STUDIUM VLIVU DRUHU PROVZDUŠŇOVACÍCH PŘÍSAD NA VLASTNOSTI PROVZDUŠNĚNÝCH BETONŮ

Ondřej Pikna, Martin Ťažký, Rudolf Hela, Marek Hoško

Jedním ze základních faktorů, které je nutno brát v úvahu při navrhování betonů, je jeho trvanlivost. Mezi vlivy prostředí, jež výrazně ovlivňují trvanlivost zatvrdlého betonu, patří i působení záporných teplot v kombinaci s možným působením chemických rozmrazovacích látek (solí). Předkládaný článek se snaží objasnit a porovnat v praxi využívané provzdušňovací přísady do betonu, jež mají za cíl zlepšení vlastností, zejména trvanlivosti ve zmíněném prostředí mrazu. Článek také popisuje různé metody pro zkoušení provzdušněných betonů.

STUDY OF THE EFFECT OF THE TYPE OF AIR-ENTRAINING ADMIXTURES ON THE PROPERTIES OF AIR-ENTRAINED CONCRETE

One of the elementary factors that must be taken into account when designing concrete is its durability. Among the environmental influences that significantly affect the durability of hardened concrete, the effect of negative temperatures in combination with the possible action of chemical thawing agents (salts) plays a major role. The presented article tries to clarify and compare the currently used air entraining admixtures for concrete, which aim to improve the properties and especially the durability in the mentioned exposition. Furthermore, the article describes various methods for testing air-entrained concrete.

Trvanlivost betonu často ovlivňuje i působení záporných teplot, které v kombinaci se solným roztokem mají kvůli velkým krystalickým tlakům na beton značně destruktivní účinky. Podle autorů (Tunstall, Ley, Scherer) [1] je dokonce dle Clausiovy-Clapeyronovy rovnice potřeba překonat 13,2 MPa krystalizačního tlaku na každý stupeň pod 0 °C, aby bylo zabráněno poškození. Nejvíce namáhanými betony bývají často konstrukční části dopravní infrastruktury (mostovky, cementobetonové kryty apod.) či prefabrikované betonové výrobky (betonové bloky, ploché dlažby, betonové obrubníky, svodidla aj.). Mezi možnosti, jak předejít zmíněným účinkům cyklického zmrazování za přítomnosti vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL), patří samotná skladba betonové směsi, použití kvalitních vstupních surovin (nízké množství odplavitelných částic, zejména jílovitých u drobného kameniva, mrazuvzdorné hrubé kamenivo apod.), vodní součinitel či vhodná křivka zrnitosti směsi kameniva, typ cementu a příměsí [1].

Jednou z velmi účinných možností ochrany před zmíněnými účinky mrazu je využití tzv. provzdušňovacích přísad, které mají za cíl vytvořit síť rovnoměrně rozmístěných mikropórů o velikosti 10 až 300 µm, které vytváří účinný prostor pro eliminaci nebezpečného krystalizačního tlaku ledu. Účinek těchto mikropórů je připisován jejich velikosti, kdy voda, jež pronikla do tohoto prostoru, nedokáže kvůli svému povrchovému napětí prostor zcela vyplnit a uvnitř mikropóru tak vzniká prostor pro expanzi ledu a vznikajících krystalů soli. Rovnoměrně rozložené mikropóry v betonovém kameni navíc rozrušují síť nežádoucích kapilár a propojení pórové struktury kompozitu. Tímto způsobem pak dochází k omezení kapilární vzlínavosti solného roztoku hlouběji do betonu. V předkládaném článku budou zmíněny dva druhy provzdušňovacích přísad dle převažující zastoupené chemické báze [1]. Jedná se o povrchově aktivní látky, jež mají schopnost snížit povrchovou energii nebo napětí na rozhraní vzduch a voda. Podle polarity je lze rozdělit na aniontové, kationtové, či neiontové.

Cíle experimentálních prací

Primárním cílem experimentu bylo porovnat a objasnit chování dvou druhů provzdušňovacích přísad používaných v betonářské praxi při různém dávkování s ohledem na fyzikální, mechanické a trvanlivostní parametry betonu.

Laboratorně bylo namícháno několik variant s různým množstvím obsahu vzduchu v čerstvém betonu vzniklém díky přídavku daného druhu provzdušňovací přísady.

Použité vstupní suroviny

Byly použity dva druhy provzdušňovacích přísad s různou chemickou bází. První byla na bázi přírodních pryskyřic, druhá pak na bázi syntetických tenzidů. Základní receptura navržených betonů obsahovala portlandský cement CEM I 42,5 R a prané těžené kamenivo ve frakcích 0–4, 4–8 a 8–16 mm z lokality Žabčice. Plastifikační přísada byla použita na bázi PCE. Celkem byly namíchány tři receptury s různým obsahem vzduchu v čerstvém betonu s přísadou na bázi přírodních pryskyřic a tři receptury s různým obsahem vzduchu s přísadou na bázi syntetických tenzidů. Všechny použité přísady byly od stejného výrobce z důvodu zajištění kompatibility. Přehled receptur je uveden v tab. 1. Z pohledu experimentu nebyl přepočítáván skutečný objem betonu dle obsahu vzduchu v čerstvém betonu, ale pro výpočet byla použita střední hodnota, tedy 5,5 %.

Výsledky experimentálních testů

Zkoušky na čerstvých betonech

Všechny receptury byly míchány na konzistenci 180–200 mm sednutí kužele, které bylo vzhledem k provzdušnění dosaženo drobnou úpravou vodního součinitele (tab. 1). Následně byla sta-

Tab. 1 Receptury provzdušněných betonů
Tab. 1 Mixtures of air-entrained concrete

Receptura	Množství vzduchu v čerstvém betonu [%]	CEM I 42,5 R [kg/m³]	DTK 0–4 (prané) [kg/m³]	HTK 4–8 [kg/m³]	HTK 8–16 [kg/m³]	Vodní součinitel [-]	Super-plastifikační přísada [kg/m³]
AE 3,0	3,0	370	910	190	660	0,42	2,3
AE 5,5	5,5	370	910	190	660	0,41	2,3
AE 8,7	8,7	370	910	190	660	0,41	2,3
LP 3,4	3,4	370	910	190	660	0,42	2,3
LP 5,7	5,7	370	910	190	660	0,41	2,3
LP 9,2	9,2	370	910	190	660	0,41	2,3

Pozn.: DTK – drobné těžené kamenivo, HTK – hrubé těžené kamenivo

Tab. 2 Výsledky fyzikálních zkoušek čerstvých betonů
Tab. 2 Fresh concrete physical test results

Receptura	Obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m³]	Sednutí kužele [mm]
AE 3,0	3,0	2 320	200
AE 5,5	5,5	2 280	180
AE 8,7	8,7	2 170	200
LP 3,4	3,4	2 320	180
LP 5,7	5,7	2 270	190
LP 9,2	9,2	2 190	200

novena objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 a pomocí tlakové metody dle ČSN EN 12350-7 byl stanoven obsah vzduchu v čerstvém betonu. V tab. 2 jsou uvedeny výsledky těchto zkoušek [2], [3], [4].

Jednotlivé směsi byly navrženy ve třech různých variantách množství obsahu vzduchu v čerstvém betonu, jež reprezentují nízké, běžné a vyšší množství obsahu vzduchu v betonu. Důležitým aspektem bylo rovněž dosažení těchto hodnot u obou druhů použitých provzdušňovacích přísad. Prakticky totožné hodnoty obsahu vzduchu v čerstvém betonu jsou patrné z dosažených hodnot objemových hmotností čerstvého betonu u obou typů přísad.

Zkoušky na zatvrdlých betonech

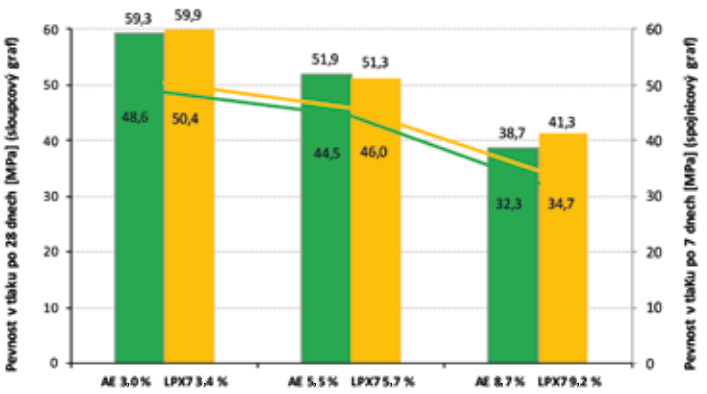
Všechny výsledky zkoušek na zatvrdlých betonech (objemová hmotnost zatvrdlého betonu, nasákavost, hloubka průsaku tlakovou vodou, pevnost v tlaku a stanovení odolnosti betonu proti působení CHRL) byly stanoveny na třech zkušebních tělesech a uvedené výsledky jsou průměrné hodnoty z těchto hodnot.

Z výsledků lze vidět, že při stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 jsou hodnoty průsaku mezi jednotlivými recepturami dost podobné i v odlišném stáří. Podle obecného předpokladu by vyšší pórovitost betonu, tedy vyšší obsah vzduchu, měla způsobit nižší odolnost proti průsaku tlakovou vodou. V tab. 3 ale vidíme, že u receptur s vyšším obsahem vzduchu v betonu k výraznějšímu průsaku tlakovou vodou nedochází (AE 8,7 – 9 mm a LP 9,2 – 13 mm po 28 dnech). Vysvětlením může být, že při vyšším obsahu vneseného vzduchu do betonu je i obsah mikroskopického vzduchu v betonu vyšší a to pak vede k narušení kapilární sítě původních pórů, které jsou spolu „provázané“. Prosáknutí tlakové vody přes takto uměle vytvořenou síť mikropórů je pak náročnější. Tyto hodnoty vypovídají, že vyšší množství vzduchu v betonu nemá výrazný vliv na hodnoty průsaku tlakovou vodou [5], [6].

Z obr. 1 lze vyčíst, že u obou typů provzdušňovacích přísad ve všech časových horizontech s rostoucím obsahem vzduchu klesá pevnost v tlaku (vlivem vyššího obsahu vzduchu). Je patrné, že při využití provzdušňovací přísady na bázi syntetických tenzidů (LP) bylo dosaženo vyšších hodnot pevností v tlaku po 7 dnech (i přes vyšší obsah vzduchu v betonu než u provzdušňovacích přísad na bázi přírodních pryskyřic, např. AE 8,7 % – 32,3 MPa a LP 9,2 % – 34,7 MPa). Tento trend lze pozorovat i po 28 dnech. Zde se již rozdíly více srovnávají (AE 8,7 % – 38,7 MPa a LP 9,2 % – 41,3 MPa. Dosažení vyšších pevností může být spojováno se vznikem odlišné sítě mikropórů než při použití přísad na bázi přírodních pryskyřic [7].

Tab. 3 Výsledky fyzikálních zkoušek zatvrdlých betonů
Tab. 3 Hardened concrete physical test results

Receptura	Obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	Objemová hmotnost zatvrdlého betonu [kg/m³]		Nasákavost [%]		Hloubka průsaku tlakovou vodou [mm]	
		7 dní	28 dní	7 dní	28 dní	7 dní	28 dní
AE 3,0	3,0	2 320	2 310	6,0	6,0	15	12
AE 5,5	5,5	2 280	2 290	5,8	6,0	12	11
AE 8,7	8,7	2 150	2 160	6,3	6,3	10	9
LP 3,4	3,4	2 320	2 330	6,3	6,0	12	11
LP 5,7	5,7	2 280	2 280	6,4	6,0	15	14
LP 9,2	9,2	2 180	2 180	6,8	6,4	19	13



1 Stanovení pevnosti v tlaku
1 Determination of the compressive strength

Tab. 4 Stanovení odolnosti proti působení CHRL
Tab. 4 Determination of resistance of concrete to defrosting chemicals

Receptura	Obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	Množství odpadu po 100 cyklech [g/m^2]
AE 3,0	3,0	1 114
AE 5,5	5,5	830
AE 8,7	8,7	411
LP 3,4	3,4	1 842
LP 5,7	5,7	950
LP 9,2	9,2	771

Tab. 5 Výsledky měření obsahu vzduchu
Tab. 5 Air-entrainment measurement results

Receptura	A			A_{300}		L	Množství odpadu po 100 cyklech [g/m^2]
	tlaková metoda [%]	AVA test [%]	EN 480– 11 [%]	AVA test [%]	EN 480– 11 [%]	[mm]	
AE 3,0	3,0	2,2	3,8	0,2	1,5	0,26	1 114
AE 5,5	5,5	3,9	6,6	0,7	1,4	0,30	830
AE 8,7	8,7	5,4	9,9	1,9	5,2	0,13	411
LP 3,4	3,4	2,6	4,0	0,2	0,7	0,39	1 842
LP 5,7	5,7	4,1	6,7	0,2	1,4	0,28	950
LP 9,2	9,2	5,0	10,4	0,8	2,7	0,17	771

Pozn.: A – celkový obsah vzduchu, A_{300} – obsah mikroskopického vzduchu, L – součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů

Stanovení odolnosti betonu proti působení CHRL po 28 dnech

V další části experimentu bylo provedeno stanovení odolnosti proti působení CHRL (dle ČSN 73 1326 Z1 metoda A). V tab. 4 lze pozorovat výrazné rozdíly v množství odpadu mezi recepturami, a to jak mezi druhy provzdušňovacích přísad, tak i mezi množstvím obsaženého vzduchu v čerstvém betonu. Ve všech variantách obsahu vzduchu dosahuje provzdušňovací přísada na bázi přírodních pryskyřic nižších hodnot odpadu po 100 cyklech působení CHRL než provzdušňovací přísada na bázi syntetických tenzidů. Častému požadavku na množství odpadu do 1 000 g/m^2 pro stupeň vlivu prostředí XF4 nejlépe vyhověly receptury s obsahem vzduchu od cca 5,5 do 9 %. Nejnižších hodnot množství odpadu dosahovala receptura AE 8,7 s celkovým množstvím odpadu 411 g/m^2 (s obsahem vzduchu 8,7 %). Ostatní receptury s obsahem vzduchu okolo 3 % nedosahovaly dostatečné účinnosti provzdušnění. Vzhledem k výsledkům odpadů lze některé receptury klasifikovat jako silně narušené. Dále zde byla prokázána vyšší účinnost provzdušňovacích přísad na bázi přírodních pryskyřic. Vyšší účinnosti je zřejmě dosaženo díky vytvoření odlišné homogennější sítě systému pórů (vyššímu zastoupení mikropórů) než u provzdušňovací přísady na bázi syntetických tenzidů [8].

Air Void Analyzer (AVA)

Postup této metody začíná odebráním vzorku přes síto o velikosti 6 mm. Následně se vzorek vstříkne do zkušebního válce s Petriho miskou a mírně se míchá po dobu 30 s. Promíchání dochází k uvolnění pórů, které procházejí přes kapalinu. Kapalina má vhodnou viskozitu a hydrofilní charakter, díky kterým si bublinky vzduchu zachovávají stejnou velikost jako vzduchové póry v betonu. Bubliny následně stoupají podle Stokesova zákona (větší stoupají rychleji než menší). Stoupající bubliny narážejí do obrácené Petriho misky a tím působí vztlak, čímž dochází ke snížení hmotnosti misky na senzorech váhy. Následně software vyhodnotí velikosti a distribuci pórů v čerstvém betonu. Zařízení je vidět na obr. 2c [9].

V porovnání jednotlivých metod pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu je metoda AVA časově náročnější (cca 30 min), ale nevyžaduje dodatečné zhutnění vzorku. Je ovšem důležité dbát na správný postup při odběru vzorku. Metoda AVA je vhodná pouze pro provzdušněné betony v rozsahu 3 až 10 % celkového obsahu vzduchu v betonu.

Oproti tomu tlaková metoda vyžaduje finančně méně náročnější vybavení a časově zabere pouze cca 5 min. Nevýhodou je, že vyžaduje zhutnění vzorku.

Literatura:

[1] LORI, E., TUNSTALL, M., TYLER, L., SCHERER, W. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. *Cement and Concrete Research* [online]. Vol. 150. Netherland, Amsterdam: Elsevier, 2021. [cit. 2021-11-28]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: DOI:10.1016/j.cemconres.2021.106557

[2] ČSN EN 12 350-7. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody.* Praha: ÚNMZ, 2020.

[3] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím.* Praha: ÚNMZ, 2020.

[4] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.* Praha: ÚNMZ, 2020.

[5] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou.* Praha: ÚNMZ, 2020.

[6] ZHANG, H. ed. Air Entraining Admixture. *Building Materials in Civil Engineering: Concrete* [online]. Sawston, England: Woodhead Publishing, 2011, s. 81–149. [cit. 2021-11-28]. ISBN 978-1-84569-955- 0. Dostupné z: DOI:10.1533/9781845699567.81

[7] GAGNÉ R. Air entraining agents. *Science and Technology of Concrete Admixtures: Air entraining agents* [online]. Sawston, England: Woodhead Publishing, 2016, s. 379-391. [cit. 2021-11-28]. ISBN 978-0-08-100693-1. Dostupné z: DOI:10.1016/B978-0-08-100693-1.00017-5

[8] ČSN 73 1326 Z1. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek.* Praha: ÚNMZ, 1985.

[9] *Germann Instruments: Air void analysis of fresh concrete: AVA-3000* [online]. Test Smart – Build Right. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://germann.org/wp-content/uploads/2021/10/AVA-3000-TDS02.pdf

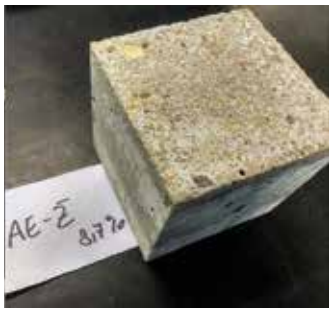
[10] URBÁNEK, L. *Studium vlivu vneseného provzdušnění na parametry provzdušněných betonů.* Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, ÚTHD.

[11] ČSN EN 480-11. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu.* Praha: ÚNMZ, 2006.

2 a) Vzorek LP 9,2, b) vzorek AE 8,7 po 100 cyklech působení odolnosti proti CHRL, c) zařízení AVA test
2 a) Sample LP 9,2, b) sample AE 8,7 after effect 100 cycles of test resistance of concrete to defrosting chemicals, c) AVA test machine

2a

2b



2c

V tab. 5 vidíme porovnání zkoušek ovlivňující trvanlivostní parametry. Z výsledků je patrné, že podle zkušební metody AVA testu všechny receptury dosahují cca o 30 až 40 % nižšího obsahu celkového naměřeného vzduchu v betonu než podle tlakové metody (ČSN EN 12350-7), popř. dle EN 480-11, přitom posloupnost hodnot je zachována [2]. Hodnoty mikroskopického vzduchu podle metody AVA testu jsou kromě receptury AE 8,7 (A_{300} = 1,9 %) rovněž velmi nízké, resp. okolo 0,2 až 0,8 %. Na zatvrdlých vzorcích betonu bylo současně využito metody stanovení celkového obsahu vzduchu v zatvrdlém betonu podle EN 480-11. Výsledky celkového obsahu vzduchu jsou pomocí této metody celkově o cca 20 % vyšší než pomocí tlakové metody. V tab. 5 lze pozorovat výrazné rozdíly mezi hodnotami A_{300} dle metod AVA testu a EN 480-11. Důvodem rozdílných výsledků mezi použitými metodami může být samotný princip fungování AVA přístroje [10]. Jednou z příčin, proč u metody AVA testu bylo dosaženo nízkých hodnot mikroskopického vzduchu A_{300}, je, že při měření dochází k uvolnění nejmenších pórů (pouze desítky mikronů) z odebraného vzorku v delším časovém horizontu. Když následně nedojde kvůli pomalému „stoupání“ nejmenších mikropórů ke změně hmotnosti na Petriho misce, tak přístroj zkoušku ukončí, což může vysvětlovat nízké hodnoty naměřených výsledků, kdy nemuselo dojít k zaznamenání nejmenších mikropórů [11].

I přesto lze vidět, že hodnoty mikroskopického vzduchu A_{300} jednotlivých receptur si prakticky odpovídají s množstvím plošného hmotnostního odpadu po stanovení odolnosti proti působení CHRL. Např. u receptury AE 8,7 (A_{300}-EN-480-11 = 5,2 %) je hodnota odpadu pouze 411 g/ m^2, ale naopak u ostatních receptur s obsahem A_{300} EN-480-11 okolo 1,5 % se hodnota odpadu pohybuje okolo 1 000 g/m^2. Zajímavá je i hodnota odpadu 1 842 g/m^2 u receptury LP 9,2, kde byl obsah A_{300} EN-480-11 = 2,7 %. To potvrzuje lepší účinnost provzdušňovacích přísad na bázi přírodních pryskyřic při dosažení optimálního obsahu mikroskopického vzduchu v betonu.

Závěr

Předložený článek pojednává o jednotlivých druzích a účincích provzdušňovacích přísad. Byla poukázána souvislost mezi některými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi a obsahem vzduchu v betonu. Z výsledků stanovení odolnosti proti CHRL je vidět, že vyšší obsah vzduchu má určitý vliv na hodnoty plošných hmotnostních odpadů při cyklickém zmrazování za přítomnosti CHRL, avšak často za cenu snížení mechanických parametrů. V případě využití provzdušňovacích přísad na bázi přírodních pryskyřic bylo dosaženo nižšího množství odpadu (AE 8,7 = 411 g/m^2) než u provzdušňovacích přísad na bázi syntetických tenzidů. Vysvětlením může být, že provzdušňovací přísady na bázi přírodních pryskyřic vytvářejí vhodnější pórovitou síť umožňující lépe odolat krystalizačním tlakům solného roztoku (což lze vidět i u parametrů provzdušněných betonů v tab. 5).

Bylo zjištěno, že vyšší obsah vzduchu nemá zásadní vliv na hloubku průsaku tlakovou vodou. Dále byly srovnány výhody a nevýhody metod pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu. V případě metody AVA testu bylo upozorněno na některé nedostatky, jež mohou ovlivnit výsledky parametrů celkového i mikroskopického obsahu vzduchu v betonu.

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu VUT specifického výzkumu FAST J 21 7427: Studium vlivu míry provzdušnění betonu na jeho objemové změny a odolnost vůči mechanické abrazi.

Ing. Ondřej Pikna
ondrapikna@gmail.com

Ing. Martin Ťažký
tazky.m@fce.vutbr.cz,

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
hela.r@fce.vutbr.cz

Ing. Marek Hoško
HoskoMarek@seznam.cz

všichni: Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Článek byl posouzen odborným lektorem.
The article was reviewed.

Moderní betony 2022

Na začátku října proběhl na Vysočině v hotelu Skalský dvůr první ročník mezinárodní konference Moderní betony a kompozity organizované Fakultou stavební ČVUT v Praze. Tato nová konference si klade za cíl propojovat akademickou a aplikační sféru působící v oblasti betonu. Program konference byl zaměřen na problematiku betonů v dopravním stavitelství, trvanlivost, recyklaci a řízený návrh kompozitních materiálů. Na konferenci bylo předneseno deset vyzvaných přednášek od předních odborníků z českých vysokých škol i praxe, na které navazovala bohatá diskuze a výměna názorů ve velmi přátelské atmosféře.

Velké poděkování patří partnerům konference, kteří se podíleli na organizaci a propagaci této konference. Patří mezi ně Česká silniční společnost, z.s., Česká společnost pro mechaniku, z.s., Skanska Transbeton, s.r.o., Skanska a.s., Česká betonářská společnost ČSSI, z.s, a časopis Beton. Největší poděkování však patří přednášejícím, jejichž práce byla základem atraktivního programu, a účastníkům konference, neboť plodná diskuze a networking patří k hlavním přínosům podobných akcí.

Organizační výbor konference již připravuje navazující ročník, který proběhne v podobném formátu v termínu 11. až 13. 10. 2023. Své náměty na přednášky či zajímavá témata můžete zasílat na e-mail pavel.reiterman@fsv.cvut.cz. Těšíme se na další setkání!

Pavel Reiterman
Stavební fakulta ČVUT v Praze

1

2

1 Z přednášky prof. Víta Šmilauera
2 Blahopřání doc. Karlu Kolářovi, který v červenci oslavil osmdesáté narozeniny