

# VYSTUŽENÝ PENOBETÓN – MATERIÁL PRE NOVÉ APLIKÁCIE V STAVITELSTVE ■ REINFORCED FOAM CONCRETE – MATERIAL FOR NEW APPLICATIONS IN THE BUILDING INDUSTRY

Martin Decký, Marián Drusa, Jozef Vlček, Walter Scherfel, Bronislav Sedlář, Michal Moravec

Penobetón v súčasnosti získava na atraktivnosti pri rôznych druhoch stavieb vďaka aplikácii nových aditív a vylepšenej technológii. Hlavnou výhodou penového betónu v súčasnosti je vysoká variabilita požadovaných vlastností, ktoré však musia byť vyvážené pre

špecifickú aplikáciu. Penobetón môže mať objemovú hmotnosť od 300 do 1600 kg.m<sup>-3</sup>, pevnosť v tlaku od 0,4 do 12 MPa, modul pružnosti od 1 200 do 2 500 MPa a koeficient tepelnej vodivosti od 0,06 do 0,75 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> v suchom stave. Vďaka týmto vlastnostiam je možné penobetón použiť na stavbu základových dosiek pasívnych a nízkoenergetických domov, ako podkladové vrstvy priemyselných podláh, spevnených plôch alebo ako výplňový materiál namiesto zásypu výkopov apod. Jeho vlastnosti je možné zlepšiť pomocou vystužovania. Ako vystuženie sa používajú napr. geosyntetické materiály – geosiete, geomreže, geotextílie alebo tyčové profily a siete z rôzneho materiálu. S ohľadom na nepriaznivé vlastnosti ocelevej výstuže (náchylnosť na koróziu, vodivosť, magnetizmus) bola pre vystuženie penobetónu zvolená kompozitná čadičová sieť, ktorá umožňuje zlepšiť mechanické vlastnosti vrstvy z penobetónu ako je pevnosť v tlaku a ťahu a tuhosť celej vrstvy. V tomto článku sú prezentované aplikačné možnosti penobetónu a prednosti alternatívnych možností jeho vystužovania. ■ Foam concrete (FC) has been currently gaining attractiveness in various types of construction thanks to application of new additives and improved technology. Nowadays, the main advantage of foam concrete is in high variability of required properties, however, these must be balanced for a specific application and its interaction. The produced foam concrete can have bulk density from 300 to 1600 kg.m<sup>-3</sup>, compressive strength from 0.4 to 12 MPa, modulus of elasticity from 1 200 to 2 500 MPa and thermal conductivity coefficient from 0,06 to 0,75 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Thanks to these properties, FC can be used for the construction of foundation slabs of passive and low energy houses, such as subgrade of industrial floors, reinforced surfaces or as filling material instead of excavation backfill. Its properties can be improved by reinforcing. Geosynthetic materials such as geonets, geogrids, geotextiles or bars and nets of different materials are used as a reinforcement. Considering the unfavourable properties of steel reinforcement (e.g. corrosion, conductivity, magnetism) composite basalt reinforcing mesh was selected. This type of mesh allows improving the mechanical properties of a foam concrete layer such as compressive and tensile strength and overall stiffness. In this article, application possibilities of foam concrete and advantages of its alternative reinforcement are presented.

Úspešná spolupráca medzi akademickým a súkromným sektorom prináša nové možnosti využitia progresívnych a multifunkčných materiálov, medzi ktoré bezpochyby patrí aj penový betón. Cieľom výskumných aktivít tímu Žilinskej univerzity v spolupráci so spoločnosťou iwtech a Orlimex CZ bolo overiť používanie penobetónu rôznych objemových hmotností ako podkladovej vrstvy pre priemyselné podlahy, základové konštrukcie alebo spevnené plochy. Použitie tohto materiálu prináša investorom výhody z hľadiska úspor nákladov, zlepšenia homogénnosti podkladových vrstiev a zvýšenie trvanlivosti spolu s priaznivými tepelnoizolačnými vlastnosťami.

Skúmanie vlastností penobetónu závisí na jeho konkrétnom využití. Pri konštrukciách vyššie uvedených je dôležitý odhad niektorých mechanických charakteristík, akými sú tlaková pevnosť, pevnosť v ťahu pri ohybe a modul pružnosti. Vzhľadom na zaťažovací mechanizmus takejto vrstvy zhotovenej v horizontálnej polohe a zaťažovanej vertikálne môže byť pevnosť pri ohybe limitným faktorom. V tejto chvíli vstupuje do návrhu vrstvy z penobetónu vystuženie, ktoré umožňuje zlepšenie parametrov vrstvy penobetónu alebo zníženie jej hrúbky.

## PENOBETÓN

Penobetón je druh ľahkého betónu, ktorý môžeme definovať ako cementový materiál obsahujúci minimálne 20 % technickej peny. Objemová hmotnosť penobetónu v suchom stave môže byť od 300 do 1 600 kg.m<sup>-3</sup>. Napriek tomu, že v betónovej zmesi tvoria funkciu plniva vzduchové bublinky, technológia jeho výroby umožňuje vyrábať penobetón na betonárni a na stavbu ho doviezť obvyklým autodomiešavačom. Na jeho čerpanie je možné použiť obvyklé čerpadlá.

Pre výrobu penobetónu sa používajú tieto komponenty: cement, voda, technická pena, prísady a prímеси. Môže obsahovať aj piesok, ale pre vytvorenie veľmi ľahkej zmesi sa odporúča piesok vynechať. Pena je vytvorená pomocou penotvorného činidla.



1a



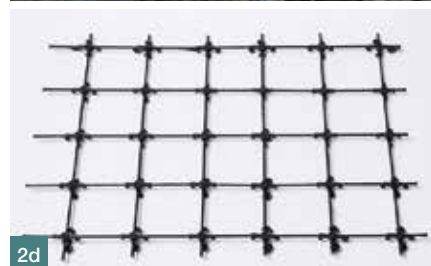
1b



1c

1 a) Technická pena ako základná zložka penobetónu, b) dávkovanie technickej peny do bubna autodmiešavača, c) vylievanie penobetónu na plochu (zdroj: [9]) 2 Výstužné prvky použité v penobetóne pri testovaní: a) Geofiltex, b) Armatex, c) Combigrid, d) Orlitech sieť (zdroj: [2])

1 a) Technical foam as a basic component of the foam concrete, b) dosing of the technical foam into the drum of the mixer, c) pouring of the foam concrete (source: [9]) 2 Reinforcing elements used in the foam concrete during the testing: a) Geofiltex, b) Armatex, c) Combigrid, d) Orlitech mesh (source: [2])



la zmiešaného s vodou a vzduchom z generátora. Penotvorné činidlo musí byť schopné vytvárať vzduchové bubliny, ktoré majú vysokú úroveň stability a odolnosti voči fyzikálnym a chemickým procesom miešania, čerpania, kladenia a tvrdnutia zmesi. Vzniknutá suspenzia sa v bubne autodmiešavača počas jazdy na stavbu zmieša s technickou penou. (obr. 1)

Medzi hlavné výhody penobetónov pri realizácii stavieb patria:

- jednoduchosť a rýchlosť pokládky – v súvislosti s rýchlosťou zabudovania do konštrukcie dopravnej stavby je možné produkovať a realizovať pokládku o rozsahu 400 až 600 m<sup>3</sup>

za deň, čím sa výrazne zníži doba výstavby a dôjde k úspore nákladov,

- jednoduché vyrovnanie nerovností podkladu bez hutnenia – použitím čiastočne samonivelačného penobetónu sa dosiahne to, že je podklad hornej dosky priemyselnej podlahy tvorený homogénnou vrstvou eliminujúcou lokálne imperfekcie podložia pri súčasnom znížení nárokov na hodnotu  $E_{def2}$  na povrchu podložia,
- podkladová vrstva penobetónu znižuje celkovú hrúbku konštrukcie, čo prináša zníženie objemu výkopových prác,
- významné zvýšenie tepelného odpo-

ru priemyselnej podlahy,

- dobré antivibračné vlastnosti – penobetón má poréznu bunkovú štruktúru, ktorá umožňuje absorbovať kinetickú energiu,
- odolnosť voči biologickým vplyvom – na rozdiel od niektorých synteticky ľahčených materiálov penobetón nie je po vytvrdnutí náchylný na poruchy v dôsledku prítomnosti uhlíkovodíkov, rozpúšťadiel, baktérií, resp. húb,
- šetrnosť k životnému prostrediu – žiadne mimoriadne zábery plochy na stavbe,
- veľmi ľahká, na energie nenáročná recyklácia vrstvy penobetónu.

10. ročník mezinárodní vědecké konference

## FIBRE CONCRETE 2019

pořádá katedra betonových a zděných konstrukcí FSv ČVUT v Praze

**Téma: vláknobeton (FRC), textilní beton (TRC)**

**a ultravysokohodnotné cementové kompozity (UHPCC)**

- Materiálové charakteristiky
- Dlouhodobé chování a trvanlivost
- Aspekty udržitelného stavebnictví
- Odpadní materiály pro výrobu betonu
- Aplikace a realizace
- Pokročilé návrhové metody

**Termín konání: 17. – 20. září 2019**

**Místo konání: Francouzský institut, Štěpánská 35, Praha 1**

Registrace a elektronický formulář jsou k dispozici na stránkách konference.

Odborné příspěvky budou zařazeny v databázi SCOPUS.

**Podrobnější informace naleznete na [concrete.fsv.cvut.cz/fc2019](http://concrete.fsv.cvut.cz/fc2019)**



**Tab. 1** Porovnanie kompozitnej čadičovej a konvenčnej ocelevej výstuže ■

**Tab. 1** Comparison of composite basalt and conventional steel reinforcement

Výstuž	Orlitech sieť		Oceľová sieťovina	
	50 × 50 mm	100 × 100 mm	KA 16 100 × 100 mm	
priemer drôtu [mm]	2,2	3	4	6
pevnosť v ťahu [MPa]	1 318 až 1 390	1 248 až 1 458	≤ 570	≤ 590
elektrická vodivosť	nevodivá		vodivá	
tepelná vodivosť $w_T$	0,46		56	
odolnosť voči korózii	veľmi vysoká		nízka	
odolnosť v alkalickom prostredí	veľmi vysoká		nízka	
magnetická charakteristika	nemagnetická		magnetická	

**Tab. 2** Materiálové charakteristiky penobetónu Poroflow IF500 ■

**Tab. 2** Features of foam concrete Poroflow IF500

Objemová hmotnosť (vysušený stav)	500 kg.m <sup>-3</sup>
Vlhkosť ustálená v prostredí štrkodrviny 0–63 mm	13 %
Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda$ pri ustálenej vlhkosti 13 %	0,18 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Nasiakavosť	maximálne 50 %
Charakteristický modul pružnosti $E$	1 200 MPa
Poissonovo číslo $\nu$ pri 40% napätosti	0,23
Pevnosť v tlaku $f_{ck}$ po 28 dňoch	1,7 MPa

3 a) Použitie kompozitnej čadičovej siete na výstavbu cesty k Olympijskej dedine v Rusku, 2012, b) zakladanie bytového domu v ČR, 2017, c) vystuženie poteru súčasne s upevnením vykurovacích rúrok (zdroj: [8]) 4 a) Rozmery vzorky, b) zariadenie Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity na určovanie pevnosti v ťahu pri ohybe penobetónu podľa STN EN 12390-5 5 Porovnanie pevnosti v ťahu pri ohybe pre rôzne vystuženie Poroflow IF500 6 Zatažovacie diagramy pre penobetón Poroflow IF500 s rôznym vystužením

■ 3 a) Using of composite basalt mesh for construction in the Olympic village in Russia, 2012, b) foundation of the residential house in the Czech Republic, 2017, c) reinforcement of screed floor cover together with fixing the heating pipes (source: [8]) 4 a) Specimen dimensions, b) equipment of Faculty of Civil Engineering of the University of Žilina for the flexural strength testing of the foam concrete in accordance with the STN EN 12390-5 standard 5 Comparison of the flexural strength for various reinforcing of the Poroflow IF500 6 Load-bearing diagrams for foam concrete Poroflow IF500 with different reinforcement

### VYSTUŽOVANIE PENOBETÓNU

Vystužovanie klasického betónu oceľovými prútmi je bežne používaný postup na zlepšenie prenosu ťahových síl pri zaťažení betónu. Pri penobetóne je uvažované s podobným princípom ako pri železobetóne, len oceľové prúty sú nahradené vhodne zvolenými geosyntetickými alebo inými prvkami v ťahovej oblasti (na spodnej strane) penobetónu s cieľom dosiahnutia väčšej pevnosti v ťahu pri ohybe, vyššieho ekvivalentného modulu pružnosti a zlepšenia húževnatosti.

Vzhľadom na spôsob namáhania vrstiev z penobetónu boli pre výskum ako výstuž použité bežne dostupné geosyntetické materiály, doplnené čadičovou výstužnou sieťovinou Orlitech [8] položené priamo na vrstvu geosyntetiky, t. j. bez akýchkoľvek dištančných podložiek.

Pre terénne a laboratórne testovanie bol vybraný penobetón s objemovou hmotnosťou v suchom stave 500 kg.m<sup>-3</sup> s označením Poroflow IF500. Penobetón bol pre testovanie postupne vystužený geotextíliou Geofiltex, geokompozitom Armatex, kompozitným materiálom Combigrid a výstužnú čadičovú sieť (obr. 2).

Geofiltex je netkaná textília s plošnou hmotnosťou 200 g.m<sup>-2</sup> spevnená vpichovaním. Využíva sa v pozemnom staviteľstve pri výstavbe striech a v inžinierskych stavbách pri zakladaní stavieb a pri realizácii drenáží. Medzi jej hlavné funkcie patria separačná, ochranná, filtračná a spevňovacia funkcia [2]. V prípade použitia v kombinácii s penobetónom plní funkciu vystuženia tým, že po naliatí penobetónu na geotextíliu dôjde k zatečeniu penobetónu do jej štruktúry a tým k ich úplnému spojeniu. Mieru zvýšenia pevnosti v ťahu za ohybu dokumentuje obr. 6.

Armatex je geokompozit vyrobený z pletenej geomreže, z vysoko-pevnostného PET vlákna a netkanej geotextílie. Tento výrobok sa zväčša používa na vystužovanie asfaltových krytov vozoviek a zemných konštrukcií dopravných stavieb.

Combigrid je kompozitný materiál zložený z geomreže a netkanej geotextílie. Combigrid spája rôzne vlastnosti požadované pre rôzne konštrukcie dopravných stavieb v jednom výrobku. Z tohto dôvodu je hlavná oblasť použitia pri málo únosných podlažiach, kde treba dosiahnuť zlepšenie únosnosti, filtračné a separačné vlastnosti geokompozitu. V praxi sa doposiaľ uplatnil najmä na účelových pozemných komunikáciách a vo výkopoch pre potrubné vedenia.

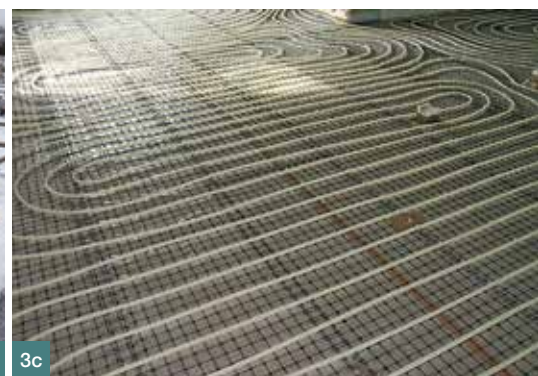
Orlitech je výstužná čadičová sieť s priemerom drôtu 3 mm a veľkosťou oka 100 × 100 mm alebo s priemerom drôtu 2,2 mm a veľkosťou oka 50 ×



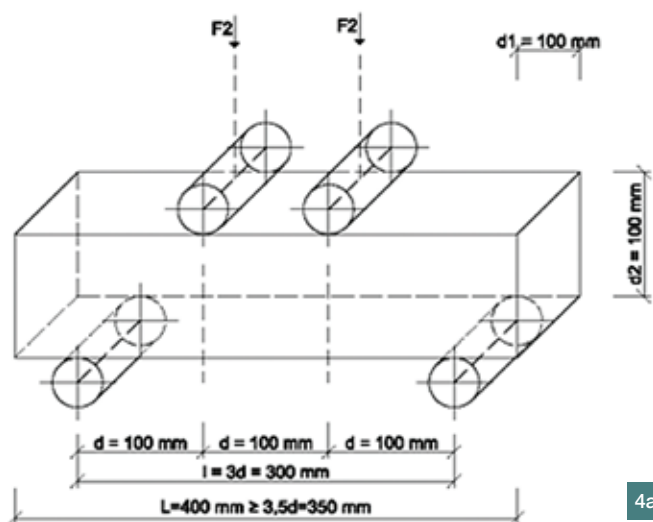
3a



3b



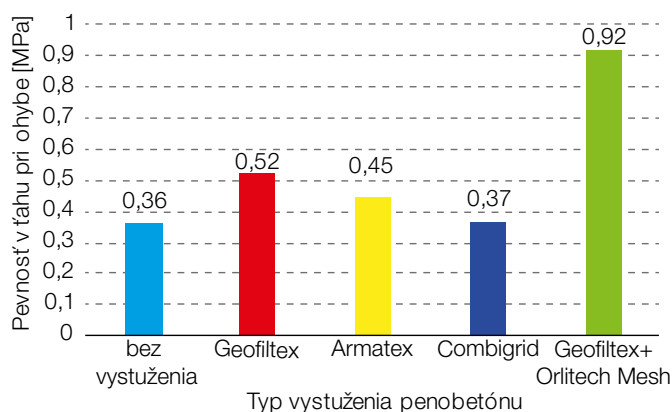
3c



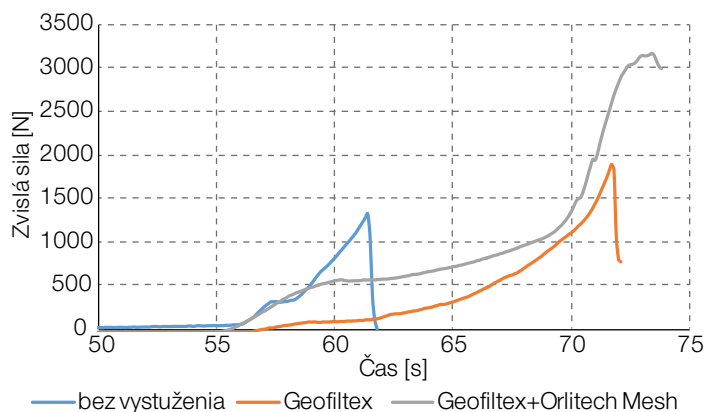
4a



4b



5



6

50 mm. Tento typ materiálu možno použiť ako náhradu za štandardné ocelové kari siete s priemerom drôtu 4 až 6 mm (tab. 1). Pri použití čadičovej siete ide o jednu z najlepších možností náhrady ocelovej rebierkovej betonárskej výstuže. Kompozitná sieť je zložená z čadičových prútov, ktoré sú umiestnené v dvoch vzájomne kolmých smeroch spojených v kontaktnom uzle špeciálnou hmotou. Čadičové kompozitné siete sa využívajú na zosilnenie betónových konštrukcií, výstuženie betónových stenových a sendvičových panelov (dosiek), zosilnenie a odľahčenie monolitov v konštrukčných prvkoch, výstuženie priemyselných podláh a spevnenie cestných a železničných svahov (obr. 3).

#### LABORATÓRNE TESTOVANIE VYSTUŽENÉHO PENOBETÓNU

Penobetón s objemovou hmotnosťou  $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  je vyvíjaný spoločnosťou ivtech v spolupráci s Cemex CZ [10] a jeho zabudovanie do inžinierskych

konštrukcií je skúmané od roku 2012 v spolupráci so Stavebnou fakultou Žilinskej univerzity. V súčasnosti je označovaný komerčným názvom Poroflow IF500. V rámci predchádzajúcich výskumných aktivít boli objektivizované fyzikálne a mechanické vlastnosti tohto penobetónu, ktoré sú uvedené v tab. 2.

Na použitie penobetónu do podkladovej vrstvy je nevyhnutné poznať jeho hodnoty pevnosti v ťahu pri ohybe v zmysle STN EN 12390-5 [4]. Podstatou skúšky je vystavenie skúšobných telies ohybovému momentu vyvolaného od zaťaženia prenášaného prostredníctvom horných a spodných podperných kovových valčekov (obr. 4).

Pri skúške sa zaznamená maximálne dosiahnuté zaťaženie a následne sa vypočíta pevnosť v ťahu pri ohybe  $f_{cf}$  [MPa] podľa vzťahu:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2}, \quad (1)$$

kde  $F$  je maximálne zaťaženie [MN],

$l$  rozstup medzi podpernými valčekmi [m],  $d_1$  a  $d_2$  rozmery priečného rezu skúšobného telesa [m].

Pri meraní sa nastaví konštantná rýchlosť zaťažovania v rozsahu od 0,04 do 0,06 [MPa/s]. Po počiatočnom zaťažovaní, ktoré nesmie presiahnuť približne 20 % zaťažovania pri porušení, sa skúšobné teleso zaťažuje rovnomerne bez nárazov a zaťaženie sa zvyšuje plynulo konštantnou rýchlosťou  $\pm 10\%$  až do dosiahnutia maximálneho zaťaženia.

Na základe prezentovaných, objektívne zistených výsledkov výskumu bola potvrdená premisa, že geotextília aktívne spolupôsobí s penobetónom a zvyšuje pevnosť v ťahu pri ohybe skúšobných telies, čím priaznivo ovplyvňuje výslednú ťahovú pevnosť tohto materiálu. Takéto spolupôsobenie bolo dosiahnuté s geotextíliou, a to aj v prípade kombinácie s čadičovou sieťovinou, kde došlo k výraznému nárastu pevnosti (obr. 5). Ostatné geosyntetiky sa nejavia ako vhodné pre vystužovanie penobetónu.



7a



7b



7c

7 a), b), c) Postup realizácie penobetónu na skúšobnom poli ■ 7 a), b), c) Realization of the foam concrete in the experimental field

## Literatúra:

- [1] DECKÝ, M. a kol. *Cementobetónové vozovky*. Žilina: Edis – vydavateľstvo UNIZA, 2018.
- [2] DECKÝ, M., DRUSA, M., ZGÚTOVÁ, K., BLAŠKO, M., HÁJEK, M., SCHERFEL, W. Foam concrete as new material in road constructions. *Procedia Engineering*. 2016, č. 161. ISSN 1877-7058
- [3] DRUSA, M. a kol. *Navrhovanie a kontrola zemných konštrukcií dopravných stavieb*. Vedecká monografia. Žilina, EDIS – vydavateľstvo UNIZA, 2013. 522 s. ISBN 978-80-554-0823-1
- [4] HÁJEK, M. *Možnosti využitia penobetónu v spevnených plochách inžinierskych stavieb*. Žilina, 2018. Dizertačná práca. Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta. 119 s.
- [5] HÁJEK, M., DECKÝ, M., DRUSA, M., ORININOVÁ, L. Elasticity Modulus and Flexural Strength Assessment of Foam Concrete Layer of Poroflow. In: *IOP conference series: Earth and environmental science*. October 2016, Vol. 44, No. 2. ISSN 1755-1307
- [6] IŽVOLT, L., DOBEŠ, P., MEČÁR, M. Contribution to the methodology of the determination of the thermal conductivity coefficients  $\lambda$  of materials applied in the railway subbase structure. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2013, Vol. 15, pp. 9–17.
- [7] KADELA, M., KOZŁOWSKI, M. Foamed Concrete Layer as Sub-Structure of Industrial Concrete Floor. *Procedia Engineering*. Part of special issue: WMCAUS 2016. 2016, Vol. 161, pp. 468–476.
- [8] ORLITECH [online]. © Orlitech.cz 2018. Dostupné z: <http://www.orlitech.cz/>
- [9] iwtech [online]. © iwtech.sk. Dostupné z: <https://www.iwtech.sk/>
- [10] Poroflow. CEMEX CZ [online]. © 2019 CEMEX S.A.B. de C.V. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/penobeton-poroflow>

V prípade laboratórných meraní kompozitného materiálu penobetónu a geosyntetiky bolo pre výpočet pevnosti v ťahu pri ohybe  $f_{cf}$  potrebné určiť zaťažovaciu silu, pri ktorej došlo k porušeniu vzorky (t. j. vzniku trhliny). Pri vzorkách bez geosyntetiky to bola maximálna sila, na ostatných vzorkách bola do výpočtu dosadzovaná sila zodpovedajúca vytvoreniu trhliny na skúšobnom telese.

Na obr. 6 je znázornený priebeh zaťažovania jednotlivých skúšobných

trámčov, kde môžeme identifikovať vznik trhliny a následný pokles sily.

Na obr. 7 je ukážka realizácie vrstvy Poroflow IF500 s určením pre priemyselnú podlahu v skúšobnom poli Žilinskej univerzity, ktorá vychádza z laboratórných meraní s použitím geotextílie Geofiltex a čadičovej siete Orlitech.

## ZÁVER

Penobetón si aktuálne hľadá viacero možností uplatnenia v stavebnej praxi. Jeho aktuálne výrobné možnosti a vysoká variabilita parametrov ponúkajú nové možnosti, ktoré ho predurčujú pre špeciálne prípady aplikácií, ako sú napr. podkladové vrstvy priemyselných podláh, odstavových plôch alebo obslužných komunikácií. Jeho potenciál narastá, ak sa výhodne skombinuje s určitými typmi geosyntetiky (netkané geotextílie) a vystuží sa sieťovinou alebo rohožami z materiálov pevnostne podobných oceli, ale nepodliehajúcich korózii. K takýmto materiálom patria geomreže alebo sieťoviny z čadičových vlákien. Dôležité je čo najlepšie spolupôsobenie penobetónu a výstuže, tzn. penobetónu musí byť umožnené zatiecť do štruktúry výstuže.

prof. Dr. Ing. Martin Decký  
Stavebná fakulta Žilinskej univerzity  
Katedra cestného staviteľstva  
martin.decky@fstav.uniza.sk



prof. Ing. Marián Drusa, PhD.  
Stavebná fakulta Žilinskej univerzity  
Katedra geotechniky  
marian.drusa@fstav.uniza.sk



Ing. Jozef Vlček, PhD.  
Stavebná fakulta Žilinskej univerzity  
Katedra geotechniky  
j.vlcek@fstav.uniza.sk



Ing. Walter Scherfel  
iwtech, s. r. o.  
walter@iwtech.sk



Bc. Bronislav Sedlár  
CEMEX Česká republika, s. r. o.  
bronislav.sedlar@cemex.com



Michal Moravec  
Orlimex CZ, s. r. o.  
michal.moravec@orlimex.cz



Článok bol posouzen odborným lektorom.  
The article was reviewed.