifikované systémové bednění současného výrobního programu ŽPSV s.r.o.

9. Výkres (je-li nutný) na listu formátu A4, pokud možno na výšku, se vztahovými značkami označujícími jednotlivé prvky řešení (výkres by měl být proveden trvanlivými černými čarami, bez použití jiných barev a stínování):



Obr. 7 Nosník 16 – D1 a 15 – D2 – Tvar a vyztužení nosníků (délka 6,15 m)

10. Seznam vztahových značek:

11. Podpůrné dokumenty, např. texty, kresby, fotografie, grafy, náčrty, vývojové diagramy, data o výkonu, zprávy:

Příloha 1 – Výkresy vyztužení nosníku D1 a D2

Příloha 2 – Statický výpočet

Příloha 3 – Souhrnný protokol o zkouškách: Prototypových nosníků

Příloha 4 – Únavové zkoušky: Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I

W

Tvůrce(i) parafrázuje(i) každou stranu formuláře.

V Ostravě dne

Jméno a příjmení: Oldřich Sucharda, Ing. Bc., Ph.D.

Podpis: 

Jméno a příjmení: Vlastimil Bílek, doc. Ing., Ph.D.

Podpis: 

Jméno a příjmení: Pavlína Matečková, Ing. Ph.D.

Podpis: 

Jméno a příjmení: Stanislav Seidl, doc. Ing., Ph.D.

Podpis: 

Formulář odevzdejte ve dvou vyhotoveních: jedno v písemné podobě a jedno v elektronické podobě.



KoNaNoS - Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004505

Prototyp Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I

STATICKÝ VÝPOČET

Tvůrci prototypu:

Vlastimil Bílek, doc. Ing., Ph.D. - ŽPSV s.r.o.

Pavλίna Matečková, Ing. Ph.D. - VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební

Stanislav Seitzl, doc. Ing., Ph.D. - Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

Oldřich Sucharda, Ing., Ph.D. - VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební

Datum:

06.09.2019

Vypracovala:

Ing. Lucie Mynarzová, Ph.D.

Ing. Pavλίna Matečková, Ph.D.

Zástupce řešitelského kolektivu FAST VŠB – TU Ostrava

Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I

Statický výpočet

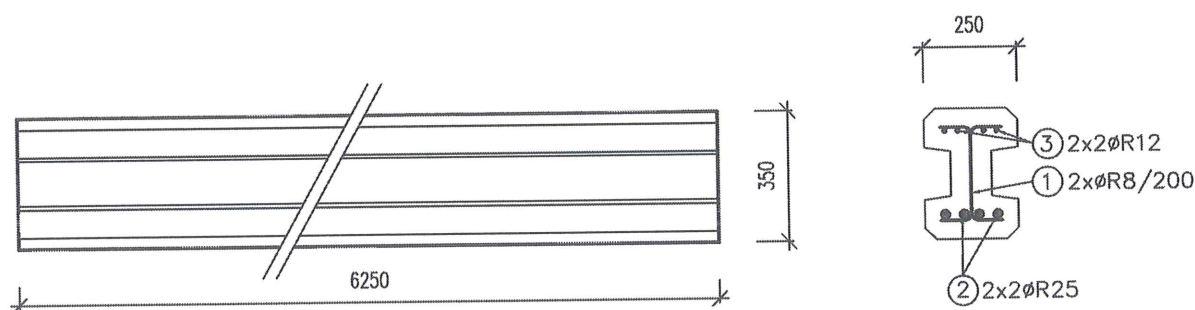
Výrobní řada nosníků:

Nosník profilu I	Ohybová únosnost průřezu		Smyková únosnost průřezu		Smyková únosnost průřezu
Hlavní nosná výztuž	M_{Rd} (kNm)	třmínky	$V_{Rd,s}$ (kN)	třmínky	$V_{Rd,s}$ (kN)
4 ϕ 20	142,25	ϕ 8/200	56,90	ϕ 8/100	113,80
4 ϕ 22	167,76	ϕ 8/200	55,46	ϕ 8/100	110,91
4 ϕ 25	207,41	ϕ 8/200	53,33	ϕ 8/100	106,15

Základní údaje: Betonáž: 14.02.2019, Označení: FRC110

Statický výpočet byl proveden v souladu s normou ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

I-nosník



Délka nosníku: $L = 6,25$ m

Teoretické rozpětí: $L_{teor} = 5,95$ m, prosté podepření

Šířka nosníku: $b = 0,25$ m

Výška nosníku: $h = 0,35$ m

Hlavní nosná výztuž: 4 ϕ R25

Třmínky: 2 ϕ R8/200

Stupeň vlivu prostředí: XF4/XD3

Krytí hlavní výztuže: $c = 53$ mm

Účinná výška průřezu: $d = 284,5$ mm

Materiál:

Beton: C80/95

Průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku: $f_{cm} = 87,4$ MPa (určeno z výsledků zkoušek)

Charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku: $f_{ck} = 87,4 - 8 = 79,4$ MPa

Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I

Statický výpočet

Návrhová hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{79,4}{1,5} = 52,93 \text{ MPa}$

Betonářská výztuž: B500B

Průměrná mez kluzu betonářské výztuže: $f_y = 500 \text{ MPa}$

Charakteristická mez kluzu betonářské výztuže: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

Návrhová mez kluzu betonářské výztuže: $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$

Modul pružnosti $E_s = 200 \text{ GPa}$

Únosnost průřezu:

Ohybová únosnost průřezu

Plocha hlavní nosné tahové výztuže (4ØR25): $A_s = 1964 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

Síla ve výztuži: $F_s = A_s \cdot f_{yk} = 1964 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot 10^3 = 982 \text{ kPa}$

Výška tlačené oblasti: $x = \frac{F_s}{\lambda \cdot b \cdot \eta \cdot f_{cm}} = \frac{982}{0,7065 \cdot 0,25 \cdot 0,813 \cdot 87,4 \cdot 10^3} = 0,0782 \text{ m}$

Kontrola výšky tlačené oblasti: $\frac{x}{d} = \frac{78,2}{284,5} = 0,275 < \xi_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \frac{f_{yk}}{E_s}} = \frac{2,6}{2,6 + \frac{500}{200}} = 0,5098$

Souč. definující účinnou výšku tlačené oblasti: $\lambda = 0,8 - \frac{f_{cm} - 50}{400} = 0,8 - \frac{87,4 - 50}{400} = 0,7065$

Souč. definující účinnou pevnost: $\eta = 1,0 - \frac{f_{cm} - 50}{200} = 1,0 - \frac{87,4 - 50}{200} = 0,81$

Stupeň vyztužení (vztaženo k výšce průřezu d): 3,61 %

Moment únosnosti průřezu: $M_R = F_s \cdot (d - 0,4 \cdot x) = 982 \cdot (0,2845 - 0,4 \cdot 0,0782) = 248,66 \text{ kNm}$

Maximální síla nutná pro porušení průřezu: $F_{max, moment} = 4 \cdot \frac{M_R}{L_{teor}} = 4 \cdot \frac{248,66}{5,95} = 167,17 \text{ kN}$

Návrhový moment únosnosti průřezu:

$M_{Rd} = F_s \cdot (d - 0,4 \cdot x) = 853,91 \cdot (0,2845 - 0,4 \cdot 0,104) = 207,41 \text{ kNm}$

Maximální návrhová síla nutná pro porušení: $F_{max, moment, d} = 4 \cdot \frac{M_{Rd}}{L_{teor}} = 4 \cdot \frac{207,41}{5,95} = 139,44 \text{ kN}$

Smyková únosnost průřezu

Průřezová plocha smykové výztuže: $A_{sw} = 101 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

Osová vzdálenost třmínků: $s = 200 \text{ mm}$

Rameno vnitřních sil: $z = d - 0,4 \cdot x = 284,5 - 0,4 \cdot 78,2 = 253,22 \text{ mm}$

Průměrná hodnota posouvající síly, kterou může převzít smyková výztuž na mezi kluzu, pro úhel $\Theta = 45^\circ$:

$$V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{yw} \cdot \cot \Theta = \frac{101 \cdot 10^{-6}}{0,2} \cdot 0,25322 \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 1,0 = 63,94 \text{ kN}$$

Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I

Statický výpočet

Maximální síla nutná pro porušení průřezu: $F_{max,síla} = 2 \cdot V_{R,s} = 2 \cdot 63,94 = 127,88 \text{ kN}$

Návrhová hodnota posouvající síly, kterou může převzít smyková výztuž na mezi kluzu, pro úhel $\Theta = 45^\circ$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\Theta = \frac{101 \cdot 10^{-6}}{0,2} \cdot 0,2429 \cdot 434,78 \cdot 10^3 \cdot 1,0 = 53,33 \text{ kN}$$

Maximální návrhová síla nutná pro porušení průřezu: $F_{max,síla} = 2 \cdot V_{Rd,s} = 2 \cdot 53,33 = 106,66 \text{ kN}$

Průměrná hodnota posouvající síly, kterou může převzít smyková výztuž na mezi kluzu, pro úhel $\Theta = 22^\circ$:

$$V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywk} \cdot \cot\Theta = \frac{101 \cdot 10^{-6}}{0,2} \cdot 0,25322 \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 2,5 = 159,85 \text{ kN}$$

Maximální síla nutná pro porušení průřezu: $F_{max,síla} = 2 \cdot V_{R,s} = 2 \cdot 159,85 = 319,7 \text{ kN}$

Návrhová hodnota posouvající síly, kterou může převzít smyková výztuž na mezi kluzu, pro úhel $\Theta = 22^\circ$:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\Theta = \frac{101 \cdot 10^{-6}}{0,2} \cdot 0,2429 \cdot 434,78 \cdot 10^3 \cdot 2,5 = 133,33 \text{ kN}$$

Maximální návrhová síla nutná pro porušení průřezu: $F_{max,síla} = 2 \cdot V_{Rd,s} = 2 \cdot 133,33 = 266,66 \text{ kN}$

Závěr:

U I-nosníku je rozhodující porušení ve smyku. Porušení ve smyku se očekává při dosažení síly 319,7 kN.

SOUHRNNÝ PROTOKOL

o zkouškách:

PROTOTYPOVÝCH NOSNÍKŮ

v rámci projektu

KoNaNoS - Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů

CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004505

PROTOTYPY

- A) **Trámový železobetonový nosník z vysokopevnostního betonu**
(nosník A1 a A2) 15.11.2018
- B) **Alkalicky aktivovaný kompozit pro trámový železobetonový nosník**
(nosník B1 a B2) 03.05.2018
- C) **Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky**
(deskový nosník) vzorky betonáž 31.05.2017, nosník 19.06.2017
- D) **Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I**
(I nosník) betonáž 14.02.2019, 23.05.2019

Objednatel/Zadavatel zkoušek:

Vlastimil Bílek, doc. Ing., Ph.D. - ŽPSV s.r.o.

Pavčina Matečková, Ing., Ph.D. - VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební

Stanislav Seitzl, doc. Ing., Ph.D. - Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

Datum vystavení protokolu:

12.09.2019

Vyhotovil:

Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.



Tento protokol může být reprodukován jedině celý, jeho část pouze s písemným souhlasem.

Výsledky zkoušek se týkají výhradně předmětu experimentálního programu.

Zkušební laboratoř se řídí systémem ČSN EN ISO 9001.

Souhrnný zkušební protokol je přílohou pro evidenci prototypů.

Identifikace zkušební laboratoře:

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební (FAST)

Ludvíka Podéště 1875/17, 708 00 Ostrava–Poruba

- Experimentální stavební centrum (prototypové nosníky)
- Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb (malé vzorky – mechanické vlastnosti)

Jména pracovníků, kteří zkoušku provedli:

- Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D. – zkušební technik
- Pracovníci Experimentálního stavebního centra
- Pracovníci Katedry stavebních hmot a diagnostiky staveb

Předmět zkoušky:

Série 8 prototypových nosníků v rámci projektu: KoNaNoS - Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů, evidenční číslo CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004505.

Cíl zkoušek:

Ověřit spolehlivost a chování konstrukce.

Ověřit výpočetní modely, zejména jejich výstižnost.

Účel zkoušek:

Průkazní – prototypové zkoušky, sloužící k ověření spolehlivosti před zahájením výroby.

Druh zkoušek:

Zatěžovací zkoušky prováděné do dosažení únosnosti (porušení) konstrukce.

Zkušební postup:

Statická zatěžovací zkouška – Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí ČSN 73 2030 [1] ve variantě pro validaci výpočetních modelů, které se řeší nelineární analýzou, zohledňují skutečné chování.

- Způsob zatěžování: Zkušební rám s hydraulickým systémem Bosch Rexroth (hydraulické válce 400, 1000 a 2000 kN)
Zatěžování řízenou deformací s krokem 5 mm

1. ÚVOD

Základním cílem statické zatěžovací zkoušky je zjištění maximální síly při dosažení únosnosti zkoušených železobetonových a předpjatých trámů. Cílem zkoušek je také ověřit chování konstrukcí a mechanismus porušení.

2. POPIS ZKOUŠENÝCH PROTOTYPŮ

Celkový zkušební program zahrnuje 8 prototypových nosníků, které jsou v různých rozpětích, průřezích a materiálovém provedení. Podrobnosti ke tvaru a způsobu vyztužení uvádí příloha 1. Souhrnné údaje o označení, materiálech, rozpětí, průřezu a použitém hydraulickém válci uvádí tab. 1.

Tab. 1 Specifikace prototypových nosníků

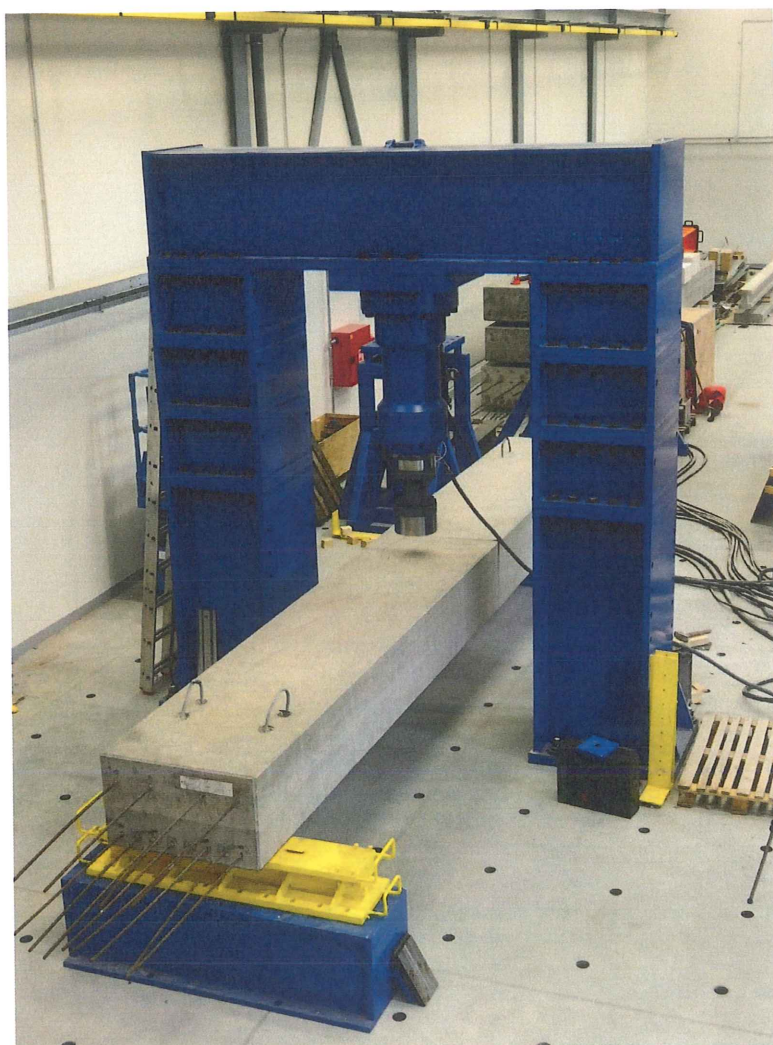
Číslo	Ozn.	Popis (použitý hydraulický válec)	Betonáž	Profil (šířka x výška) [mm]	Délka (rozpětí) [m]
A1	1	Trámový železobetonový nosník z vysokopevnostního betonu (hydraulický válec 1000 kN)	15.11.2018	300 x 550	4,10 (3,66)
A2	2	Trámový železobetonový nosník z vysokopevnostního betonu (hydraulický válec 1000 kN)	15.11.2018	300 x 550	5,01 (4,57)
B1	3	Alkalicky aktivovaný kompozit pro trámový železobetonový nosník (hydraulický válec 1000 kN)	03.05.2018	230 x 550	4,10 (3,66)
B2	4	Alkalicky aktivovaný kompozit pro trámový železobetonový nosník (hydraulický válec 2000 kN)	03.05.2018	230 x 550	5,01 (4,57)
C1	5	Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky (hydraulický válec 2000 kN)	19.06.2017	900 x 520	7,00 (6,50)
C2	6	Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky (hydraulický válec 400 kN)	19.06.2017	900 x 520	7,00 (6,50)
D1	7	Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I – krátké drátky (hydraulický válec 400 kN)	14.02.2019	250 x 350 profil I	6,15 (5,95)
D2	8	Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I – hybrid drátky (hydraulický válec 400 kN)	23.05.2019	250 x 350 profil I	6,15 (5,95)



Železobetonové nosníky jsou vyztuženy betonářskou výztuží B500B. Předpjaté nosníky mají také předpínací výztuže Y1860 S7-15,7. Nosníky mají rovněž smykovou výztuž – třmínky. Beton se liší dle konkrétní varianty – prototypu. Při zkoušení byl nosník uložen na válečkových ložiscích tak, aby se skutečné podmínky uložení co nejvíce přiblížily podmínkám uvažovaným v teoretickém výpočtu (prostý nosník).

2. ZKUŠEBNÍ A MĚŘICÍ LINKA

Při statické zatěžovací zkoušce byl využit zkušební rám s hydraulickým systémem firmy Bosch Rexroth. Jedná se o hydraulický systém s pracovním tlakem 270 kPa, který může mít zapojeno pět hydraulických válců, největší hydraulický válec je pro zatížení až 2000 kN. Hydraulický systém je napojen na digitální řídicí systém, který byl napojen na měřicí ústřednu – dataloger AHBORN ALMEMO 2690-8A v kombinaci s měřicí dráhy řady ALMEMO FW s rozlišením přesností 0,01 mm. Základním vyhodnocovaným parametrem byl svislý průhyb uprostřed rozpětí. Kontrolní/doplňková čidla byla umístěna nad podporami.



Obr. 1. Celkový pohled na zkušební rám s hydraulickým válcem 2000 kN (před nastrojením)

u

3. STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

Statické zatěžovací zkoušky sledovaných železobetonových a předpjatých trámů proběhly od března do srpna 2019. Termíny zkoušek uvádí tab. 2. Při statické zatěžovací zkoušce bylo postupováno podle individuálního zatěžovacího postupu, který je modifikován pro validaci pokročilých výpočetních modelů. Zatěžovací zkouška byla rozdělena do zatěžovacích kroků, kdy přírůstek deformace byl 5 mm. Další další zatěžovací cyklus následoval po ustálení deformačního účinku.

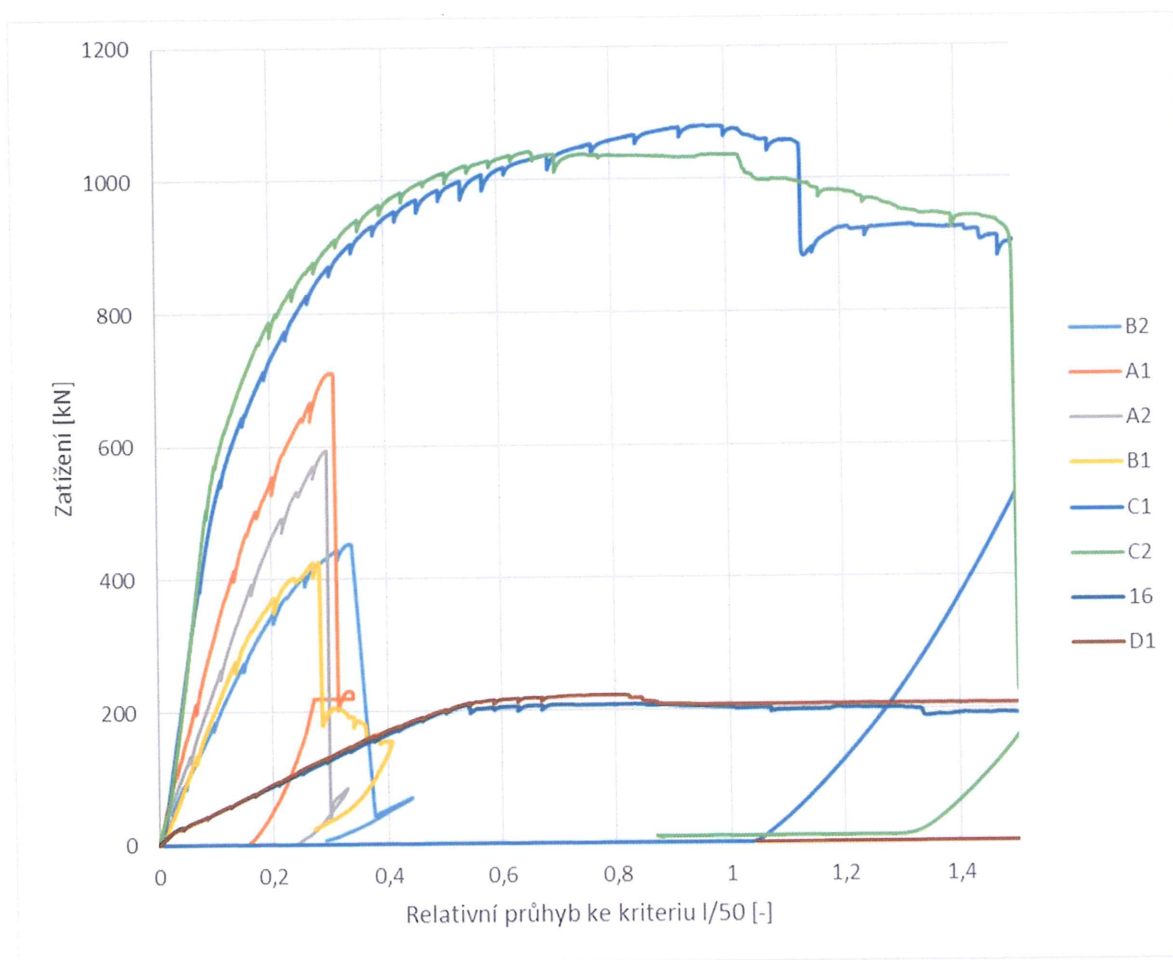
4. VÝSLEDKY STATICKÉ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY

Výsledky a termíny zatěžovacích zkoušek jsou souhrnně uvedeny v tab. 2. Výsledky jsou uvedeny v celých kN. Ze zatěžovacích zkoušek je zpracován graf na obr. 2, kde s ohledem na různá rozpětí prototypů je průhyb vztažen k relativnímu měříku limitního průhybu [1] a rozpětí.

Tab. 2 Specifikace prototypových nosníků

Číslo	Ozn.	Popis (zkoušený prvek)	Zkouška	Max. zatížení [kN]	Porušení (Kolaps)
A1 (7)	1	Trémový železobetonový nosník z vysokopevnostního betonu	10.06.2019	710	Ohyb (Smyk)
A2 (5)	2	Trémový železobetonový nosník z vysokopevnostního betonu	03.06.2019	593	Ohyb (Smyk)
B1 (6)	3	Alkalicky aktivovaný kompozit pro trémový železobetonový nosník	07.06.2019	426	Ohyb (Smyk)
B2 (4)	4	Alkalicky aktivovaný kompozit pro trémový železobetonový nosník	13.05.2019	453	Ohyb (Smyk)
C1 (12)	5	Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky	19.07.2019	1080	Ohyb (Smyk/Tlak)
C2 (14)	6	Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky	02.08.2019	1043	Ohyb (Smyk/Tlak)
D1 (16)	7	Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I – krátké drátky	05.09.2019	222	Ohyb (Tlak)
D2 (15)	8	Vysokopevnostní beton s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I – hybrid drátky	04.09.2019	208	Ohyb (Tlak)





Obr. 2 Graf maximálního zatížení prototypů

V Ostravě dne 12.9.2019.....

.....

5. LITERATURA A POUŽITÉ PODKLADY

- [1] ČSN 73 2030 – Statické zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí, 2019.
- [2] Metrologický řád FAST, FAST_PKP_10_001, VŠB-TU Ostrava, 2019.
- [3] ČSN EN 12390-3 Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles
- [4] ČSN EN 12390-6 Stanovení pevnosti v příčném tahu
- [5] ČSN ISO 1920-10 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

W

**Únavové zkoušky vysokopevnostního betonu s drátky
pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I
(14. 2. 2019)**

(Zpráva o průběhu a výsledcích dosažených při měření materiálových vlastností uvedeného materiálu – skupina Vysokocyklové únavy)

Vypracovali:

doc. Ing. Stanislav Seitzl, Ph.D.
doc. Ing. Jan Klusák, Ph.D.
Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.
Ing. Petr Miarka
Michal Minařík

Brno, srpen 2019



1. Úvod

V rámci projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004505 (*Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů*) byly skupinou Vysokocyklová únava ÚFM AV ČR v Brně provedeny práce zaměřené na zjištění základních únavových charakteristik vyvíjeného **vysokopevnostního betonu s drátky** (14. 2. 2019). Podle zadání bylo hlavními cíli laboratorního měření:

- stanovení Wöhlerovy křivky a meze únavy při laboratorní teplotě,
- porovnání zjištěných vlastností s analogickými charakteristikami standardně používaného betonu třídy C50/60 získanými za pokojové teploty.

V obou případech byly zkoušky provedeny na experimentálním materiálu dodaném firmou ŽPSV s.r.o. Firma ŽPSV s.r.o. zajistila výrobu zkušebních těles dle standardních rozměrů běžně užívaných forem. Následná úprava zkušebních těles byla provedena firmami Kamena (úprava rozměrů zkušebních těles a výroba iniciačního zářezu) a AWAC (příprava iniciačního zářezu uvnitř tělesa pomocí vodního paprsku) dle výkresů dodaných ÚFM AV ČR.

2. Stanovení Wöhlerovy křivky a meze únavy

Pro stanovení Wöhlerovy křivky a meze únavy byla připravena zkušební tělesa pro třibodový ohyb se zářezem, viz Obr. 1.

Celkem bylo připraveno **16** zkušebních těles, která byla u řešitele označena pořadovými čísly **1 až 16**. Schéma uspořádání zkoušky a její vyhodnocení jsou uvedeny na Obr. 2. U všech vzorků byla volena orientace kolmo na směr hutnění, to znamená, že zatěžovaný průřez je dán výškou hranolu a šířkou formy bez iniciačního zářezu, viz Obr. 4.

2.1. Zkušební zařízení

Únavové zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji: **Servohydraulický pulsátor Zwick/Roell Amsler HC25**, viz Obr. 2.

Jedná se o kompaktní provedení servohydraulického pulsátoru určeného pro statické a dynamické testování materiálů až do síly 25 kN. Konstrukce pulsátoru dovoluje posuny čelistí při testech až 250 mm. Systém umožňuje přesné řízení testů v režimu řízení síly a polohy (posunu) pístnice. Díky sofistikovanému řídicímu softwaru lze měnit průběh daného zatěžování na základě potřeb zkoušky. Stroj je určen k únavovým zkouškám při nízkých frekvencích. Frekvenční rozsah 0,001 ~ 110 Hz. Funkční generátor stroje umožňuje zatěžování se sinusovým, trojúhelníkovým, obdélníkovým a rampovým průběhem.

2.2. Provedení zkoušek

Zkoušky byly provedeny při symetrickém zatěžování, tj. s parametrem asymetrie cyklu $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,1$. Řízena a kontrolována byla amplituda síly a střední síla. Zkoušky na rezonančním zkušebním stroji byly prováděny při frekvenci zatěžování 10 Hz.

Zkoušky byly vedeny až do lomu zkušebních těles. Pokud nedojde k lomu po dosažení 2×10^6 cyklů, jsou experimenty přerušeny. Jako mez únavy je stanovena nejvyšší hladina napětí, na které zůstala neporušena tři zkušební tělesa.

2.3. Výsledky

Výsledky měření únavové životnosti jsou uvedeny v Tab. 1 a graficky na Obr. 3. Mez únavy stanovená v souladu s tvrzením odstavce 2.2 jako hladina napětí, na kterém zůstala neporušená tři tělesa, odpovídá hodnotě $\sigma_c = 3,11$ MPa. Z Obr. 3 je patrný poměrně velký rozptyl experimentálně stanovených hodnot amplitud napětí σ_a , při nichž dochází k lomu vzorků. Důvod tohoto rozptylu spočívá zřejmě v nehomogenitě struktury materiálu (viz Obr. 4), velikost maximálního kameniva 8 mm. Rozptyl experimentálních hodnot byl kvantifikován proložením křivky střední hodnoty a koeficientem determinace R^2 , viz Obr. 5

2.4. Srovnání s materiálem C50/60

Získané výsledky (Obr. 3) byly srovnány s odpovídajícími hodnotami pro standardně používanou třídu betonu C50/60. Únavové vlastnosti C50/60 byly změřeny na stejném zkušebním zařízení. Wöhlerovy křivky pro C50/60 a pro studovaný materiál jsou pro pokojovou teplotu uvedeny na Obr. 6. Z obrázku je patrný nárůst hodnot křivky životnosti a meze únavy pro studovaný materiál ve srovnání s referenční C50/60. Poznamenejme, že hodnota tlakové pevnosti u studovaného materiálu je pro laboratorní teplotu cca 20 °C po 28 dnech $f_c = 103,33$ MPa, zatímco pro C50/60 $f_c = 85,83$ MPa. Výše uvedený nárůst meze únavy pro studovaný materiál ve srovnání s C50/60 lze korelovat se zvýšenou hodnotou tlakové pevnosti tohoto materiálu.

Srovnání odolnosti proti únavě je pak zobrazeno na Obr. 6, kde je vynesena křivka napětí, která je podělena tahovou pevností. Z obrázku je patrný pokles hodnot křivky životnosti a meze únavy pro studovaný materiál ve srovnání s referenční C50/60 a tedy lze konstatovat, že studovaný materiál má lehce horší únavovou odolnost.

3. Závěr

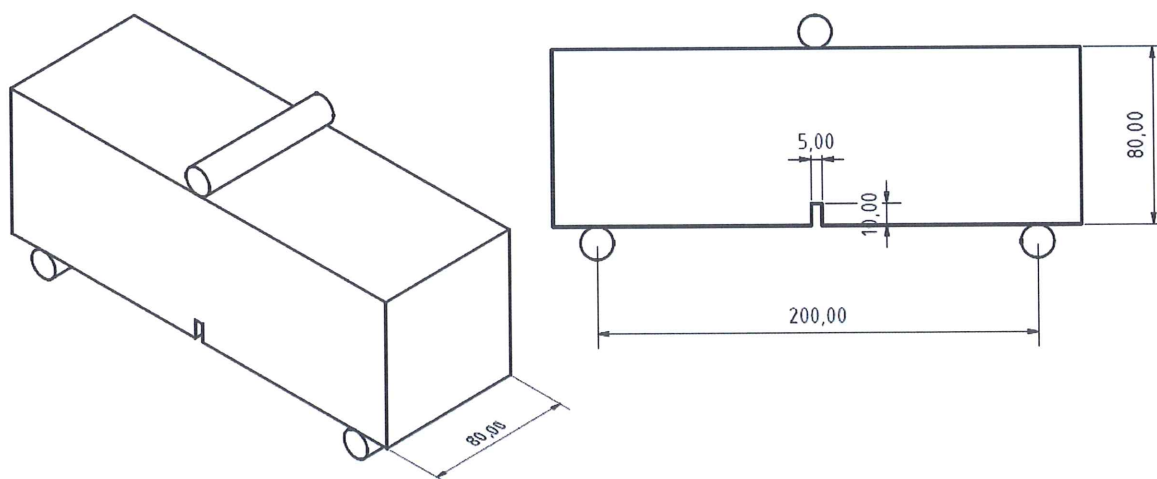
Pro studovaný materiál byly provedeny základní únavové zkoušky a stanoveny křivky odolnosti v případě kombinovaného módu namáhání. Získané výsledky lze shrnout do těchto bodů:

- Studovaný vysokopevnostní beton s drátky má v absolutních hodnotách lepší únavovou odolnost.
- Uvedené srovnání obou materiálů nemá obecný charakter a získané hodnoty parametrů charakterizujících únavové procesy závisí na struktuře materiálu.

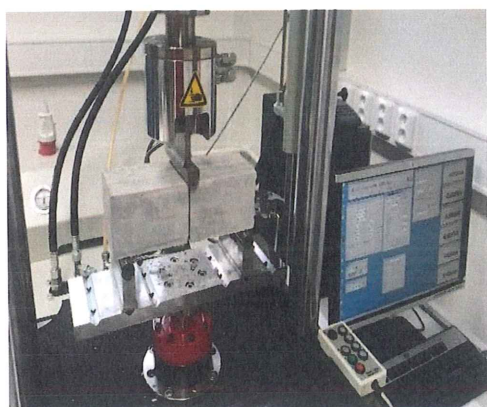


Tab. 1. Výsledky měření únavové životnosti.

vzorek č.	amplituda napětí σ_a [MPa]	počet cyklů N_f	poznámka
1	4.45	1	
2	4.53	1	
3	4.17	1	
4	3.46	70	
5	3.94	140	
6	3.46	1 560	
7	3.54	2 600	
8	3.27	29 352	
9	3.35	39 019	
10	3.42	66 000	
11	3.15	187 275	
12	3.54	241 822	
13	3.07	2 000 000	neporušen
14	3.11	2 000 000	neporušen
15	3.11	2 000 000	neporušen
16	3.11	2 000 000	neporušen

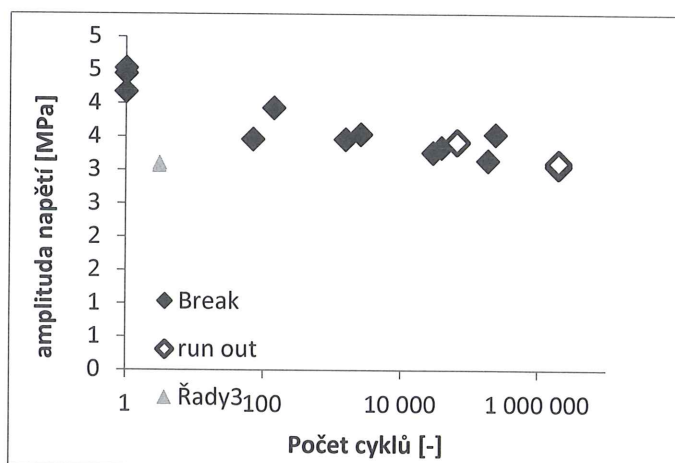


Obr. 1. Výkres použitých zkušebních těles pro stanovení Wöhlerovy křivky



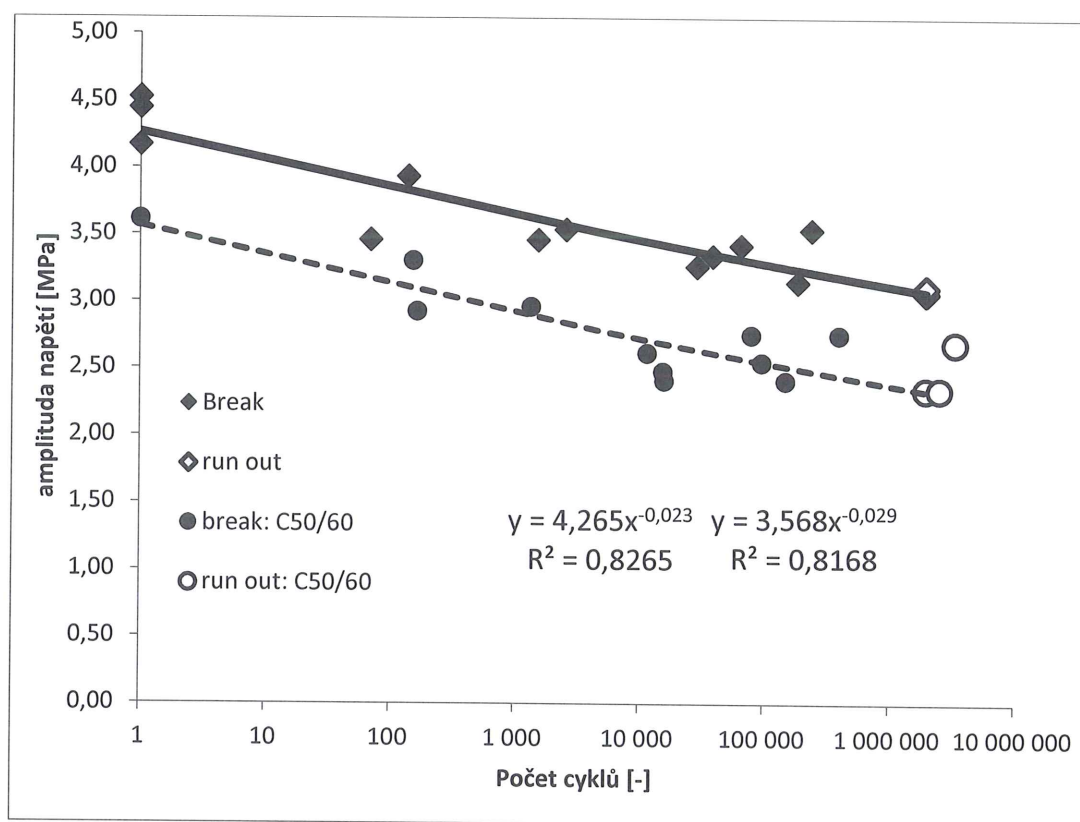
$$\sigma_{dol} = \frac{M * z}{I}$$

Obr. 2. Schéma uspořádání zkoušky a vztah pro maximální tahové napětí.

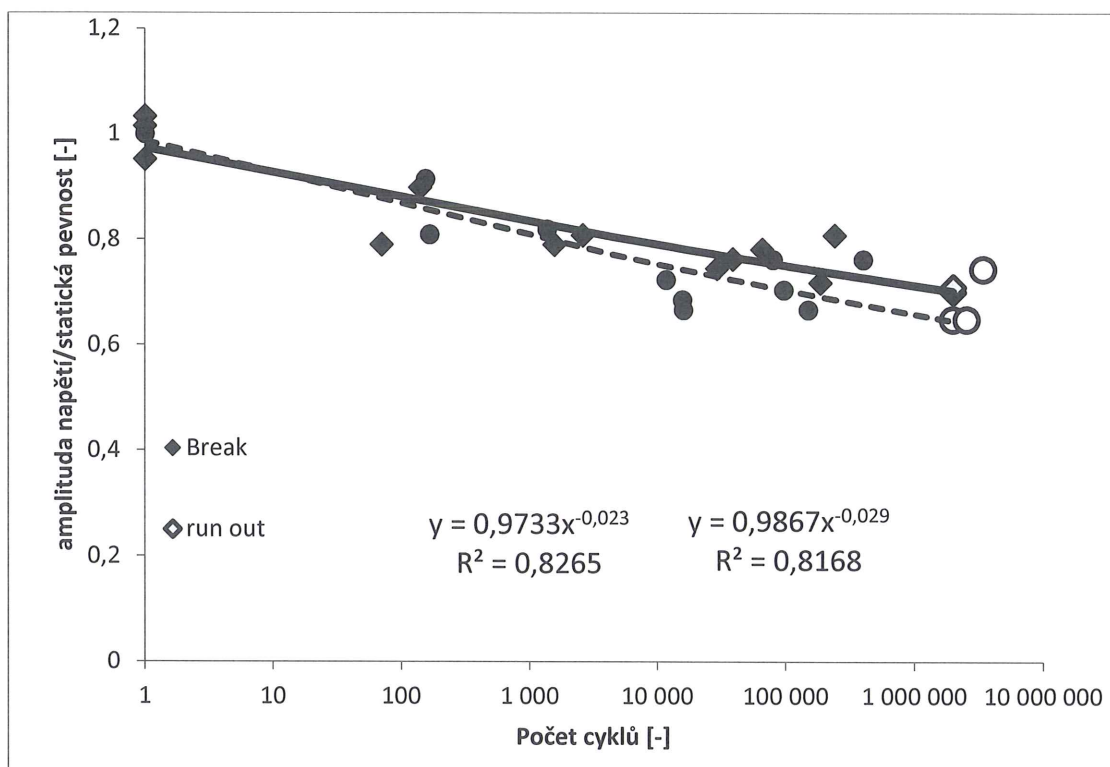


Obr. 3. Experimentálně stanovené životnosti zkušebních těles. Značky bez výplně označují neporušená zkušební tělesa.

Obr. 4. Struktura studovaného betonu kamenivo do 8 mm směr sedání



Obr. 5. Odhad střední hodnoty a individuální hodnoty σ_a a koeficient determinace R^2 pro studovaný materiál a pro C50/60.



Obr. 6. Srovnání Wöhlerovy křivky pro studovaný materiál a C50/60.

Únavové zkoušky vysokopevnostního betonu s drátky pro štíhlé železobetonové nosníky profilu I

(14. 2. 2019)

(Zpráva o průběhu a výsledcích dosažených při měření materiálových vlastností uvedeného materiálu – skupina Vysokocyklové únavy)

Vypracovali:

doc. Ing. Stanislav Seitzl, Ph.D.

doc. Ing. Jan Klusák, Ph.D.

Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.

Ing. Petr Miarka

Michal Minařík



Brno, srpen 2019



1. Úvod

V rámci projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004505 (*Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů*) byly skupinou Vysokocyklová únava ÚFM AV ČR v Brně provedeny práce zaměřené na zjištění základních únavových charakteristik vyvíjeného **vysokopevnostního betonu s drátky** (14. 2. 2019). Podle zadání bylo hlavními cíli laboratorního měření:

- stanovení Wöhlerovy křivky a meze únavy při laboratorní teplotě,
- porovnání zjištěných vlastností s analogickými charakteristikami standardně používaného betonu třídy C50/60 získanými za pokojové teploty.

V obou případech byly zkoušky provedeny na experimentálním materiálu dodaném firmou ŽPSV s.r.o. Firma ŽPSV s.r.o. zajistila výrobu zkušebních těles dle standardních rozměrů běžně užívaných forem. Následná úprava zkušebních těles byla provedena firmami Kamena (úprava rozměrů zkušebních těles a výroba iniciačního zářezu) a AWAC (příprava iniciačního zářezu uvnitř tělesa pomocí vodního paprsku) dle výkresů dodaných ÚFM AV ČR.

2. Stanovení Wöhlerovy křivky a meze únavy

Pro stanovení Wöhlerovy křivky a meze únavy byla připravena zkušební tělesa pro tříbodový ohyb se zářezem, viz Obr. 1.

Celkem bylo připraveno **16** zkušebních těles, která byla u řešitele označena pořadovými čísly **1 až 16**. Schéma uspořádání zkoušky a její vyhodnocení jsou uvedeny na Obr. 2. U všech vzorků byla volena orientace kolmo na směr hutnění, to znamená, že zatěžovaný průřez je dán výškou hranolu a šířkou formy bez iniciačního zářezu, viz Obr. 4.

2.1. Zkušební zařízení

Únavové zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji: **Servohydraulický pulsátor Zwick/Roell Amsler HC25**, viz Obr. 2.

Jedná se o kompaktní provedení servohydraulického pulsátoru určeného pro statické a dynamické testování materiálů až do síly 25 kN. Konstrukce pulsátoru dovoluje posuny čelistí při testech až 250 mm. Systém umožňuje přesné řízení testů v režimu řízení síly a polohy (posunu) pístnice. Díky sofistikovanému řídicímu softwaru lze měnit průběh daného zatěžování na základě potřeb zkoušky. Stroj je určen k únavovým zkouškám při nízkých frekvencích. Frekvenční rozsah 0,001 ~ 110 Hz. Funkční generátor stroje umožňuje zatěžování se sinusovým, trojúhelníkovým, obdélníkovým a rampovým průběhem.

2.2. Provedení zkoušek

Zkoušky byly provedeny při symetrickém zatěžování, tj. s parametrem asymetrie cyklu $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,1$. Řízena a kontrolována byla amplituda síly a střední síla. Zkoušky na rezonančním zkušebním stroji byly prováděny při frekvenci zatěžování 10 Hz.

Zkoušky byly vedeny až do lomu zkušebních těles. Pokud nedojde k lomu po dosažení 2×10^6 cyklů, jsou experimenty přerušeny. Jako mez únavy je stanovena nejvyšší hladina napětí, na které zůstala neporušena tři zkušební tělesa.

2.3. Výsledky

Výsledky měření únavové životnosti jsou uvedeny v Tab. 1 a graficky na Obr. 3. Mez únavy stanovená v souladu s tvrzením odstavce 2.2 jako hladina napětí, na kterém zůstala neporušená tři tělesa, odpovídá hodnotě $\sigma_c = 3,11$ MPa. Z Obr. 3 je patrný poměrně velký rozptyl experimentálně stanovených hodnot amplitud napětí σ_a , při nichž dochází k lomu vzorků. Důvod tohoto rozptylu spočívá zřejmě v nehomogenitě struktury materiálu (viz Obr. 4), velikost maximálního kameniva 8 mm. Rozptyl experimentálních hodnot byl kvantifikován proložením křivky střední hodnoty a koeficientem determinace R^2 , viz Obr. 5

2.4. Srovnání s materiálem C50/60

Získané výsledky (Obr. 3) byly srovnány s odpovídajícími hodnotami pro standardně používanou třídu betonu C50/60. Únavové vlastnosti C50/60 byly změřeny na stejném zkušebním zařízení. Wöhlerovy křivky pro C50/60 a pro studovaný materiál jsou pro pokojovou teplotu uvedeny na Obr. 6. Z obrázku je patrný nárůst hodnot křivky životnosti a meze únavy pro studovaný materiál ve srovnání s referenční C50/60. Poznamenejme, že hodnota tlakové pevnosti u studovaného materiálu je pro laboratorní teplotu cca 20 °C po 28 dnech $f_c = 103,33$ MPa, zatímco pro C50/60 $f_c = 85,83$ MPa. Výše uvedený nárůst meze únavy pro studovaný materiál ve srovnání s C50/60 lze korelovat se zvýšenou hodnotou tlakové pevnosti tohoto materiálu.

Srovnání odolnosti proti únavě je pak zobrazeno na Obr. 6, kde je vynesena křivka napětí, která je podělena tahovou pevností. Z obrázku je patrný pokles hodnot křivky životnosti a meze únavy pro studovaný materiál ve srovnání s referenční C50/60 a tedy lze konstatovat, že studovaný materiál má lehce horší únavovou odolnost.

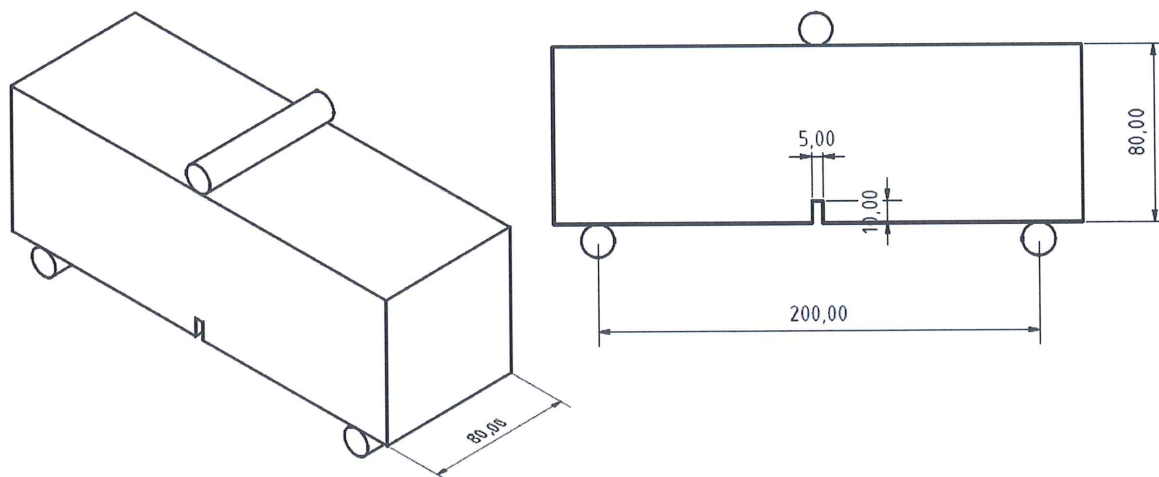
3. Závěr

Pro studovaný materiál byly provedeny základní únavové zkoušky a stanoveny křivky odolnosti v případě kombinovaného módu namáhání. Získané výsledky lze shrnout do těchto bodů:

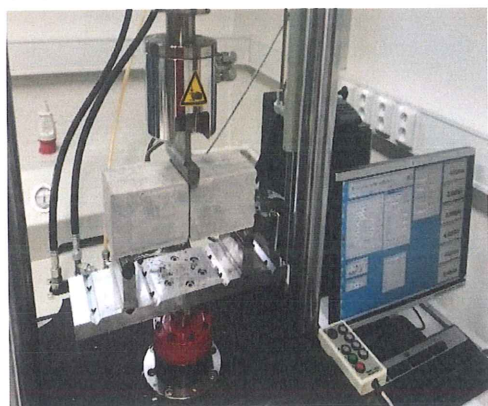
- Studovaný vysokopevnostní beton s drátky má v absolutních hodnotách lepší únavovou odolnost.
- Uvedené srovnání obou materiálů nemá obecný charakter a získané hodnoty parametrů charakterizujících únavové procesy závisí na struktuře materiálu.

Tab. 1. Výsledky měření únavové životnosti.

vzorek č.	amplituda napětí σ_a [MPa]	počet cyklů N_f	poznámka
1	4.45	1	
2	4.53	1	
3	4.17	1	
4	3.46	70	
5	3.94	140	
6	3.46	1 560	
7	3.54	2 600	
8	3.27	29 352	
9	3.35	39 019	
10	3.42	66 000	
11	3.15	187 275	
12	3.54	241 822	
13	3.07	2 000 000	neporušen
14	3.11	2 000 000	neporušen
15	3.11	2 000 000	neporušen
16	3.11	2 000 000	neporušen

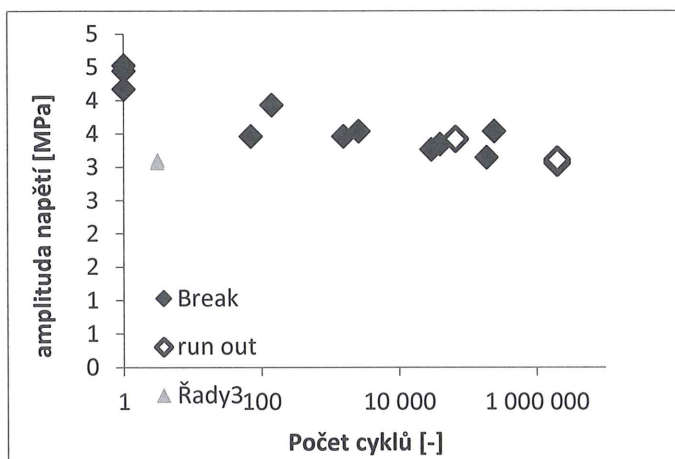


Obr. 1. Výkres použitých zkušebních těles pro stanovení Wöhlerovy křivky



$$\sigma_{dol} = \frac{M * z}{I}$$

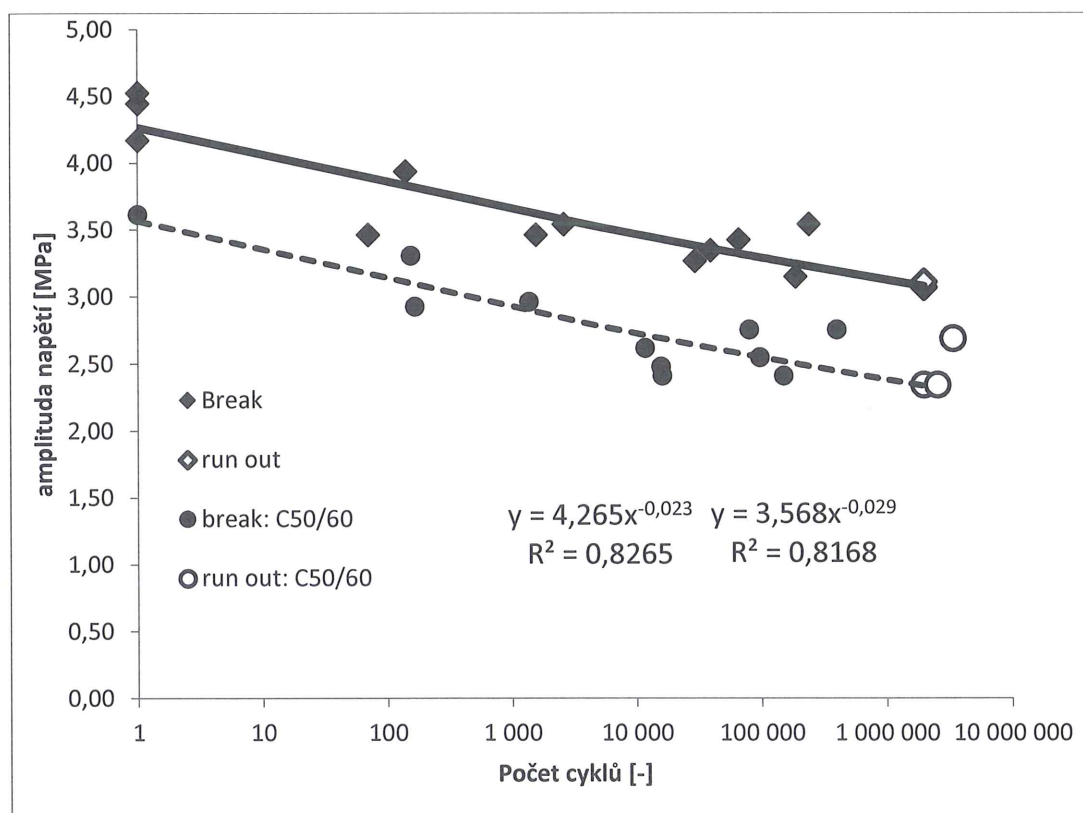
Obr. 2. Schéma uspořádání zkoušky a vztah pro maximální tahové napětí.



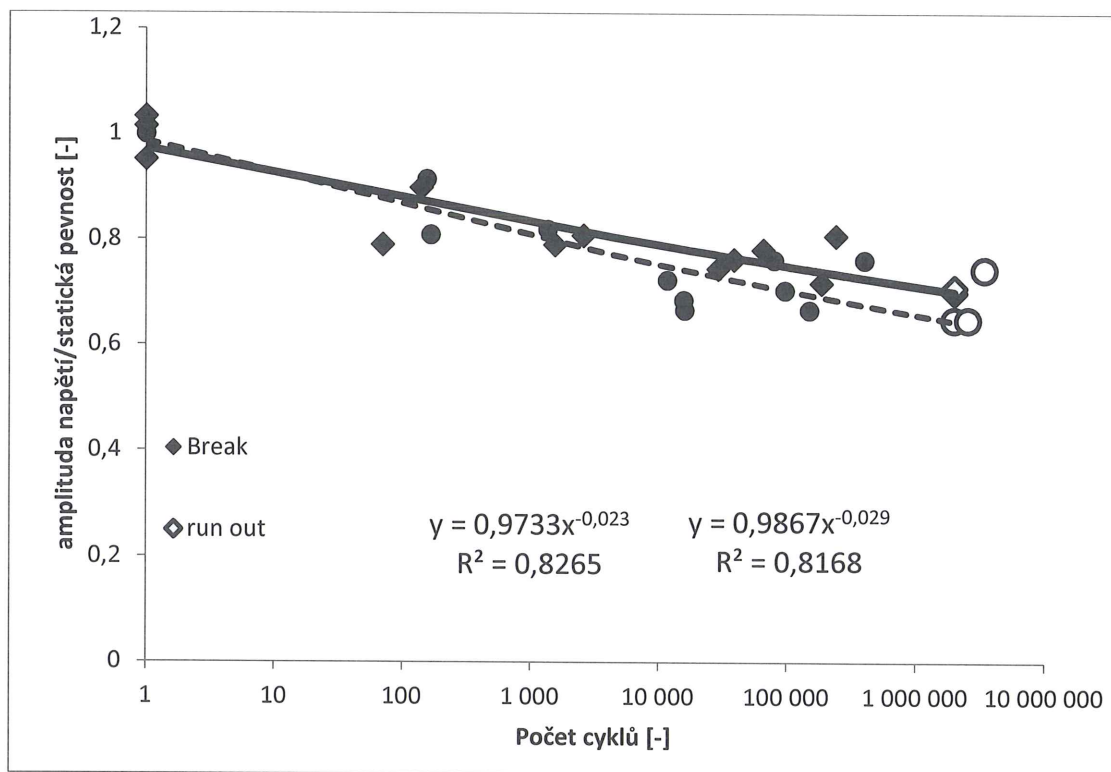
Obr. 3. Experimentálně stanovené životnosti zkušebních těles. Značky bez výplně označují neporušená zkušební tělesa.



Obr. 4. Struktura studovaného betonu kamenivo do 8 mm směr sedání



Obr. 5. Odhad střední hodnoty a individuální hodnoty σ_a a koeficient determinace R^2 pro studovaný materiál a pro C50/60.



Obr. 6. Srovnání Wöhlerovy křivky pro studovaný materiál a C50/60.