

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/útvár:</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/útvár:</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/útvár:</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 Seitzl, 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/útvár:</i>	Skupina vysokocyklové únavy
<i>Telefonní číslo/a:</i>	532290361 <i>E-mail:</i> seitzl@ipm.cz
<i>Příspěvek tvůrce (slovně):</i>	Specializované zkoušky mechanických vlastností betonu – Brazilský test a únavové zkoušky, koordinace projektu za Ústav fyziky materiálů AV ČR
<i>Podíl na řešení v %:</i>	25

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. Konstrukční 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

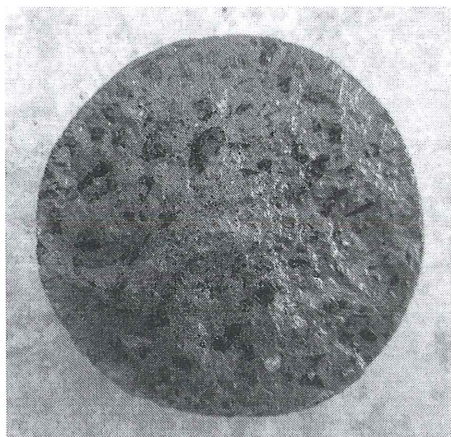
4. Název výsledku:

Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky

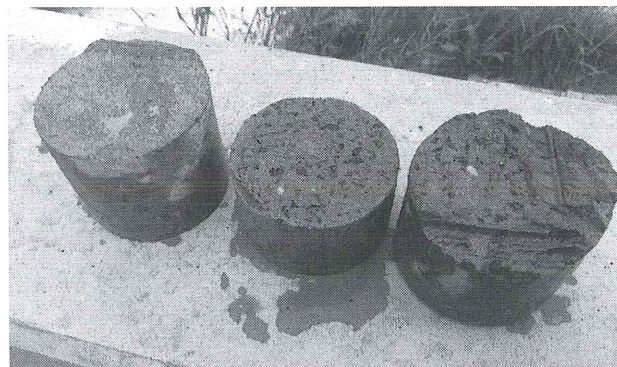
5. Stručný popis výsledku (co je podstatou výsledku a co je v něm nové):

Podstatou výsledku a výzkumu je navržená receptura vysokohodnotného betonu, vhodná pro navrženou modulární řadu předpjatých mostních nosníků. Specifikem řešené výzkumné úlohy byla nutnost vhodně navrhnout a optimalizovat technologii výroby v průmyslových podmínkách. Mezi specifické požadavky pro vysokohodnotné betony patří například konzistence a doprava směsi, způsob ošetřování, odbedňovací pevnost a čas vnášení předpětí. Mezi citlivé oblasti návrhu receptury patří také omezení smršťování a dotvarování. Mezi návrhová kritéria patří také prodloužení trvanlivosti a výrazné zvýšení odolnosti proti chloridům, což je významné zejména u mostních konstrukcí. Kromě průmyslové výroby se ověřila a významně rozšířila znalost o mechanických vlastnostech vysokohodnotného betonu, která následně umožnila pokročilý návrh zahrnující počítačové simulace skutečného chování konstrukce při zatěžování.

6



Obr. 1 Struktura vysokopevnostního betonu



Obr. 2 Ukázkové vývrty z prototypových nosníků

6. Technické parametry výsledku (uveďte 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.

Tab. 1 Receptura vysokopevnostního betonu (15.11.2018)

Složení	kg/m ³
CEM I 42,5 R	650
Struska	60
Vápenec	15
Metaver I	75
Glenium 300	17
Voda	165
0/4 Lípa	400
4/8 Litice	600

6.2. Lomověmechanické vlastnosti

Základní mechanické vlastnosti stanovené laboratorními zkouškami jsou shrnuty v Tab. 2, specifické a specializované zkoušky uvádí Tab. 3. Pro laboratorní zkoušky se využilo betonu dne 31.05.2017. Nosníky se betonovaly dne 19.06.2017.

Tab. 2 Základní mechanické vlastnosti ze zkoušek v laboratoři

Vlastnost	Střední hodnota	Jednotky
Pevnost v tlaku – krychelná (28 dnů)	106,2	[MPa]
Pevnost v tlaku – krychelná (1 den)	65,2	[MPa]
Pevnost v tlaku – hranol (28 dnů)	99,1	[MPa]
Modul pružnosti – statický (hranol)	41,0	[GPa]
Pevnost v tahu – příčná	5,8	[MPa]

Handwritten signature or mark in blue ink.

Tab. 3 Specifické a specializované zkoušky (betonáž 07.06.2018)

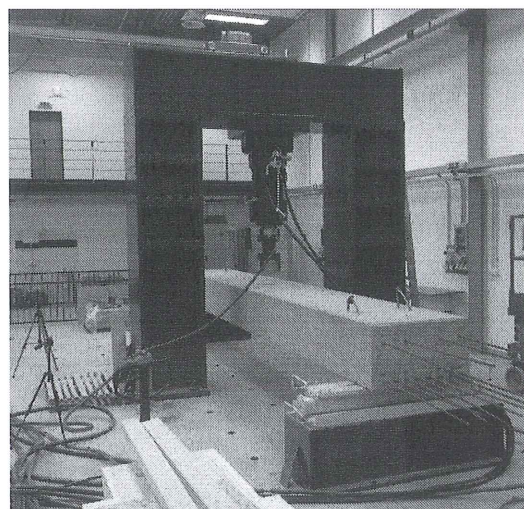
Vlastnost	Střední hodnota		Jednotky
Lomová houževnatost pro mód I	1,106		[MPa m ^{1/2}]
Lomová houževnatost pro mód II	1,638		[MPa m ^{1/2}]
Efektivní lomová houževnatost	1,976		[MPa m ^{1/2}]
Únavové vlastnosti A	4,55	Rozptyl R ² = 0,8583	[MPa/cyklus]
Únavové vlastnosti B	-0.035		[-]

Odolnost vysokopevnostního betonu vůči chloridům se ověřovala specializovanými zkouškami, které jsou uvedeny v samostatné příloze. Vyhodnocení se provádělo ve srovnání s běžným betonem vyráběným v ŽPSV s.r.o. Pevnostní třída běžného betonu byla C50/60, jeho difuzní součinitel $D_c = 10,1 \text{ [m}^2/\text{s} \times 10^{-12}]$ je řádově vyšší než u vysokohodnotné směsi z 31.05.2017 ($D_c = 3,72 \text{ [m}^2/\text{s} \times 10^{-12}]$), a to jak dle penetrace chloridů Nord 443, tak dle AASHTO TP-95. Odolnost betonu vůči pronikání chloridů je tedy pro vysokohodnotnou směs vyšší než pro referenční beton C50/60. Tím je prokázána lepší vlastnost nově navržené směsi. U betonu se určil faktor zrání $m = 0,277$.

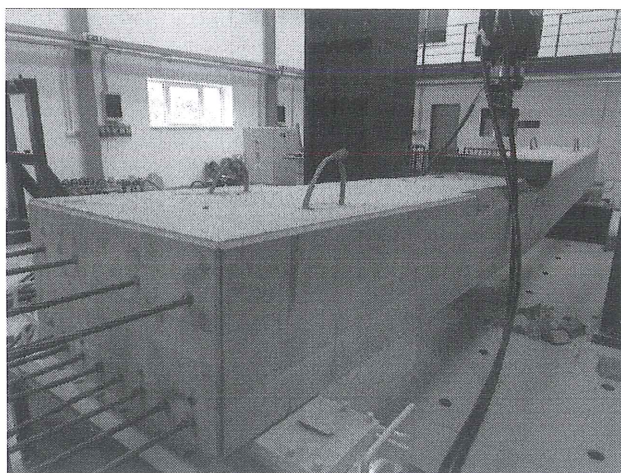
Pro užití vysokopevnostního betonu je navržena modulová řada mostních nosníků s různým průřezem. Z navržené modulové řady byl vybrán obdélníkový průřez a byly vybetonovány dva nosníky délky 7,0 m se zkušebním rozpětím 6,5 m. Zkoušky byly podrobeny třibodovému ohybu v Experimentálním stavebním centru na VŠB – TU Ostrava pro ověření mechanických vlastností, ověření mechanismu porušení a kolapsu. Experimentální zatěžovací zkouška proběhla na univerzálním zkušebním rámu, zatěžování se realizovalo pomocí hydraulického systému Bosch Rexroth o max. zatížení 2000 kN. Vybrané fotografie ze zkoušek jsou zobrazeny pro nosník 12 – C1 a 14 – C2 na obr. 3 a 4. Základní průřez nosníku je 900/520, krytí hlavní nosné výztuže je 50 mm. Použitá betonářská výztuž je B500B a přepínací výztuž Y1860 S7-15,7. Souhrnné údaje o prototypových nosnících z návrhu a zkoušek jsou uvedeny v Tab. 4. Součástí pokročilého optimalizovaného návrhu nosníků bylo také numerické modelování a konstrukční návrh, který zohledňuje zjištěné materiálové vlastnosti kompozitu. Ukázkový výstup numerického modelování a statického výpočtu je na obr. 5.

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

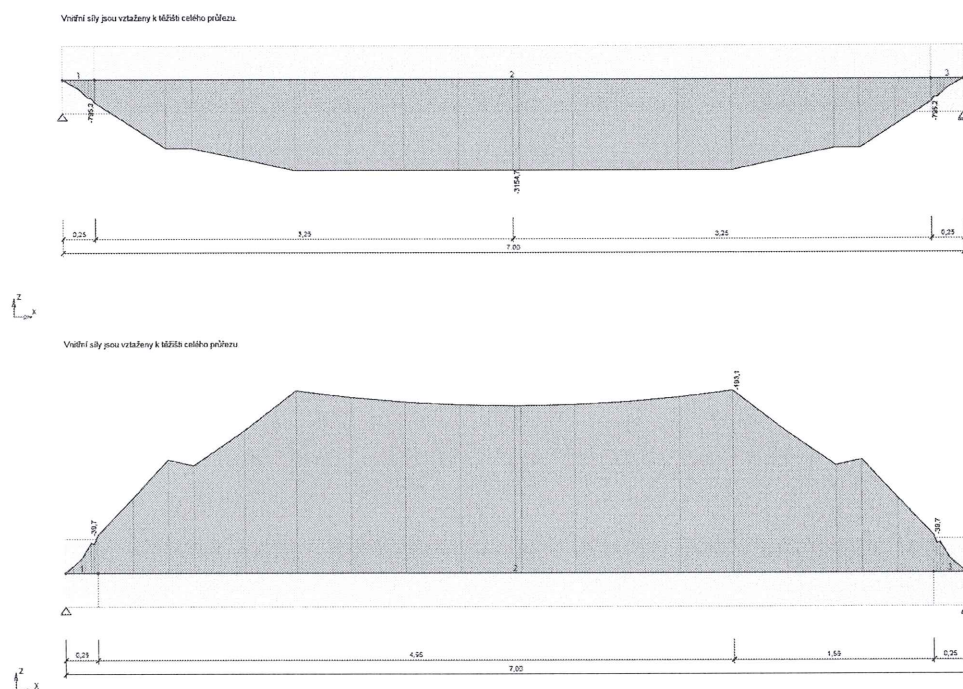
Vlastnost	Nosník 12 – C1	Nosník 14 – C2
Délka [m]	7,0	7,0
Rozpětí [m]	6,5	6,5
Předpínací výztuž	12+4 x S7-15,7	12+4 x S7-15,7
Smyková výztuž	4xΦ8/150	4xΦ8/150
Návrhová pevnost betonu [MPa]	61,0	61,0
Rozhodující kritérium návrhu	ohyb	ohyb
Maximální zatížení v ohybu (návrh. pevnosti materiálů) [kN]	582	582
Maximální zatížení ve smyku (návrh. pevnosti materiálů) [kN]	1068	1068
Maximální zatížení v ohybu (prům. pevnosti materiálů) [kN]	802	802
Maximální zatížení v smyku (prům. pevnosti materiálů) [kN]	1288	1288
Síla na mezi vzniku trhlin (prům. pevnosti materiálů) [kN]	364	364
Maximální zatížení / kolaps nosníku (exp. zatěžování) [kN]	1080	1043



Obr. 3 Nosník 12 – C1 (před zkouškou): detail průřezu (vlevo); celkový pohled (vpravo)



Obr. 4 Nosník 12 – C1 (po zkoušce): celkový pohled (vlevo); detail (vpravo)



Obr. 5 Konstrukční návrh – průběhy vnitřních sil

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 specifík 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/žadatel 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)

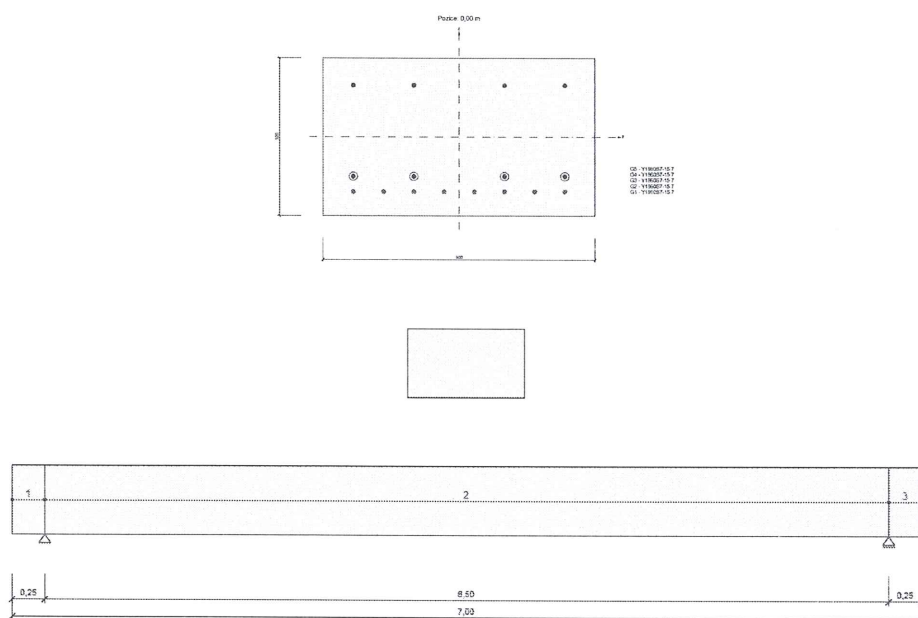
8. Oblast průmyslové využitelnosti výsledku:

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

6

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. 6 Nosník 12/14 – C1/C2 – Tvar a vyztužení nosníků (délka 7,0 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 C1/C2

Příloha 2 – Statický výpočet

Příloha 3 – Souhrnný protokol o zkouškách: Prototypových nosníků

Příloha 4 – Únavové zkoušky: Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky

Příloha 5 – Vyhodnocení difuzních vlastností betonových směsí

be

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
Vysokohodnotný beton pro předpjaté deskové nosníky
STATICKÝ VÝPOČET

Tvůrci prototypu:

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

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

Stanislav Seidl, 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. Pavína Matečková, Ph.D.



Ing. Pavína Matečková, Ph.D.

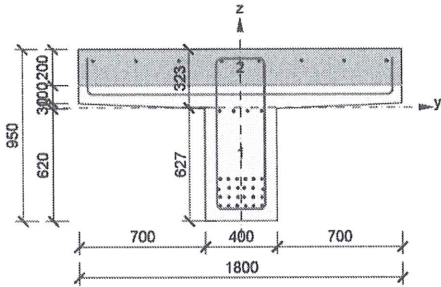
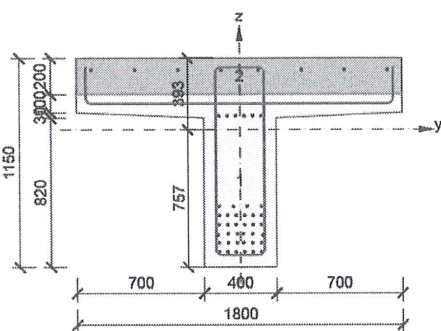
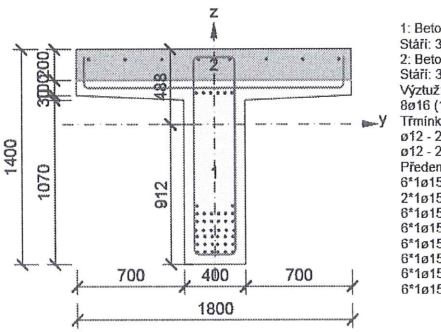
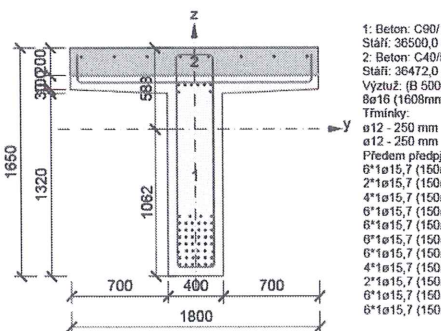
Zástupce řešitelského kolektivu FAST VŠB – TU Ostrava



Vysokohodnotný beton pro předpjaté mostní nosníky

Statický výpočet

Řada předpjatých mostních nosníků z vysokohodnotného betonu:

 1: Beton: C90/105 Stáří: 36500,0 d 2: Beton: C40/50 Stáří: 36472,0 d Výztuž: (B 500B) 8ø16 (1608mm²), z = 258 mm Třmínky: ø12 - 250 mm ø12 - 250 mm Předem předpjaté kabely: (Y1860S7-15.7) 4*1ø15,7 (150mm²), z = -19 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -394 mm 4*1ø15,7 (150mm²), z = -444 mm 2*1ø15,7 (150mm²), z = -452 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -494 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -544 mm	<u>Mostní nosník, rozpětí 15 m</u> - Prefabrikovaný průřez výška 750 mm - Dobetonávka spřažené desky 200 mm - Předpětí 28 kabely, 4 řady dolní výztuž, 1 řada horní výztuž - Třmínková výztuž Ø12/70 v krajních částech nosníku, Ø12/250 uprostřed nosníku
 1: Beton: C90/105 Stáří: 36500,0 d 2: Beton: C40/50 Stáří: 36472,0 d Výztuž: (B 500B) 8ø16 (1608mm²), z = 328 mm Třmínky: ø12 - 250 mm ø12 - 250 mm Předem předpjaté kabely: (Y1860S7-15.7) 8*1ø15,7 (150mm²), z = 76 mm 4*1ø15,7 (150mm²), z = -424 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -474 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -524 mm 4*1ø15,7 (150mm²), z = -574 mm 2*1ø15,7 (150mm²), z = -582 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -624 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -674 mm	<u>Mostní nosník, rozpětí 20 m</u> - Prefabrikovaný průřez výška 950 mm - Dobetonávka spřažené desky 200 mm - Předpětí 40 kabely, 6 řad dolní výztuž, 1 řada horní výztuž - Třmínková výztuž Ø12/70 v krajních částech nosníku, Ø12/250 uprostřed nosníku
 1: Beton: C90/105 Stáří: 36500,0 d 2: Beton: C40/50 Stáří: 36472,0 d Výztuž: (B 500B) 8ø16 (1608mm²), z = 423 mm Třmínky: ø12 - 250 mm ø12 - 250 mm Předem předpjaté kabely: (Y1860S7-15.7) 6*1ø15,7 (150mm²), z = 205 mm 2*1ø15,7 (150mm²), z = -529 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -579 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -629 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -687 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -729 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -779 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -829 mm	<u>Mostní nosník, rozpětí 25 m</u> - Prefabrikovaný průřez výška 1200 mm - Dobetonávka spřažené desky 200 mm - Předpětí 44 kabely, 7 řad dolní výztuž, 1 řada horní výztuž - Třmínková výztuž Ø12/70 v krajních částech nosníku, Ø12/250 uprostřed nosníku
 1: Beton: C90/105 Stáří: 36500,0 d 2: Beton: C40/50 Stáří: 36472,0 d Výztuž: (B 500B) 8ø16 (1608mm²), z = 523 mm Třmínky: ø12 - 250 mm ø12 - 250 mm Předem předpjaté kabely: (Y1860S7-15.7) 6*1ø15,7 (150mm²), z = 321 mm 2*1ø15,7 (150mm²), z = 271 mm 4*1ø15,7 (150mm²), z = -629 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -679 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -729 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -779 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -829 mm 4*1ø15,7 (150mm²), z = -879 mm 2*1ø15,7 (150mm²), z = -887 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -929 mm 6*1ø15,7 (150mm²), z = -979 mm	<u>Mostní nosník, rozpětí 30 m</u> - Prefabrikovaný průřez výška 1450 mm - Dobetonávka spřažené desky 200 mm - Předpětí 54 kabely, 8 řad dolní výztuž, 2 řady horní výztuž - Třmínková výztuž Ø12/50 v krajních částech nosníku, Ø12/250 uprostřed nosníku

Vysokohodnotný beton pro předpjaté mostní nosníky

Statický výpočet

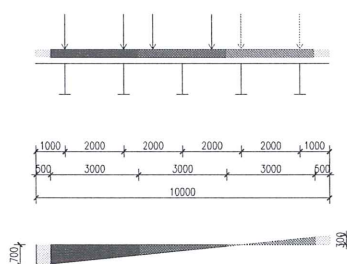
Návrh předpjatých mostních nosníků

Zatížení mostních nosníků bylo uvažováno na bezpečné straně nejméně příznivou variantou. Zatěžovací šířka mostu je 2,0 m. Nejméně příznivě zatížený je krajní nosník mostu, šířka mostu se uvažuje na bezpečné straně 10 m, viz. Obr. 1.

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. Zatížení bylo stanoveno v souladu s normou ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení mostů dopravou.

Byly uvažovány následující zatěžovací stavy:

- Zatížení vlastní tíhou nosníku
- Zatížení ostatním stálým zatížením $g_{1k} = 5,0 \text{ kN.m}^{-2}$
- Zatížení mostu dopravou (LM1)



Obr.1: Příčný roznos zatížení na mostě šířky 10 m

Zatížení dvojnápravou TS1, pruh 1:

Každá náprava o tíze $\alpha_{Q1} \cdot Q_{k1} = 1,0 \cdot 300 = 300 \text{ kN}$

Součinitel příčného roznosu pro nápravu 1: 0,6

Součinitel příčného roznosu pro nápravu 2: 0,4

Zatížení dvojnápravou TS2, pruh 2:

Každá náprava o tíze $\alpha_{Q2} \cdot Q_{k2} = 1,0 \cdot 200 = 200 \text{ kN}$

Součinitel příčného roznosu pro nápravu 1: 0,3

Součinitel příčného roznosu pro nápravu 2: 0,1

Zatížení rovnoměrným zatížením UDL, pruh 1:

Zatížení $\alpha_{q1} \cdot q_{k1} = 1,0 \cdot 9,0 = 9,0 \text{ kN.m}^{-2}$.

Součinitel příčného roznosu: 0,65 a 0,35, náhradní spojitě zatížení je pak: $\frac{0,65+0,35}{2} \cdot 9,0 = 4,5 \text{ kN.m}^{-2}$.

Šířka pruhu je 3 m, spojitě zatížení pak $4,5 \cdot 3,0 = 13,5 \text{ kN.m}^{-1}$.

Zatížení rovnoměrným zatížením UDL, pruh 2:

Zatížení $\alpha_{q2} \cdot q_{k2} = 2,4 \cdot 2,5 = 6,0 \text{ kN.m}^{-2}$.

Součinitel příčného roznosu: 0,4 a 0,05, náhradní spojitě zatížení je pak: $\frac{0,35+0,05}{2} \cdot 6,0 = 1,2 \text{ kN.m}^{-2}$.

Šířka pruhu je 3 m, spojitě zatížení pak $1,2 \cdot 3,0 = 3,6 \text{ kN.m}^{-1}$.

Zatížení rovnoměrným zatížením UDL, pruh 3:

Zatížení $\alpha_{q2} \cdot q_{k2} = 1,2 \cdot 2,5 = 3,0 \text{ kN.m}^{-2}$.

Součinitel příčného roznosu: 0,05 a 0, náhradní spojitě zatížení je pak: $\frac{0,05+0,0}{2} \cdot 3,0 = 0,075 \text{ kN.m}^{-2}$.

Šířka pruhu je 0,5 m, spojitě zatížení pak $0,5 \cdot 0,075 = 0,038 \text{ kN.m}^{-1}$.

Celkové zatížení dvojnápravou se uvažuje 190 kN (na každou nápravu), celkové spojitě rovnoměrné zatížení se uvažuje hodnotou 18 kN.m^{-1} .

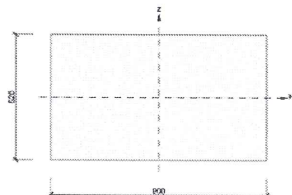
Vysokohodnotný beton pro předpjaté mostní nosníky

Statický výpočet

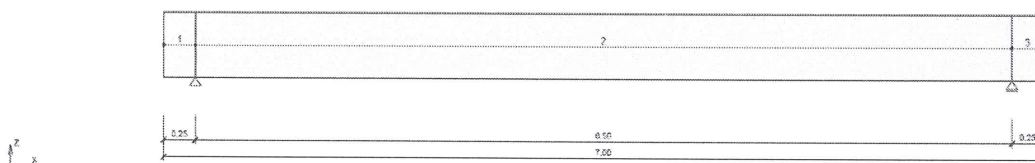
Základní informace:

Pro ověření vlastností vysokohodnotného betonu byly vyrobeny 2 deskové nosníky, které byly podrobeny zatěžovací zkoušce tříbodových ohybem v experimentálním centru FAST. Rozměry nosníku a statické schéma je patrné z Obr. 2, Obr. 3. Betonáž prototypů proběhla 19.06.2017.

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.



Obr. 2: Rozměry průřezu



Obr. 3: Délka nosníku a statické schéma

Materiálové vlastnosti:

Beton: C 90/105

Krychelná pevnost v tlaku, 28 dnů:	106,18 MPa	(zkouška)
Hranolová pevnost v tlaku, 28 dnů:	99,00 MPa	(zkouška)
Modul pružnosti statický, hranol:	41,00 GPa	(zkouška)
Modul pružnosti dynamický, hranol:	49,97 GPa	(zkouška)
Průměrná pevnost v tlaku:	$f_{cm} = 99$ MPa	(výpočetní charakteristiky)
Charakteristická pevnost v tlaku:	$f_{ck} = 91$ MPa	(výpočetní charakteristiky)
Návrhová pevnost v tlaku:	$f_{cd} = 61$ MPa	(výpočetní charakteristiky)
Modul pružnosti:	$E_c = 41$ GPa	(výpočetní charakteristiky)

Výpočetní materiálové charakteristiky předpínací výztuže Y1860 S7-15,7:

Pevnost předpínací výztuže:	$f_{pk} = 1860$ MPa
Smluvní mez kluzu:	$f_{p0,1k} = 1640$ MPa
Návrhová pevnost:	$f_{pd} = 1426$ MPa
Modul pružnosti:	$E_p = 195$ GPa

Výpočetní materiálové charakteristiky betonářské výztuže B500B:

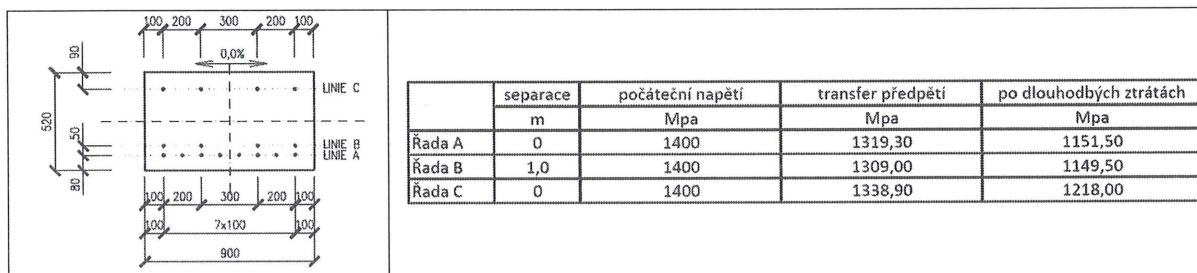
Mez kluzu výztuže:	$f_{yk} = 500$ MPa
Návrhová mez kluzu:	$f_{yd} = 434,78$ MPa
Modul pružnosti:	$E_p = 200$ GPa

Vysokohodnotný beton pro předpjaté mostní nosníky

Statický výpočet

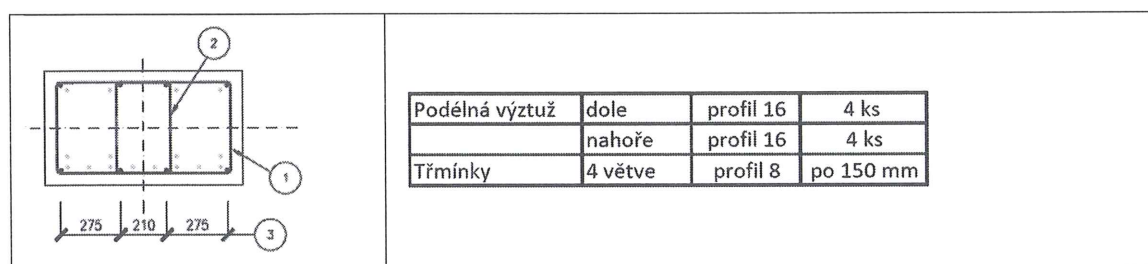
Vyztužení průřezu:

Vyztužení předpínací výztuží:



Obr. 4: Vyztužení předpínací výztuží

Vyztužení betonářskou výztuží:



Obr. 5: Vyztužení betonářskou výztuží

Zatížení a účinky zatížení:

Vlastní tíha:

$$g_{0k} = 0,9 \cdot 0,52 \cdot 25 = 11,7 \text{ kN.m}^{-1}$$

$$g_{0d} = g_{0k} \cdot \gamma_g = 11,7 \cdot 1,35 = 15,80 \text{ kN.m}^{-1}$$

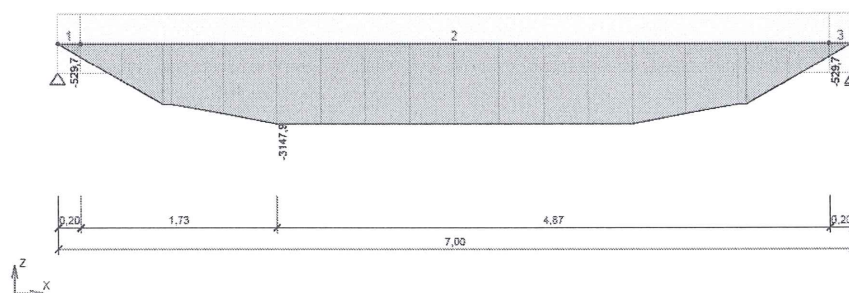
$$V_{Ek,g0} = \frac{1}{2} g_{0k} L = \frac{1}{2} 11,7 \cdot 6,6 = 38,61 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,g0} = \frac{1}{2} g_{0d} L = \frac{1}{2} 15,8 \cdot 6,6 = 52,14 \text{ kN}$$

$$M_{Ek,g0} = \frac{1}{8} g_{0k} L^2 = \frac{1}{8} 11,7 \cdot 6,6^2 = 63,71 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,g0} = \frac{1}{8} g_{0d} L^2 = \frac{1}{8} 15,8 \cdot 6,6^2 = 86,03 \text{ kNm}$$

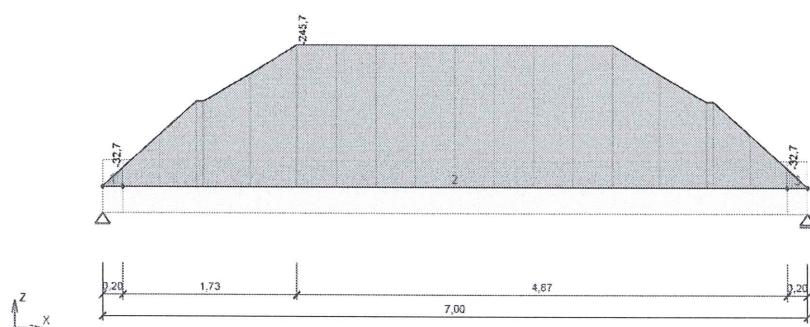
Zatížení předpětím:



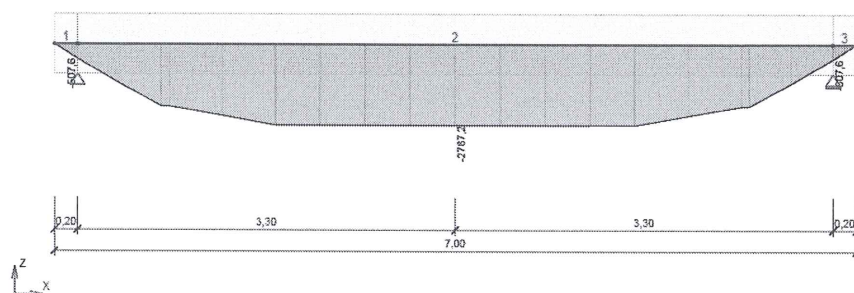
Obr. 6: Normálová síla od předpětí k těžišti průřezu, fáze vnesení předpětí

Vysokohodnotný beton pro předpjaté mostní nosníky

Statický výpočet



Obr. 7: Ohybový moment od předpětí k těžišti průřezu, fáze vnesení předpětí



Obr. 8: Normálová síla od předpětí k těžišti průřezu, fáze konec návrhové životnosti

Posouzení nosníku:

Fáze vnesení předpětí (rozpětí 7,0 m)

Únosnost N - M - M uprostřed rozpětí:

Zatížení:

$$M_{Ed} = 70,7 \text{ kNm} \quad N_{Ed} = -0,6 \text{ kN} \quad N_{pp}^0 = 3401,0 \text{ kN} \quad M_{pp}^0 = 278,1 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} - N_{pp} = -0,6 - 3401,0 = -3401,6 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} - M_{pp} = 70,7 - 278,1 = -207,4 \text{ kNm}$$

Zbytková únosnost:

$$\sigma_p = 1417,1 \text{ MPa} \quad \Delta\sigma_p = f_{p0,1k} - \sigma_p = 1640 - 1417 = 223 \text{ MPa}$$

$$\Delta F_{pA} = 8.150 \cdot 10^{-6} \cdot 223 \cdot 10^3 = 267,6 \text{ kN}, P_1 = 1700,4 \text{ kN}, e_A = 0,180 \text{ m}$$

$$\Delta F_{pB} = 4.150 \cdot 10^{-6} \cdot 223 \cdot 10^3 = 133,8 \text{ kN}, P_2 = 850,3 \text{ kN}, e_B = 0,130 \text{ m}$$

$$x = \frac{N_{Ed} - N_{pp} + \Delta F_{pA} + \Delta F_{pB}}{\lambda \cdot b \cdot f_{cm}} = \frac{3401,6 + 267,6 + 133,8}{0,7 \cdot 0,949 \cdot 10^3} = 0,123 \text{ m}$$

$$M_R = 267,6 \cdot 0,180 + 133,8 \cdot 0,130 - (3401,6 + 267,6 + 133,8) \cdot \left(\frac{0,52}{2} - \frac{0,7 \cdot 0,123}{2} \right) = -760,2 \text{ kNm}$$

Šířka trhlin uprostřed rozpětí:

Pro prostředí XD, prvek předpjatý soudržnou výztuží se vyžaduje dekomprese pro častou kombinaci zatížení, tj. výztuž v hloubce 100 mm uvnitř tlačného betonu.

Vysokohodnotný beton pro předpjaté mostní nosníky

Statický výpočet

Kombinace	N [kN]	M [kNm]	d _e	d _{e,lim}
Častá kombinace, inf.	2997	165	245	100
Častá kombinace, sup.	3312	190	231	100

Únosnost N - M - M , kraj nosníku, 0,5 m od podpory:

Zatížení:

$$M_{Ed} = 17,6 \text{ kNm} \quad N_{Ed} = -19,8 \text{ kN} \quad N_{pp}^0 = 1213,1 \text{ kN} \quad M_{pp}^0 = 78,2 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} - N_{pp} = -19,8 - 1213,1 = -1232,9 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} - M_{pp} = 17,6 - 78,2 = -60,6 \text{ kNm}$$

Zbytková únosnost:

$$\sigma_p = 1011,0 \text{ MPa} \quad \Delta\sigma_p = f_{p0,1k} - \sigma_p = 1640 - 1011,0 = 629 \text{ MPa}$$

$$\Delta F_{p1} = 8.150 \cdot 10^{-6} \cdot 629 \cdot 10^3 = 754,8 \text{ kN}, P_1 = 1213,1 \text{ kN}, e_A = 0,440 \text{ m}$$

$$\Delta F_{p2} = 0 \text{ kN}, P_2 = 0 \text{ kN}, e_B = 0,390 \text{ m}$$

$$x = \frac{N_{Ed} - N_{pp} + \Delta F_{pA} + \Delta F_{pB}}{\lambda \cdot b \cdot f_{cm}} = \frac{1213,1 + 754,8 + 0}{0,7 \cdot 0,949 \cdot 10^3} = 0,064 \text{ m}$$

$$M_R = 754,8 \cdot 0,180 + 0,0130 - (1213,1 + 754,8 + 0) \cdot \left(\frac{0,52}{2} - \frac{0,7 \cdot 0,064}{2} \right) = -331,7 \text{ kNm}$$

Šířka trhlin, kraj nosníku, 0,5 m od podpory::

Pro prostředí XD, prvek předpjatý soudržnou výztuží se vyžaduje dekomprese pro častou kombinaci zatížení, tj. výztuž v hloubce 100 mm uvnitř tlačného betonu

Kombinace	N [kN]	M [kNm]	d _e	d _{e,lim}
Častá kombinace, inf.	1437	-70,4	295	100
Častá kombinace, sup.	1590	-79,9	285	100

Fáze konec návrhové životnosti (rozpětí 6,5 m)

Únosnost N - M - M : Uprostřed rozpětí:

Zatížení tříbodovým ohybem:

$$M_E = M_F + M_{g0} = M_F + 64 \quad N_{Ed} = -0,6 \text{ kN}$$

$$N_{pp}^0 = 2957,1 \text{ kN} \quad M_{pp}^0 = 233,3 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} - N_{pp} = -0,6 - 2957,1 = -2957,7 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} - M_{pp} = M_F + 64 - 233,3 = M_F - 169,4 \text{ kNm}$$

Zbytková únosnost:

$$\sigma_p = 1150,5 \text{ MPa} \quad \Delta\sigma_p = f_{pk} - \sigma_p = 1860 - 1150,5 = 709,5 \text{ MPa}$$

$$\Delta F_{pA} = 8.150 \cdot 10^{-6} \cdot 709,5 \cdot 10^3 = 753,6 \text{ kN}, P_A = 1478,4 \text{ kN}, e_A = 0,180 \text{ m}$$

$$\Delta F_{pB} = 4.150 \cdot 10^{-6} \cdot 709,5 \cdot 10^3 = 376,8 \text{ kN}, P_B = 739,2 \text{ kN}, e_B = 0,130 \text{ m}$$

Vysokohodnotný beton pro předpjaté mostní nosníky

Statický výpočet

$$x = \frac{N_{Ed} - N_{pp} + \Delta F_{pA} + \Delta F_{pB}}{\lambda \cdot b \cdot f_{cm}} = \frac{2957,7 + 753,6 + 376,8}{0,7 \cdot 0,99 \cdot 10^3} = 0,066 \text{ m}$$

$$M_R = 753,6 \cdot 0,180 + 376,8 \cdot 0,130 + (2957,6 + 753,6 + 376,8) \cdot \left(\frac{0,52}{2} - \frac{0,7 \cdot 0,066}{2} \right) = 1153,1 \text{ kNm}$$

$$M_R > M_{Ed} - M_{pp}$$

$$1153,1 > M_F - 169,4 \rightarrow M_F = 1322,5 \text{ kNm} \rightarrow F = 802 \text{ kN}$$

Únosnost ve smyku

Průměrná pevnost výztuže:

$$V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cotg \theta = \frac{201 \cdot 10^{-6}}{0,15} \cdot 0,407 \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot \cotg 45 = 273 \text{ kN}$$

(Maximální zatížení: $F_V \geq 469 \text{ kN}$)

$$V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cotg \theta = \frac{201 \cdot 10^{-6}}{0,15} \cdot 0,407 \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot \cotg 22 = 683 \text{ kN}$$

(Maximální zatížení: $F_V \geq 1288 \text{ kN}$)

Návrhová pevnost výztuže:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cotg \theta = \frac{201 \cdot 10^{-6}}{0,15} \cdot 0,402 \cdot 435 \cdot 10^3 \cdot \cotg 22 = 586 \text{ kN}$$

(Maximální zatížení: $F_V \geq 1068 \text{ kN}$)

Moment na mezi vzniku trhlin

$$\begin{aligned} \frac{M_{g0}}{I_I} \cdot a_{gId} - \frac{P_A + P_B + P_C}{A_I} - \frac{P_A \cdot e_A + P_B \cdot e_B + P_C \cdot e_C}{I_I} \cdot a_{gId} + \frac{M_{cr}}{I_I} \cdot a_{gId} &\leq f_{ctm} \\ \frac{64}{10,546 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,26 - \frac{1381,8 + 689,7 + 730,8}{0,468} - \frac{1381,0,180 + 689,7,0,130 - 730,8,0,170}{10,546 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,26 &+ \frac{M_{cr}}{10,546 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,26 \leq 5,1 \end{aligned}$$

$$1578 - 5988 - 5276 + 24,654 \cdot M_{cr} \leq 5100$$

$$M_{cr} \leq 600 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} \geq 364 \text{ kN}$$

Závěr:

K porušení nosníku dojde vyčerpáním ohybové únosnosti. Maximální síla na mezi porušení pro průměrné pevnosti materiálů při zatížení nosníku tříbodovým ohybem je vypočtena hodnotou 802 kN, síla na mezi vzniku trhlin je vypočtena hodnotou 364 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 Seidl, 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.

Oldřich Sucharda

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, průřezech 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.

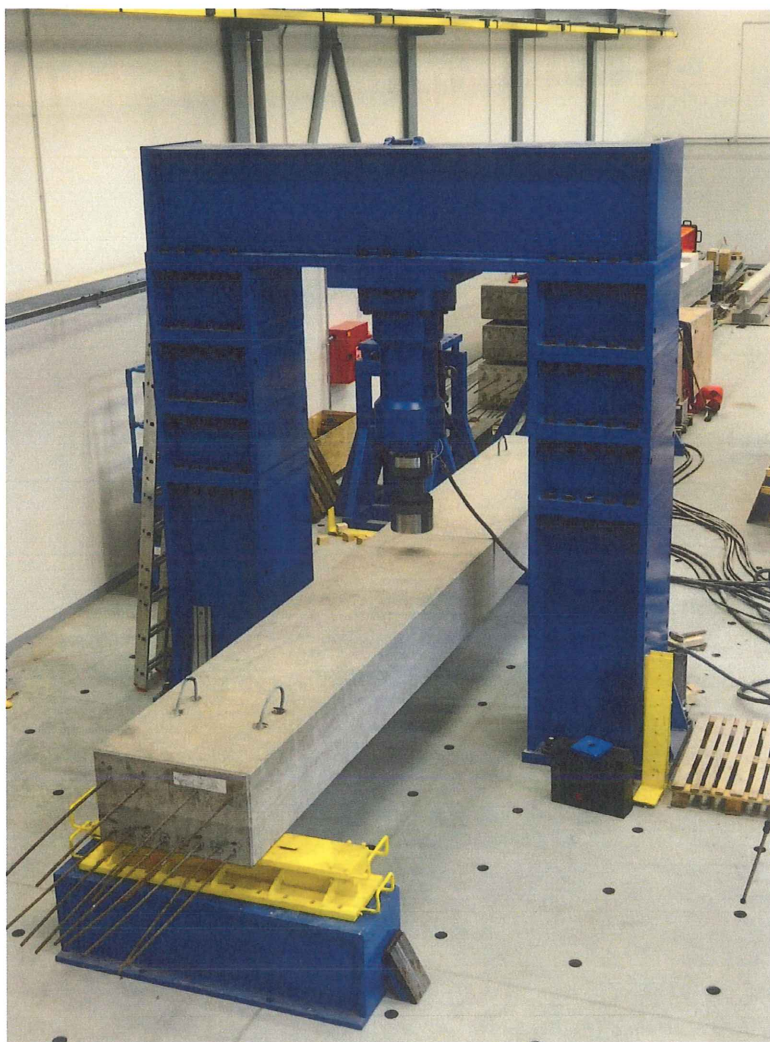
Tab. 1 Specifikace prototypových nosníků

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 AHLBORN 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)

3. STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

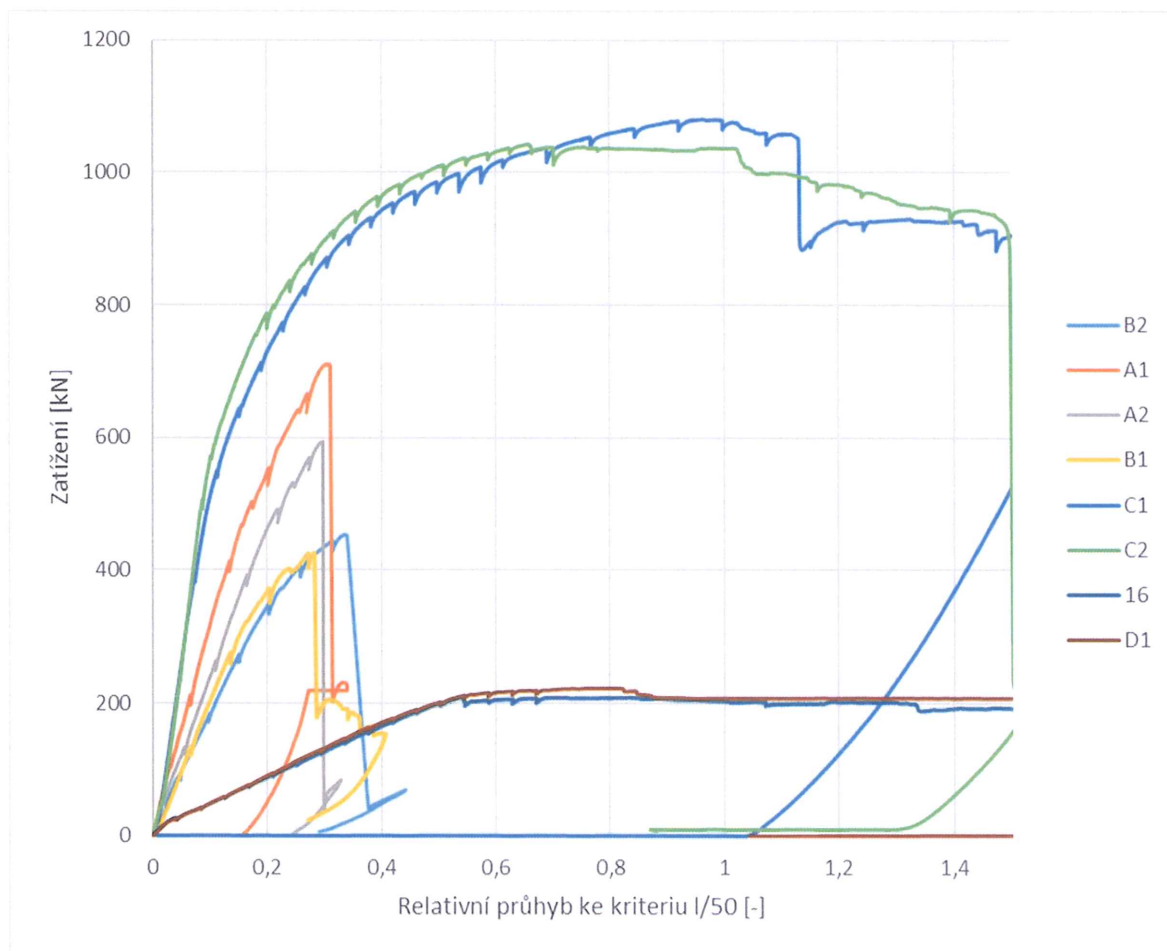
Statické zatěžovací zkoušky sledovaných železobetonových a předpjatých trámů proběhly od března do srpna 2019. Termíny zkoušek uvádí tab. 2. Při statické zatěžovací zkoušce bylo postupováno podle individuálního zatěžovacího postupu, který je modifikován pro validaci pokročilých výpočetních modelů. Zatěžovací 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	Trámový železobetonový nosník z vysokopevnostního betonu	10.06.2019	710	Ohyb (Smyk)
A2 (5)	2	Trámový železobetonový nosník z vysokopevnostního betonu	03.06.2019	593	Ohyb (Smyk)
B1 (6)	3	Alkalicky aktivovaný kompozit pro trámový železobetonový nosník	07.06.2019	426	Ohyb (Smyk)
B2 (4)	4	Alkalicky aktivovaný kompozit pro trámový 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

Libor Štěrba

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

4

FAKULTA STAVEBNÍ

L. Poděště 1875, 708 00 Ostrava - Poruba, tel.: 597321938, 597321932

KATEDRA STAVEBNÍCH HMOT A DIAGNOSTIKY STAVEB

Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky (31.5.2017, 19.6.2017)

Pořad. číslo: 1

Objednatel:

ze dne: 6.9.2019

Stavba (HS): Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů, registrační číslo projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004505.

Výsledky laboratorních zkoušek-souhrn

Zkouška	Číslo v lab. deníku	Typ ¹⁾ tělesa	Rozměry tělesa před zkouškou			Hmot- nost tělesa	Objem. hmot. tělesa	Datum		Stáří vzorku	Síla	Pevnost v tlaku		Poznámky
			Šířka	Šířka	Výška			Výroby tělesa	Zkoušení			Vzorku	Průměr	
													Průměr	
													65,21	
													106,18	
													6,575	
													6,76	
													6,39	

¹⁾ K - krychle, V - válec, H - hranol, T - trámeček

ZÁVĚRY:

Zpracoval: Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.



Stavba (HS): Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů, registrační číslo projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/15 019/0004505.

Podpis:

Únavové zkoušky:

Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky

vzorky (31. 5. 2017), nosníky (19. 6. 2017)

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

Vypracovali:

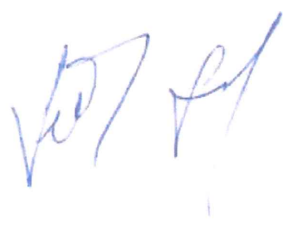
doc. Ing. Stanislav Seitzl, Ph.D.

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 **vysokohodnotného betonu pro předpjaté nosníky**. Podle zadání bylo hlavními cíli laboratorního měření:

- stanovení Wöhlerovy křivky a meze únavy při laboratorní teplotě,
- stanovení křivky odolnosti při kombinovaném módu namáhání I+II 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 24 zkušebních těles, která byla u řešitele označena pořadovými čísly 1 až 24. 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 $\sigma_c = 4,55$ 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 $f_c = 106,18$ 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. Stanovení křivky rezistence pro kombinovaný mód namáhání

Zadavatel vyrobil a dodal ke zkouškám válcová zkušební tělesa $\varnothing 150$ mm délka 300 mm podle požadavku řešitele. Následně byla tělesa rozřezána na válce tloušťky $t = 30$ mm a opatřena iniciačními zářezy délky 40 mm a 60 mm. Tyto zářezy byly různě natočeny vůči poloze (směru) zatížení, tímto bylo docíleno zatížení kombinovaným módem I/II (úhly natočení byly v rozmezí 0° – čistý tahový mód, $(0^\circ\text{--}25^\circ)$ – kombinovaný mód a 25° – čistý smykový mód II). Schéma zkoušky na tělese typu Brazílského disku je zobrazeno na Obr. 7.

Celkem bylo připraveno 21 zkušebních těles, z toho 10 se zářezem délky 40 mm, která byla u řešitele označena pořadovými čísly 4_01 až 4_10, a 11 se zářezem délky 60 mm, která byla u řešitele označena pořadovými čísly 6_01 až 6_11.

3.1. Zkušební zařízení

Zkoušky provedené na tělesech typu Brazílského disku byly provedeny na zkušebním lisu s maximální kapacitou 200 kN. Spodní čelisti byly osazeny příloškami se zakřivením $1,5 \times$ poloměr disku (pro zajištění roznosu zatížení do tělesa).

3.2. Provedení zkoušek a jejich vyhodnocení

Křivky rezistence pro kombinovaný mód namáhání byly stanoveny na základě měření na vzorcích typu Brazílský disk se zářezem, viz Obr. 7. Experimenty byly prováděny v režimu zatěžování 0,025 mm/sec za stejných laboratorních podmínek při pokojové teplotě. Experimentální data byla vyhodnocována dle doporučení z odborné literatury **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

3.3. Výsledky zkoušek

Výsledky měření rezistence v kombinovaném módu namáhání I/II jsou uvedeny v Tab. 2 a graficky na Obr. 8. Ke stanovení křivek rezistence v kombinovaném módu namáhání bylo použito GMTS kritérium. Naměřené hodnoty lomové houževnatosti pro mód I – K_{IC} , mód II – K_{IIC} a její efektivní hodnotu – $K_{I,eff}$ jsou předloženy v Tab. 3. Z Obr. 8 je patrný poměrně velký rozptyl experimentálně stanovených hodnot oproti predikci GMTS kritéria. Důvod tohoto rozptylu, stejně jako u únavových zkoušek, spočívá zřejmě v nehomogenitě struktury materiálu (viz Obr. 4), velikost maximálního kameniva 8 mm.

3.4. Srovnání s materiálem C50/60

Získané výsledky pro křivky rezistence pro kombinovaný mód byly porovnány s odpovídajícími hodnotami pro C50/60. Výsledky pro materiál C50/60 byly již dříve publikovány. Srovnání je

uvedeno na Obr. 10. Z porovnání na Obr. 10 je patrné, že studovaný materiál má ve srovnání s C50/60 větší odolnost pro mód I a současně i pro mód II. Vzhledem k tomu, že v případě stavebních konstrukcí je třeba s koncentrátorem napětí počítat, může být hodnota lomové houževnatosti klíčová, a tedy i rozdíl z hlediska praktických aplikací významný. Uvedené rozdíly lze opět vysvětlit na základě rozdílné struktury a složení materiálu.

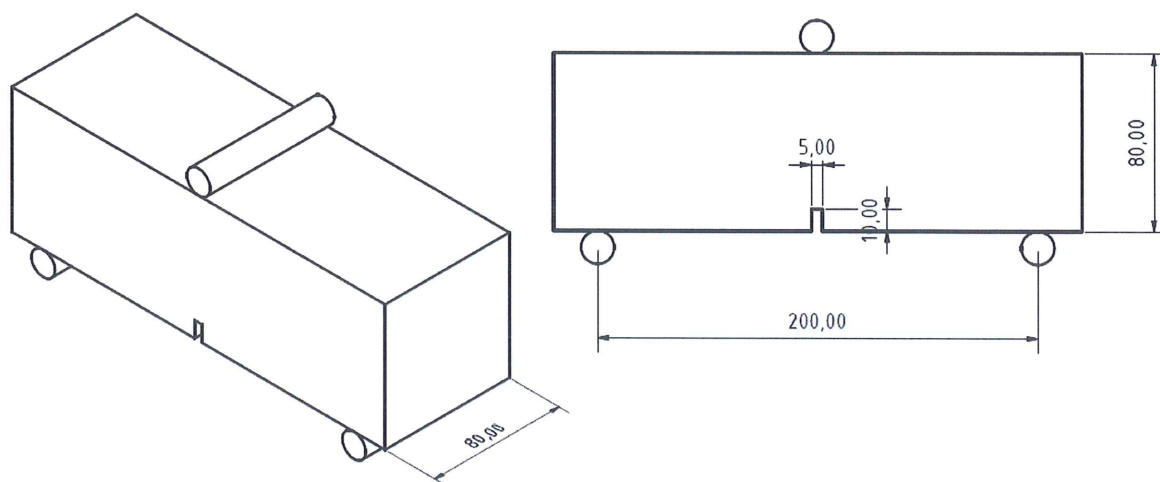
4. Závěr

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

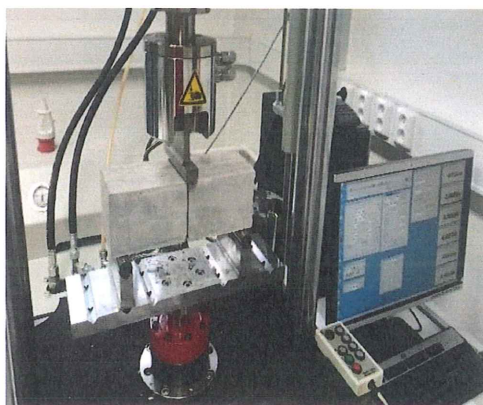
- Studovaný materiál má v absolutních hodnotách lepší únavovou odolnost, ale jeho únavová odolnost se pak rychleji snižuje.
- Studovaný materiál má lepší vlastnosti lomové houževnatosti pro normálový mód I a současně i pro kombinovaný mód namáhání I/II.
- Uvedené srovnání obou materiálů nemá obecný charakter 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	8.61	1	
2	7.99	1	
3	7.85	1	
4	7.30	1	
5	7.09	50	
6	7.09	80	
7	6.47	1 094	
8	6.89	1 524	
9	6.89	1 840	
10	6.20	2 686	
11	6.75	3 387	
12	6.61	4 168	
13	6.20	10 181	
14	6.34	11 098	
15	5.92	27 796	
16	5.37	36 536	
17	5.85	40 093	
18	4.96	65 811	
19	5.65	102 173	
20	5.23	425 431	
21	4.68	840 512	
22	4.55	2 000 000	neporušen
23	4.55	2 161 575	neporušen
24	4.96	2 544 755	neporušen

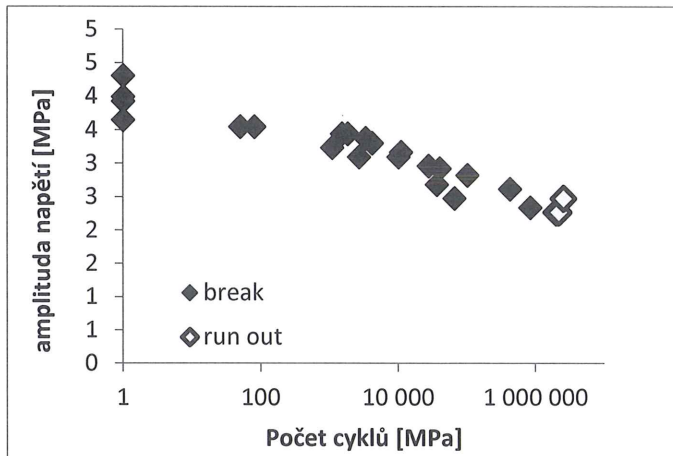


Obr. 1. Výkres použitých zkušebních těles pro stanovení Wöhlerovy křivky



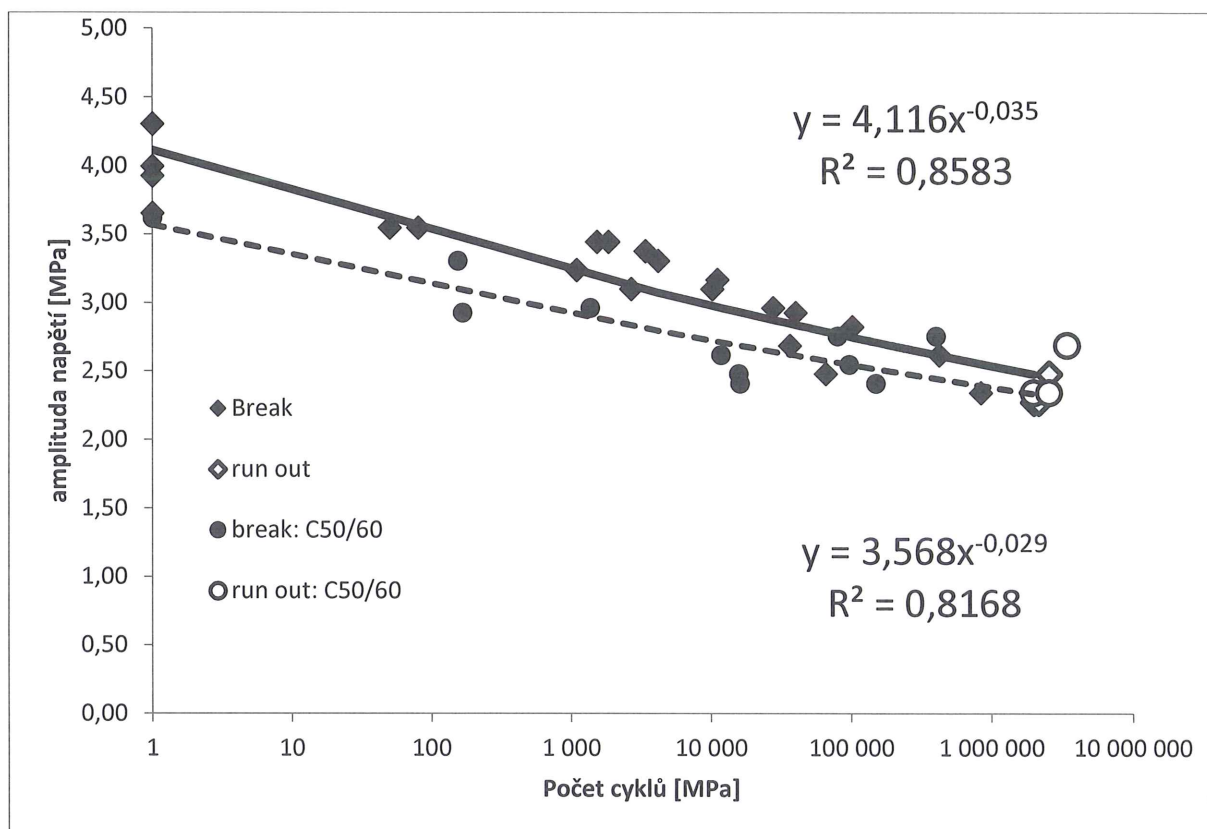
$$\sigma_{dol} = \frac{M * z}{I}$$

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

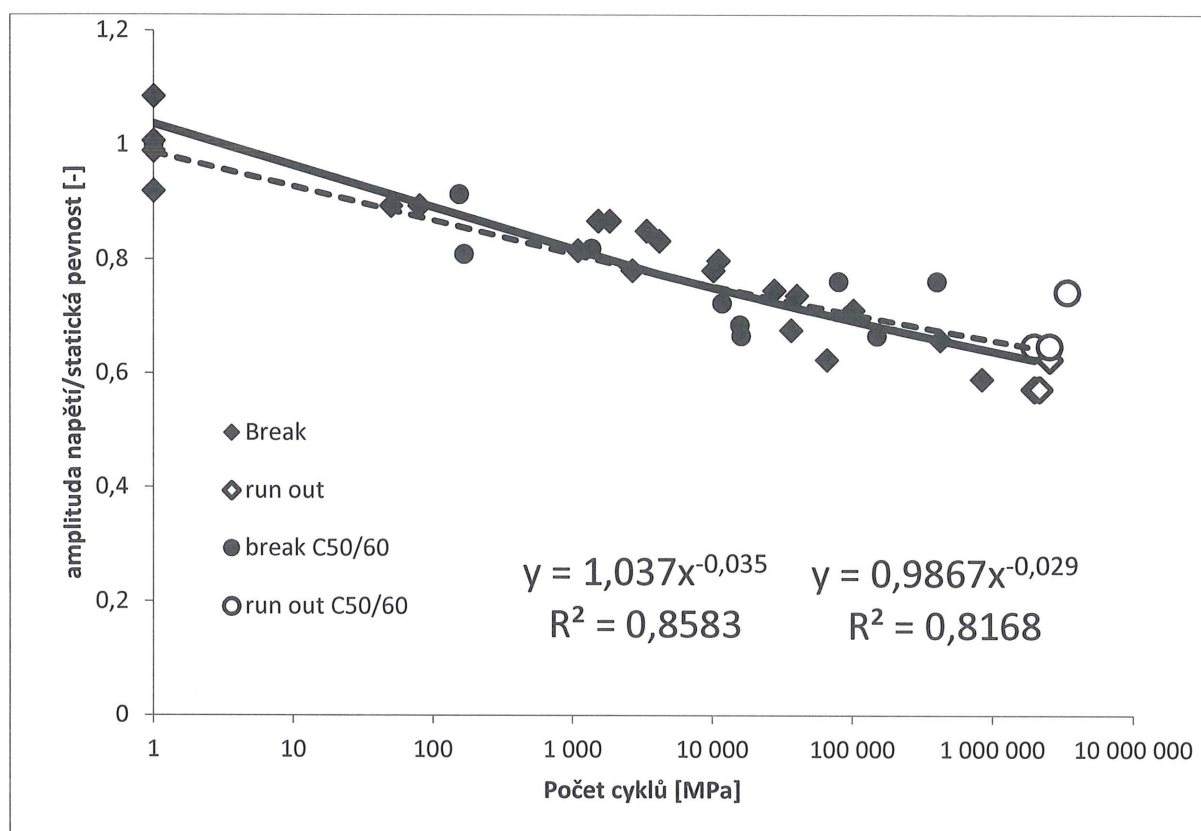


Obr. 3. Experimentálně stanovené životnosti zkušebních těles. Značky bez výplně označují neporušená zkušební tělesa.

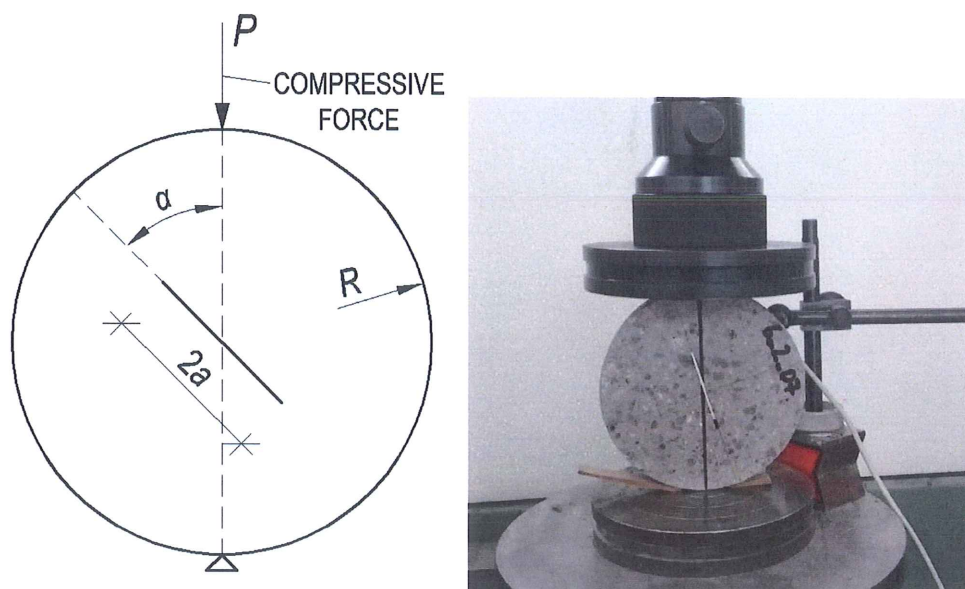
Obr. 4. Struktura studovaného betonu kamenivo do 8 mm směr sedání



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.



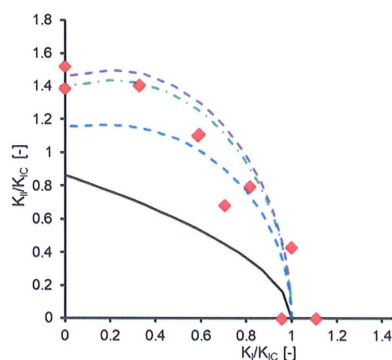
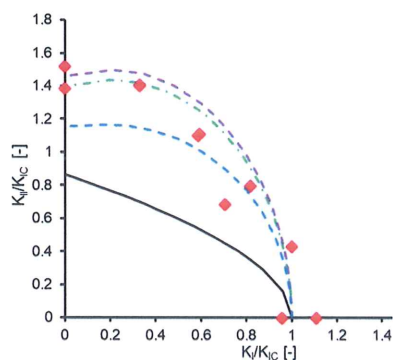
Obr. 7. Brazilský disk se zářezem a ukázka umístění vzorku v experimentálním zařízení.

Tab. 2. Výsledky měření odolnosti v kombinovaném módu I/II namáhání.

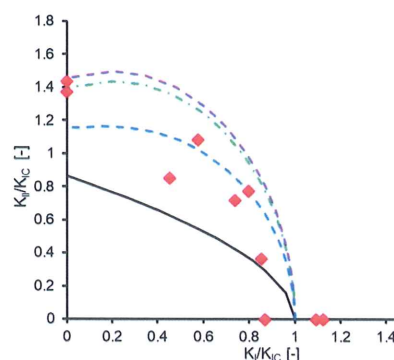
ČÍSLO VZORKU	ÚHEL α [°]	K_I [MPam ^{1/2}]	K_{II} [MPam ^{1/2}]
4_2_01	0	1.061	0.000
4_2_02	0	1.078	0.000
4_2_04	5	0.997	0.384
4_2_11	10	0.972	0.825
4_2_09	15	0.714	1.104
4_2_10	15	0.741	1.145
4_2_07	20	0.438	1.306
4_2_08	20	0.498	1.484
4_2_03	27.2	0.001	1.575
4_2_06	27.2	0.002	1.762
6_2_02	0	1.227	0.000
6_2_01	0	1.060	0.000
6_2_05	5	1.106	0.475
6_2_10	10	0.904	0.878
6_2_11	10	0.780	0.757
6_2_08	15	0.656	1.229
6_2_09	15	0.649	1.216
6_2_06	20	0.365	1.556
6_2_07	20	0.364	1.551
6_2_03	25.2	0.000	1.534
6_2_04	25.2	0.000	1.682

Tab. 3. Hodnoty lomové mechanických parametrů v kombinovaném módu I/II namáhání.

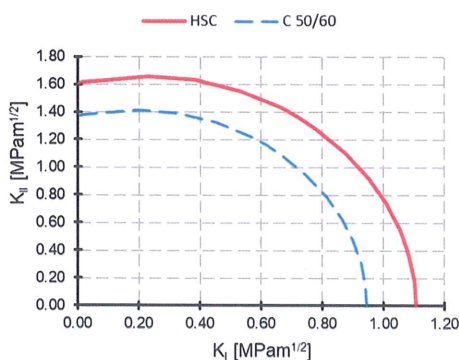
K_{IC} [MPam ^{1/2}]	K_{IIC} [MPam ^{1/2}]	$K_{IC,eff}$ [MPam ^{1/2}]
1,106	1,638	1,976

Obr. 8. Výsledky a normovaná křivka odolnosti pro kombinovaný mód namáhání I+II, sloužící pro vhodnou volbu kritické vzdálenosti r_c .

(a) studovaný materiál



(b) C50/60

Obr. 9. Srovnání normovaných křivek odolnosti pro kombinovaný mód namáhání I+II pro studovaný materiál (a) a C50/60 (b) pro různou kritickou vzdálenost r_c .

Obr. 10. Srovnání materiálových křivek odolnosti pro kombinovaný mód namáhání I+II pro studovaný materiál a C50/60 (střední hodnoty).

KoNaNoS - Komplexní návrh nosníků z pokročilých betonů

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

Prototyp Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky

VYHODNOCENÍ DIFUZNÍCH VLASTNOSTÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ

Tvůrci prototypu:

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

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

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

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

Datum:

16.09.2019

Vypracoval:

Ing. Petr Lehner

doc. Ing. Petr Konečný, Ph.D.

Ing. Pavčina Matečková, Ph.D.

Zástupce řešitelského kolektivu FAST VŠB – TU Ostrava

Vyhodnocení difuzních vlastností betonových směsí
Prototyp C - Vysokohodnotný beton pro předpjaté nosníky
Betonáž 31.05.2017 (vzorky), 19.06.2017 (nosníky)

Petr Konečný, Petr Lehner

V rámci řešení byly vyhodnoceny difuzní vlastnosti betonových směsí. Jako referenční beton byl zvolen beton pevnostní třídy C50/60, který se standardně používá u předpínaných nosníků mostních konstrukcí.

Vyhodnocovanými vlastnostmi byl difuzní součinitel D_c a na něho navázaný faktor zrání m . Jedná se o jeden ze způsobů, jak popsat kvalitu odolnosti betonu vůči pronikání chloridů. Difuzní součinitel lze odvodit pomocí několika různě náročných laboratorních testů. Tradiční možností je analýza chloridového profilu při dlouhodobém působení vodného roztoku NaCl na povrch vzorku. Tento test je možné provést podle modifikované verze dle NT BUILD 443. Další možností jsou testy zrychlené penetrace chloridů ASTM C1202 a testy elektrické rezistivity betonu AASHTO TP-95. Na vyšetřované betonové směsi byly využity testy dle NT BUILD 443 a AASHTO TP-95.

Tabulka 1: Výsledky testů a výpočtů pro směs C50/60

Dny	7	14	28	56	91	161
Povrchový odpor ρ_{SR} [kΩcm]	8.98	12.12	13.25	19.37	19.62	19.75
Objemový odpor ρ_{BR} [kΩcm]	5.71	7.71	8.42	12.32	12.48	12.56
Difuzní součinitel [m ² /s]	1.3E-11	9.6E-12	8.79E-12	6.01E-12	5.93E-12	5.89E-12
Dle AASHTO TP-95 dopočtený referenční difuzní součinitel [m ² /s]						8.40E-12
Dopočtený m – faktor						0.2884
Difuzní součinitel dle Nord 443 [m ² /s]						10.1E-12

Tabulka 2: Výsledky testů a výpočtů pro směs vysokopevnostního betonu, betonáž 31.05.2017

Dny	7	14	28	56	91	161
Povrchový odpor ρ_{SR} [kΩcm]	32.00	39.50	45.50	56.75	66.88	76.50
Objemový odpor ρ_{BR} [kΩcm]	20.47	25.26	29.10	36.29	42.77	48.93
Difuzní součinitel [m ² /s]	3.62E-12	2.93E-12	2.54E-12	2.04E-12	1.73E-12	1.51E-12
Dle AASHTO TP-95 dopočtený referenční difuzní součinitel [m ² /s]						2.45E-12
Dopočtený m - faktor						0.2777
Difuzní součinitel dle Nord 443 [m ² /s]						3.72E-12

Porovnání odolnosti betonů je vyjádřeno odporem vůči vnikání chloridů formou difuzního součinitele. Z následujících tabulek je patrné, že beton C50/60 má difuzní součinitel $D_c = 10,1E-12$ [m²/s] řádově vyšší než vysokohodnotná směs ($D_c = 3,72E-12$ [m²/s]), a to jak dle penetrace chloridů Nord 443, tak dle AASHTO TP-95. Odolnost betonu vůči pronikání chloridů je tedy pro vysokohodnotnou směs vyšší než pro referenční beton C50/60. Tím je prokázána lepší vlastnost nově navržené směsí.

