

Asfaltová směs se struskovým kamenivem

Ing. Pavla Vacková, Ing. Jan Valentin, Ph.D., Ing. Zdeněk Prošek

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 2077/7, 160 00 Praha 6,
e-mail: pavla.vackova.1@fsv.cvut.cz

Souhrn

V rámci výzkumného projektu byla použita stabilní kladenská vysokopecní struska jako alternativní náhrada k běžnému drcenému kamenivu. Struska je vedlejším produktem především výroby železa a oceli a v dopravním stavitelství je používána již řadu let, ale pouze jako kamenivo do nestmelených vrstev případně jako příměs pro výrobu hydraulicky stmelených vrstev. Jakákoliv jiná aplikace není v současné době používána a to i díky některých problémům některých velkých silničních staveb nebo z nedostatečné znalosti charakteristik a historie vzniku a původu konkrétních strusek. Tento materiál je proto mnohdy spíše ukládán na skládky, ačkoli by se mohlo jednat o kvalitní kamenivo, které lze použít pro další aplikace.

V tomto příspěvku jsou prezentována data probíhajícího výzkumu, kdy bylo předrcené a přetříděné struskové kamenivo aplikováno do asfaltových směsí typu ACO 11+ používaných do obrusných vrstev vozovek. Ve směsích byla použita substituce různých frakcí přírodního kameniva kamenivem struskovým až k 100% náhradě. Ve směsích byla použita struska frakce 0/4, 4/8 a 8/11 mm. Na variantách asfaltových směsích byla provedena celá řada zkoušek pro ověření vlivu struskového kameniva na vlastnosti asfaltové směsi. Tyto vlastnosti byly porovnány jak s normovými hranicemi, tak s výsledky referenční směsi obsahující pouze přírodní drcené kamenivo. Provedené zkoušky byla např. modul tuhosti, odolnost vůči trvalým deformacím (vyjetí kolejí), pevnost v tahu za ohybu, odolnosti vůči účinkům vody a mrazu a další.

Klíčová slova: vysokopecní struska, asfaltové směsi, zkoušení asfaltových směsí, recyklace

Úvod

Struska je v silničním stavitelství používána již několik desetiletí, ale nejčastěji jako kamenivo do nestmelených vrstev případně jako příměs pro výrobu hydraulicky stmelených vrstev. Tato část výzkumné zprávy se zabývá využitím struskového kameniva při výrobě asfaltových směsí.

Strusky, ať už vysokopecní nebo ocelářské, vykazují značnou míru heterogenity. Je třeba zdůraznit, že jinak je tomu i u jiných konstrukčních materiálů používaných běžně v silničním stavebnictví – kamenivo z odlišného lomu má jiné vlastnosti, stejně jako asfaltové pojivo z různých rafinérií se bude chovat odlišně. Vznik a vlastnosti strusky ovlivňuje při výrobě železa/oceli řada faktorů a výstup struska je v řadě případů velmi heterogenní. Při výrobě železa vznikají z jednoho daného zdroje zpravidla podobné materiály (strusky). Avšak při výrobě oceli se mohou jednotlivé šarže od sebe natolik lišit, že i výsledné strusky budou rozmanitého charakteru. Navíc ocelářské strusky se vždy vyznačují vyšším obsahem zbytkového železa, což činí tento materiál v dopravním stavitelství hůře využitelný.

Vlastnosti strusky z hlediska složení a chování nelze generalizovat, ale při správném třídění a rozvážném skládkování (kontinuální „pasportizace“ vyvážených odpadů) lze získat dostatečné množství materiálu z jednoho zdroje, o kterém mluvit jako o kvazi-homogenním.

Standardně se v stavitelství pracuje pouze se struskami, které lze označit jako „stabilní“, tedy strusky, u kterých proběhly všechny chemické procesy a jejich vlastnosti se tedy s časem již nemění. Nedostatečně stabilní strusky mohou např. vykazovat velké objemové změny, které by ve stavebních konstrukcích způsobovaly deformace. To je jeden z dalších důvodů, proč byla v projektu upřednostněna při řešení vysokopecní vzduchem chlazená struska před ocelářskou.

Jak bylo uvedeno výše, není možné generalizovat vlastnosti asfaltových směsí s použitím strusek, ale jisté závěry se ve výzkumech opakují:

- Jedna z vlastností, která je popsána shodně téměř ve všech studiích, je vhodný tvar zrn struskového kameniva. Struskové kamenivo má zpravidla velmi dobrý tvarový index a drsný pórovitý povrch, který zajišťuje dobré spolupůsobení kameniva a tím zlepšení pevnostních charakteristik směsí, např. [1], [5], [8]
- Na druhou stranu pórovitá struktura struskového kameniva vyžaduje zvýšení obsahu asfaltového pojiva v asfaltových směsích. Při použití 100 % struskového kameniva je doporučeno použít minimálně o 0,5 % asfaltového pojiva více. Při náhradě nižšího procentuálního množství je nutné zvýšit obsah asfaltového pojiva dle optimalizace návrhu. [2]
- Dalším známým problémem strusky je zvýšená nasákavost. Zabývají se jí např. studie [3], [9], [10] Pokud není struska ještě zcela chemicky stabilní, může docházet k její větší nasákavosti a vlivem chemických reakcí k objemovým změnám. V případě asfaltových směsí je tato potenciální vlastnost strusek eliminována tenkým asfaltovým filmem, kterým jsou strusky během výroby asfaltové směsi pokryty a který zabraňuje nasákavosti kameniva. Problém vysoké nasákavosti se týká především ocelářských strusek, které obsahují vysoký podíl volného CaO a volného MgO, které zatím zcela nezreagovaly s křemičitými složkami.
- Některé studie, např. [3], [8] uvádějí zhoršenou zpracovatelnost z důvodu ostrohranných zrn a textury zrn struskového kameniva. Tento fakt může být i způsobem pórovitosti struskového kameniva, které absorbuje část asfaltového pojiva, takže jeho snížený obsah může způsobovat sníženou zpracovatelnost. Tyto závěry však nebyly podpořeny dalšími studiemi, ani poznatky zde dále prezentovaného výzkumu.



Obrázek 1: Struskové kamenivo s viditelnou pórovitou strukturou

Záměrem řešeného výzkumu bylo prokázat vhodnost či nevhodnost použití strusky z daného zdroje (Poldi Kladno) jako částečné náhrady přírodního drceného kameniva. Dle závěrů vyčtených ze zahraniční literatury bylo přistoupeno k použití stabilizované vzduchem chlazené vysokopecní strusky. Kladenské ložisko je co do velikosti svým výskytem v ČR ojedinělé, a proto má zajímavý potenciál pro využití ve stavebnictví.

Záměrem projektu nebylo zlepšení vlastností asfaltových směsí, ale prokázání, že je možné vyrábět asfaltové směsi, které vyhoví normovým požadavkům i s uvedeným typem recyklovaného kameniva. Je předpoklad, že použití struskového kameniva může mít pro obalovny i ekonomické přínosy. Cena struskového kameniva je nižší než cena přírodního drceného kameniva. Další aspekt, který je třeba neopomenout, je ekologický přínos. Metalurgický průmysl má v České republice dlouhou historii a metalurgické provozy např. na Kladně či na Ostravsku nebo Třinecku mají velké zásoby stabilního nezužitkovaného materiálu.

Návrh asfaltové směsi

V rámci toto příspěvku jsou prezentovány vlastnosti asfaltové směsi typu ACO 11+ v různé substitucí struskového kameniva. Asfaltová směs ACO 11+ je používána v obrusných (nejsvrchnějších) vrstvách vozovek. Obrusné vrstvy jsou v kontaktu s klimatickým prostředím a s pneumatikami vozidel. Obrusné vrstvy musí být odolné vůči klimatickým změnám, mrazovým i únavovým trhlinám a proti vzniku trvalých deformací (vyjetí kolejí).

Pro výrobu asfaltových směsí byly použity tři druhy kameniva. Kamenivo z lomu Zbraslav (spilit), z lomu Lašovice (rohovec, rula) a předrcená, přetříděná vysokopecní struska z kladenské „haldy“ od bývalé huti Koněv. Vysokopecní struska byla použita ve všech poskytnutých frakcích - 0/4 mm, 4/8 mm a 8/11 mm.

Na všech frakcích kameniva ze všech tří lomů byly provedeny základní zkoušky, jako je stanovení objemové hmotnosti, tvarový index, nasákavost, zrnitost apod. Kameniva z lomů Zbraslav a Lašovice dle

prohlášení o vlastnostech dodavatele vyhovují parametrům pro použití do všech vrstev pozemních komunikací. Struskové kamenivo tyto hranice splňuje u sledovaných a zkoušených vlastností. Z kontrolních odběrů, které firma odtěžující strusku pravidelně provádí, je zřejmé, že základní vlastnosti strusky se v průběhu odtěžování výrazně nemění.

Popis provedených zkoušek

Pro zhodnocení vlivu variant asfaltových směsí byly stanoveny následující charakteristiky:

- **volumetrické vlastnosti** (maximální objemová hmotnost stanovená dle ČSN EN 12697-5, objemová hmotnost zhuštěného zkušební tělesa stanovená dle ČSN EN 12697-6, mezerovitost asfaltové směsi stanovená podle ČSN EN 12697-8);
- **modul tuhosti** v souladu s ČSN EN 12697-26 na válcových zkušebních tělesech nedestruktivní metodou IT-CY, metoda dle přílohy C při teplotách 0, 15 a 27 °C;
- **odolnost vůči trvalým deformacím** (vyjetí kolem) dle normy ČSN EN 12697-22+A1 na malém zkušebním zařízení ve vzduchové lázni;
- **pevnost v tahu za ohybu** na trámčích v souladu s platnou přílohou k TP 151, která se dosud v ČR využívá a požaduje výhradně pro směsi typu VMT;
- **odolnost proti šíření trhliny** dle normy ČSN EN 12697-44 na půlválcových zkušebních tělesech;
- zkouška modulu tuhosti, odolnosti vůči šíření mrazové trhliny a pevnosti v tahu za ohybu byly navíc rozšířena o výsledky stanovené na tělesech podrobených laboratorní simulaci dlouhodobého stárnutí dle prEN 12697-52.

Výsledky experimentálního výzkumu

Volumetrické vlastnosti

Volumetrické vlastnosti asfaltových betonů byly porovnány s normou ČSN EN 13108-1:2008. Normové hranice pro průkazní zkoušky (zkoušky typu) pro všechny typy zkoušek jsou zvýrazněny ve výsledkových grafech. Pokud není normová hranice u některé zkoušky uvedena, znamená to, že daný parametr není vyžadovaný.

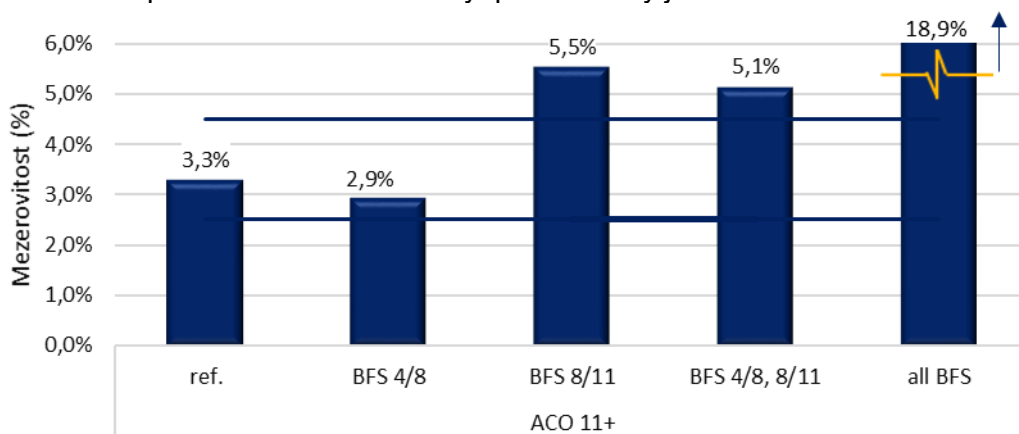
U každé zkoušky jsou prezentována data jak pro referenční směs („ref.“), tak pro směs s náhradou některé frakce struskovým kamenivem („BFS“ – *blast furnace slag* = *vysokopeční vzduchem chlazená struska*). Struskové kamenivo BFS je vždy označeno použitou frakcí.

V případě volumetrických vlastností nedošlo při substituci jemných frakcí (0/4, 4/8 mm) k výrazným změnám – většinou pouze došlo k mírnému snížení mezerovitosti. Struska frakce 4/8 mm měla mírně jemnější křivku, takže je to očekávatelný trend. Při náhradě hrubších frakcí kameniva došlo již k mírně výraznějším změnám mezerovitosti. Hrubší frakce strusky měly odlišnou čáru zrnitosti od drceného kameniva, což mohlo negativně ovlivnit mezerovitost směsí.

Asfaltové směsi ACO 11+ se s aplikací struskového kameniva frakce 8/11 mm měly vyšší mezerovitosti, než dovoluje norma ČSN EN 13108-1:2008 pro průkazní zkoušky (zkoušky typu). Asfaltové směsi by však vyhověly hranicím pro kontrolní zkoušky, které jsou v širší (2-6%). Poslední varianta asfaltové směsi typu ACO 11+ byla vyrobena pouze za použití struskového kameniva (frakce 0/4, 4/8 a 8/11 mm). Zkušební tělesa měla mezerovitost téměř 19%-obj. Přestože tělesa vypadala vizuálně uzavřená, stanovená mezerovitost byla nad očekávání vysoká. To mohlo být zapříčiněno řadou faktorů, např.:

- Nebyla navržena optimální čára zrnitosti. Toto bylo částečně potvrzeno rozbořem asfaltové směsi, kdy navržená asfaltová směs přesahuje hranice stanovené normou pro síta nad 2 mm. Avšak z rozboru vyplývá, že asfaltová směs je navržena jemnější (má méně hrubých zrn), než by bylo žádoucí, což vylučuje výše uvedenou teorii.

- Další možností je, že struskové kamenivo pohltilo vyšší množství asfaltového pojiva, než bylo očekáváno. Dle rešerše zahraniční literatury byl obsah asfaltového pojiva ve všech směsích navýšen o 0,5 %. Je možné, že toto navýšení pro použití 100 % tohoto struskového kameniva nebylo dostatečné. Tělesa byla vizuální „méně černá“ než ostatní vzorky (viz Obrázek 3:). Asfaltová směs byla zabarvená spíše do hněda a docházelo k výrazně zhoršené zpracovatelnosti směsi.
- Poslední možnou příčinou je přílišná porozita použitého kameniva. Je možné tento typ strusky nebude možné substituovat v plné míře a bude moct být použita vždy jen částečná náhrada.



Obrázek 2: Mezerovitosti asfaltových směsí typu ACO 11+



Obrázek 3: Vizuální porovnání asfaltové směsi se 100 % struskového kameniva (vlevo) a ref. směsi (vpravo)

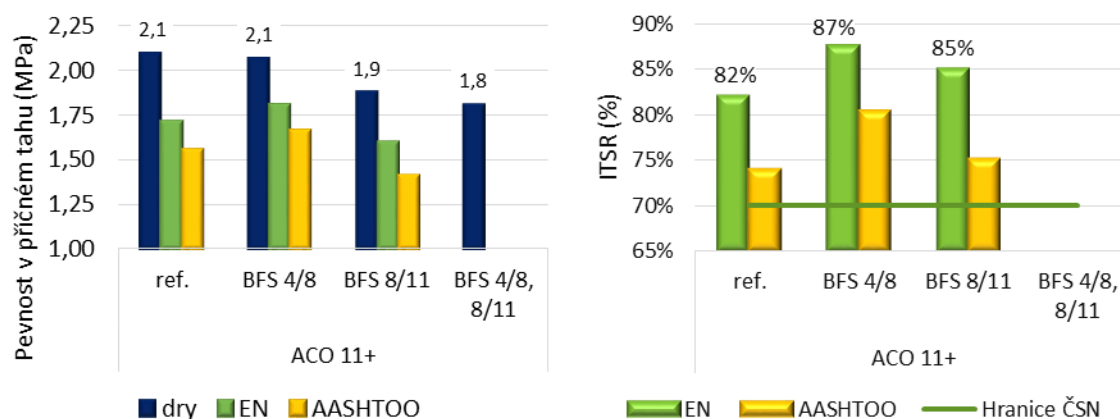
Odolnost asfaltové směsi vůči účinkům vody a mrazu

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti účinkům vody byla provedena v souladu s ČSN EN 12697-12, stanovení odolnosti proti kombinovanému účinku vody a mrazu potom dle modifikovaného postupu americké normy AASHTO T283-3. Pro zkoušku byla od každé zkušební směsi vyrobena sada 9 Marshallových těles hutněných 2x25 údery dle ČSN EN 12697-33. Tato zkušební tělesa byla rozdělena do tří skupin, kdy každá skupina těles byla podrobena jinému způsobu temperování. Suchá tělesa („dry“) byla uložena na vzduchu při laboratorní teplotě a běžné relativní vlhkosti vzduchu. Zkušební tělesa („ČSN“) byla podrobena postupu saturace dle ČSN EN 12697-12, kdy byla nasycena a uložena ve vodní lázni při teplotě 40 °C po dobu 72 hodin. Poslední sada zkušebních těles („AASHTO“) byla nasycena a uložena v igelitovém sáčku po dobu minimálně 18 hodin v mrazicím boxu při teplotě -18 °C a poté skladována ve vodní lázni při teplotě 60 °C po dobu 24 hodin.

Takto skladovaná a různými podmínkami okolí zatížená zkušební tělesa byla následně temperována po dobu minimálně čtyř hodin při teplotě 15 °C (v případě metody „ČSN“ a „AASHTO“ ve vodě, v případě

suchých těles na vzduchu) a zkoušena v příčném tahu dle ČSN EN 12697-23. Rozhodujícím parametrem zkoušky odolnosti vůči účinkům vody (resp. účinkům mrazu dle amerického postupu) není dílčí velikosti síly, ale její pokles způsobený vlivem působení vody (resp. mrazu). Poměr pevností v příčném tahu je označován jako ITSR („*indirect tensile strength ratio*“) a má stanovenou minimální normovou hodnotu pro metodu saturování dle evropského postupu (ČSN EN 12697-12), tedy pro tělesa uložena ve vodní lázni při teplotě 40 °C po dobu 72 hodin.

Z důvodu zvýšené nasákavosti struskového kameniva v porovnání s přírodním drceným kamenivem byla obava ze zhoršení toho testovaného parametru, avšak všechny testované asfaltové směsi vyhověly minimálním normovým hranicím a dokonce u všech testovaných variant byl dosažen lepší výsledek u asfaltových směsí se struskovým kamenivem. Asfaltové směsi ACO 11+ by splnily i podmínky vyšší kvalitativní třídy „S“ (ITSR_{min}=80 %). Z prezentovaných výsledků plyne, že by struskové kamenivo nemělo mít negativní vliv na snížení trvanlivosti asfaltových směsí.



Obrázek 4: Pevnost v příčném tahu (a) a poměr pevností v příčném tahu – ITSR (b) asfaltových směsí ACO 11+

Při pohledu na pevnostní charakteristiky – tedy dílčí pevnosti v příčném tahu suchých („dry“) těles - jsou výsledky spíše opačné. Při použití struskového kameniva klesají pevnosti téměř u všech variant. Snížení pevnostních charakteristik je částečně potvrzeno i dalšími níže uvedenými zkouškami. Je pravděpodobné, že struskové kamenivo nemá takové pevnostní charakteristiky jako přírodní drcené kamenivo z lomu Zbraslav a tak může docházet k mírnému snížení charakteristik. Je však nutné zdůraznit, že účelem výzkumného experimentu nebylo vytvořit asfaltové směsi s lepšími vlastnostmi, ale ověřit využití struskového kameniva při dodržení všech normových parametrů.

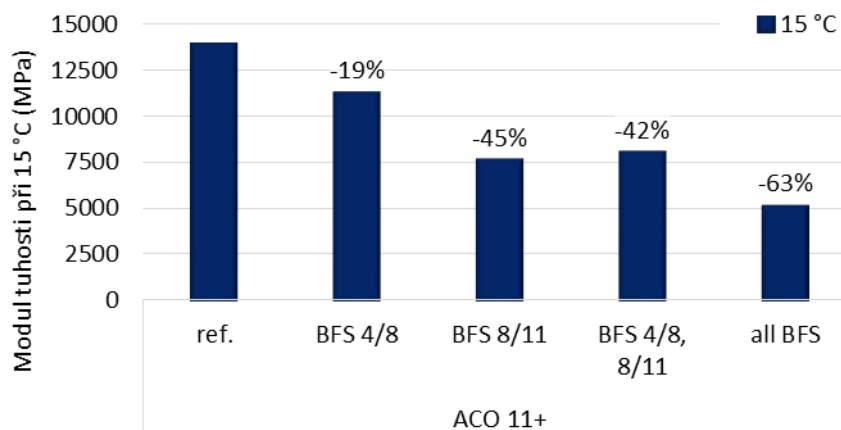
Modul tuhosti

Modul tuhosti byl stanoven metodou IT-CY (zkouška v příčném tahu na Marshallových tělesech) dle normy ČSN EN 12697-26 při 3 teplotách běžně používaných pro asfaltové směsi v našich klimatických podmínkách zpravidla: 0, 15 a 27 °C. Dle metodiky popsané v TP 170 pro navrhování vozovek je rozhodující teplotou 15 °C.

Tab. 1 Moduly tuhosti asfaltových směsí (MPa)

		Nezestárlá			Teplotní citlivost
		0 °C	15 °C	27 °C	
ACO 11+	ref.	22014	13873	4516	4,9
	BFS 4/8	21055	11227	4376	4,8
	BFS 8/11	17148	7562	2312	7,4
	BFS 4/8, 8/11	15962	7984	2751	5,8
	all BFS	8523	5108	2280	3,7

Asfaltové betony nemají normou ČSN EN 13108-1:2008 stanovenou minimální hodnotu modulu tuhosti. Jediné směsi, které mají tuto hranici v České republice nastavenou, jsou asfaltové směsi označované jako VMT (s vysokým modulem tuhosti). Technické podmínky TP 151 stanovují minimální hranici rovnou 9 000 MPa. Asfaltové směsi typu VMT jsou používány do podkladních, případně do ložních vrstev velmi zatížených komunikací (komunikací s vysokou dopravní intenzitou těžkých nákladních vozidel), kde slouží k roznášení napětí. V případě variant asfaltových směsí typu ACO 11+ použitých v tomto projektu byly jejich moduly tuhosti nad očekávání vysoké. Velmi vysoké moduly tuhosti nejsou v obrusných (nejsvrchnějších) vrstvách žádoucí a mohou znamenat sníženou odolnost při nízkých teplotách – u příliš tuhých asfaltových směsí může docházet k rychlejší propagaci mrazových trhlin. U variant se struskovým kamenivem došlo ve všech případech ke snížení hodnoty modulu tuhosti. Snížení modulu tuhosti v takovémto případě může tedy mít i pozitivní vliv na asfaltové směsi v oboru nízkých teplot.



Obrázek 5: Moduly tuhosti asfaltových směsí

Odolnost vůči šíření mrazové trhliny

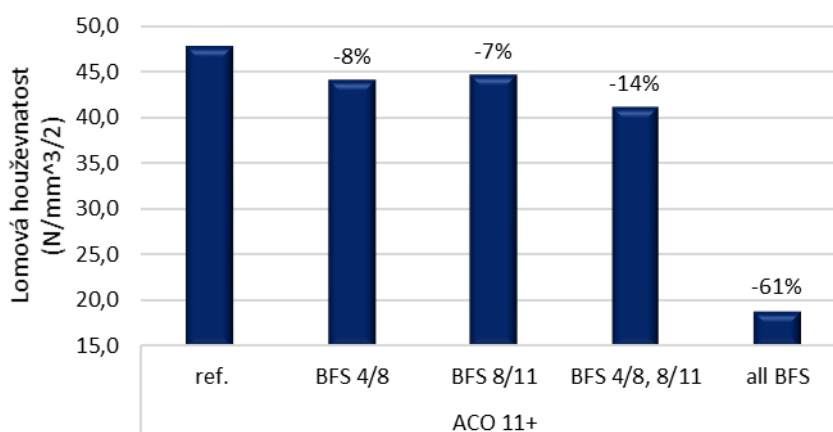
Zkouška odolnosti vůči šíření mrazové trhliny byla provedena dle modifikovaného postupu z normy ČSN EN 12697-44:2011. Oproti normovému postupu byla jako zkušební tělesa použita Marshallova tělesa o průměru 100 mm, která byla seříznuta na požadovanou výšku 50 mm. Uvedená norma vyžaduje použití zkušebních těles hutněných na gyrátoru s průměrem 150 mm, avšak pro potřeby výzkumu na ČVUT se již déle než 3 roky používají tělesa hutněná na Marshallově pěchu dle normy ČSN EN 12697-30. Podstatou této zkoušky je zatěžování půlválcového zkušebního tělesa s definovanou uměle naříznutou tenkou trhlinou uprostřed podstavné plochy zkušebního tělesa tříbodovým ohybem tak, že střed spodního líce zkušebního tělesa je vystaven tahovému napětí. Zkouška byla provedena při teplotě 0 °C a při zatěžovací rychlosti 2,5 mm/min. Zatěžovací rychlost byla snížena oproti normově doporučené rychlosti (5 mm/min).

Nad rámec normového postupu byl stanoven parametr lomové energie. Lomová energie je u zkoušky na půl válcových těles stanovena ve dvou různých zatěžovacích stádiích. Prvotně je stanovena lomová (deformační) energie potřebná do dosažení maximální hodnoty zatížení (stejně je tomu i u pevnosti v tahu za ohybu, které se stanoví na trámečkových zkušebních tělesech). Na půlválcových tělesech je oproti zkoušce v tahu za ohybu snímán i odtěžovací stav, kdy dochází k postupné propagaci trhlin. Tím pádem je možné stanovit tzv. celkovou energii zkoušky, tedy energii zatěžovacího a odtěžovacího cyklu. Čím je lomová energie vyšší, tím je nutné použít vyšší množství energie potřebné ke zlomení zkušebního tělesa a tím se dá s určitou opatrností predikovat vyšší trvanlivost asfaltové směsi.

S výjimkou asfaltové směsi ACL 16S se struskovým kamenivem frakce 8/11 mm a ACP 22S se struskovým kamenivem frakce 8/16 mm dosáhly všechny směsi se struskou horších výsledků lomové houževnatosti než jejich referenční směsi. Všechny ostatní směsi vykazovaly pokles o cca 10 %. S přihlédnutím k výrobě zkušebních těles – seřezávání na laboratorní pile – se pokles 10 % jeví jako hodnota v mezích nejistoty měření. Což znamená, že lomové houževnatosti směsí se struskovým kamenivem jsou víceméně shodné s výsledky referenčních směsí – tedy struskové kamenivo nemá z pohledu této zkoušky zásadně negativní vliv na vlastnosti asfaltové směsi v oboru nízkých teplot.

Tab. 2 Odolnost vůči šíření mrazové trhliny asfaltových směsí

		Lomová houževnatost (N/mm ^{3/2})	Lomová energie do max. síly (J)	Celková lomová energie (J)
ACO 11+	ref.	47,6	-	-
	BFS 4/8	43,9	-	-
	BFS 8/11	44,4	2,68	3,24
	BFS 4/8, 8/11	40,9	2,16	2,39
	all BFS	18,7	0,80	1,10



Obrázek 6: Lomová houževnatost nezestárých těles asfaltových směsí

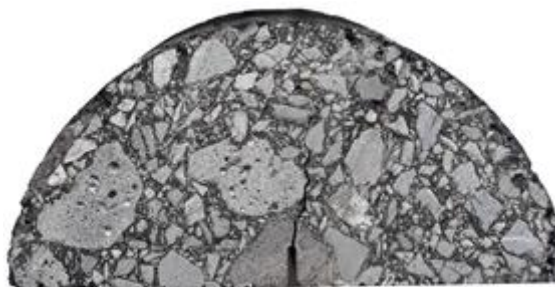
Výsledky zkoušky odolnost vůči mrazové trhlině nelze zcela generalizovat. Obecně lze shrnout, že lomová houževnatost roste s klesajícím modulem tuhosti – čím jsou asfaltové směsi tužší, tím hůře se chovají za nízkých teplot. Tyto obecné předpoklady však neplatí pro asfaltové směsi se struskovým kamenivem. V tomto případě, stejně jako u zkoušky modulu tuhosti, nejvyšších hodnot dosáhly směsi s referenčním kamenivem. U náhrady jedné frakce, došlo ke snížení o necelých 10 %, vzhledem k povaze přípravy vzorků – řezání na laboratorní pile – lze výsledky s přihlédnutím k nejistotě měření považovat za velmi podobné. U 100 % struskového kameniva došlo k výrazně nejhorším výsledkům.

Během řezání zkušebních těles se 100 % struskového kameniva docházelo k značnému odlamování hran tělesa – struktura asfaltové směsi nebyla dostatečně pevná, aby tělesa vydržela sílu řezací pily. Na řezu byl opět patrný barevný rozdíl této varianty – asfaltová směs byla na řezu zbarvená spíše do hněda, než do černa. Na řezu také byl zřejmější výskyt nečistot struskového kameniva (šamot, stavební cihly a další). Výsledky této zkoušky opět prokázaly, že 100% náhrada struskového kameniva v této podobě je pro dané použití nevhodná.

Na asfaltových směsích a zkušebních tělesech nebylo na první pohled patrné, že obsahují struskové kamenivo. Při přípravě těles pro stanovení odolnosti vůči mrazové trhlině byla však Marshallova tělesa rozřezána a na řezu byla zcela jasně patrná přítomnost struskového kameniva. Vysokopeční struska je oproti přírodnímu drcenému kamenivu, použitému v projektu, pórovitá a je jasně identifikovatelná v jednotlivých asfaltových směsích. Pórovitost kameniva neměla prokazatelně negativní vliv na vlastnosti směsi, ve smyslu negativního působení na zvýšenou nasákavost či ovlivnění trvanlivosti asfaltové směsi vodou a mrazem.



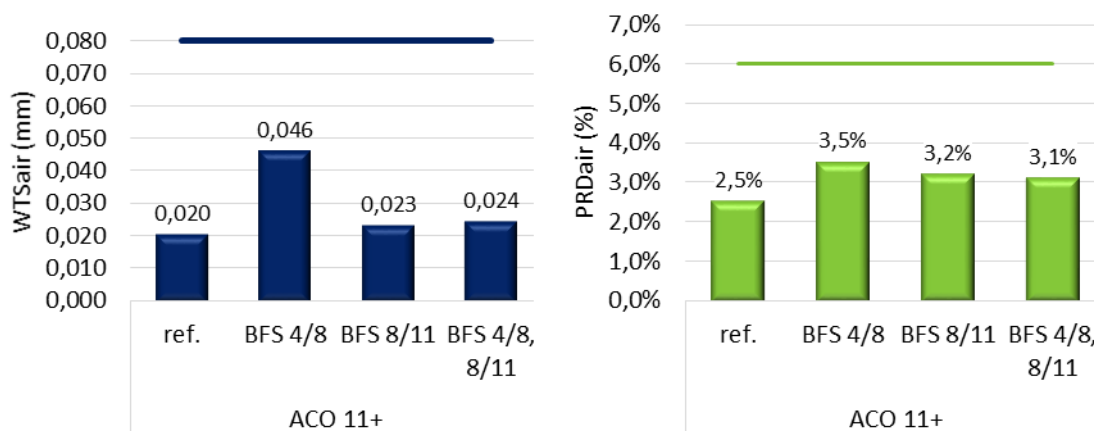
Obrázek 7: Půlválcová tělesa ze 100 % struskového kameniva po zkoušce odolnosti vůči šíření trhliny



Obrázek 8: Půlválcová tělesa po zkoušce odolnosti vůči šíření trhliny

Odolnost vůči trvalým deformacím

Zkouška odolnosti vůči trvalým deformacím byla provedena v souladu s normou ČSN EN 12697-22+A1 v malém zkušebním zařízení se vzduchovou lázní při zkušební teplotě 50 °C. Desky byly temperovány na požadovanou zkušební teplotu a zatěžovány 10 000 pojezdy kolem s normovým zatížením. Národní příloha k normě ČSN EN 13108-1:2008 udává minimální hranice pro dva zkušební parametry PRD_{AIR} a WTS_{AIR} . PRD_{AIR} je průměrná hloubka vyjeté koleje stanovená při zkoušce ve vzduchové lázni a WTS_{AIR} je potom přírůstek hloubky vyjeté koleje vypočítaný jako průměrná hodnota, o kterou narůstá hloubka koleje opakovanými přejezdy zatěžovacího kola, a to opět ve vzduchové lázni.



Obrázek 9: Odolnost vůči trvalým deformacím – WTS_{AIR} (a) a PRD_{AIR} (b)

Asfaltové směsi se struskovým kamenivem vykazují mírně vyšší hodnoty u zkoušky trvalých deformací, než referenční směsi s drceným kamenivem. Tyto hodnoty jsou však stále výrazně pod normovými hranicemi. Vyšší zhoršení vykazují směsi s jemnější frakcí strusky (4/8 mm), při použití hrubšího kameniva nejsou rozdíly v porovnání s referenčními směsmi tak výrazné. Toto je v kontrastu ke zjištěným výsledkům pevnostních charakteristik asfaltových směsí – v tomto případě měly hrubší frakce struskového kameniva spíše negativní vliv.

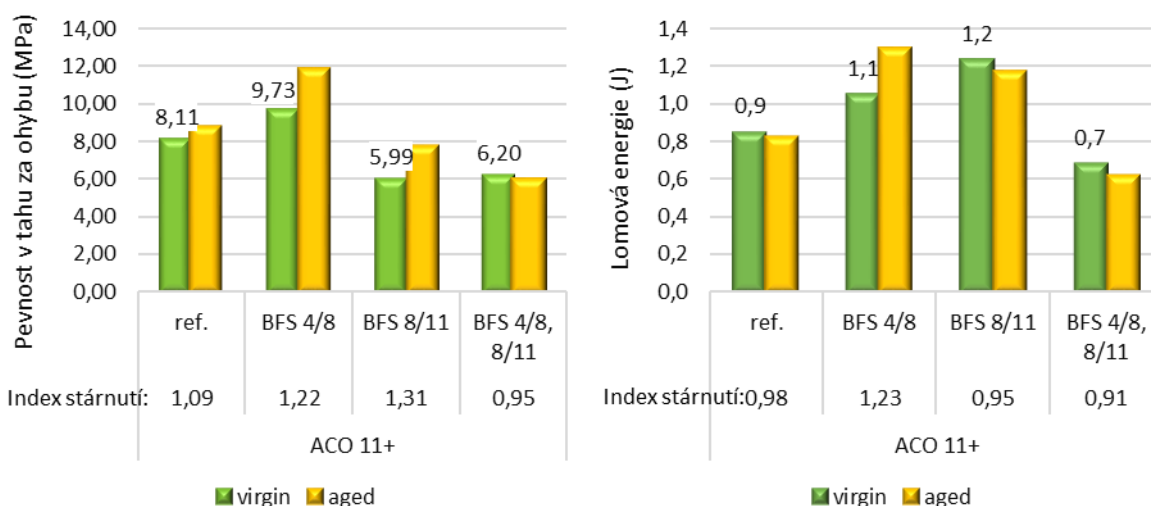
Odolnost vůči trvalým deformacím se zatím jeví jako jediná kritická při návrhu směsi se struskovým kamenivem. Při použití většího procentuálního zastoupení strusky v asfaltových směsích je nutné se zaměřit hlavně na tuto charakteristiku, aby nedocházelo k pozdějším vznikům trvalých deformací na vozovce.

Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena postupem uvedeným v příloze technických podmínek TP 151. Zkouška je prováděna tříbodovým ohybem na trámečkových zkušebních tělesech. Jako zkušební teplota byla v případě posuzovaných asfaltových směsí zvolena hodnota 0 °C a zatěžovací rychlost 1,25 mm/min, která je požadovaná technickými podmínkami. Navíc byla stejně jako v případě zkoušky odolnosti vůči šíření mrazové trhliny doplněna řada zkušebních parametrů o lomovou energii stanovenou do dosažení maximální síly (pevnosti v tahu za ohybu). U trámečkových těles odtěžovací část již není započítávána.

Trámková zkušební tělesa byla rozdělena do dvou skupin, kdy jedna skupina těles byla opět vystavena laboratornímu stárnutí dle prEN 12697-52 (uložení po dobu 5 dní v klimatické komoře při 85 °C).

U variant asfaltové směsi ACO 11+ se substitucí hrubé frakce kameniva (8/11 mm) došlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu o cca 25 %. To potvrzuje data zjištěná z ostatních pevnostních zkoušek. Struskové kamenivo nedosahuje takových pevnostních charakteristik jako přírodní drcené kamenivo (spilit). Naopak, pokud se substituovala pouze jemnější frakce (4/8 mm), byly výsledky lepší - tedy asfaltové směsi dosahovaly vyšších pevností v tahu za ohybu.

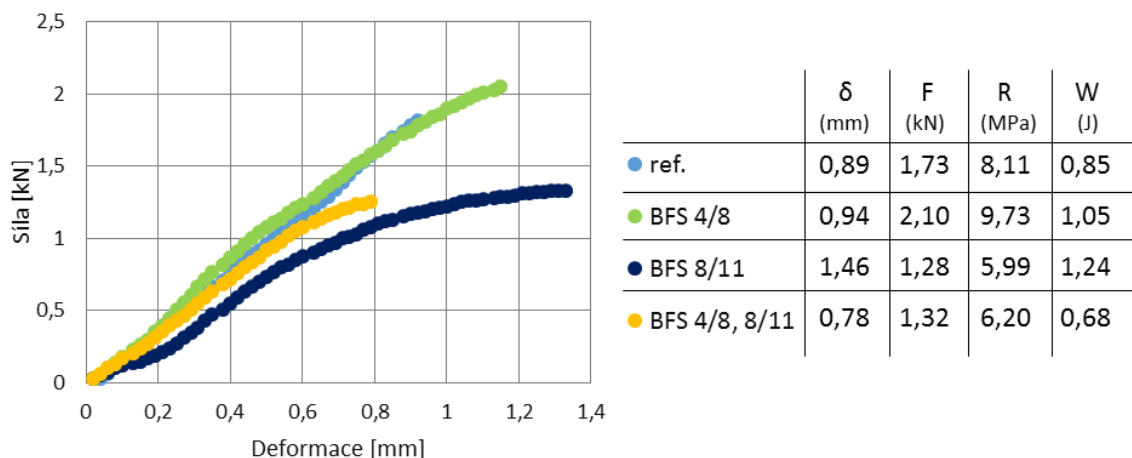


Obrázek 10: Pevnost v tahu za ohybu (a) a lomová energie (b)

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu definuje jako výsledek pouze maximální hodnotu síly a přetvoření v okamžiku porušení. Tyto parametry navíc rozšířeny o tzv. lomovou energii. Jedná se o energii (mechanickou práci) potřebnou k porušení zkušebního tělesa. Lomová energie byla spočítána jako plocha pod křivkou zatěžovacího diagramu do okamžiku porušení vzorku.

Na této skupině testovaných těles lze přesně demonstrovat, proč je přidání tohoto parametru tak důležité a proč je nutné vycházet pouze z hodnoty maximální síly (a z ní spočítané pevnosti). Varianta asfaltové směsi s náhradou frakce 8/11 mm dosáhla nejnižší pevnosti v tahu za ohybu, tzn. došlo k porušení za použití nejnižší aplikované síly. Na druhou stranu stejná varianta dosáhla nejvyšší lomové

energie, tedy na zlomení trámku bylo potřeba aplikovat největší množství energie (práce). V případě této směsi bude trvat delší dobu (více opakování zatížení), než dojde k porušení vzorku, i když maximální přenesená síla bude stejná.



Obrázek 11: Zatěžovací diagram nezestárých těles asfaltových směs

Shrnutí

Jak bylo uvedeno výše, účelem projektu nebylo vytvořit asfaltové směsi se zlepšenými vlastnostmi, ale prokázat vhodnost použití struskového kameniva jako náhrady přírodního drceného kameniva. Všechny testované směsi bez výjimky vyhověly normovým hranicím. Výsledky některých asfaltových směsí se struskovým kamenivem byly dokonce lepší než v případě použití pouze přírodního kameniva. Bylo sice prokázáno mírné zhoršení pevnostních charakteristik, avšak tyto parametry bohužel nejsou normami vyžadovány pro průkazní zkoušky (zkoušky typu) a tak pro ně neexistují minimální hodnoty. Pro průkazní zkoušky (zkoušky typu) jsou vyžadovány zrnitost, obsah asfaltového pojiva, mezerovitost, odolnost vůči účinkům vody (ITSR) a odolnost vůči trvalým deformacím.

Z testovaných variant lze shrnout:

- Při návrhu je třeba dostatečně dbát na správný návrh zrnitosti asfaltových směsí – použití struskového kameniva může navyšovat mezerovitost.
- Varianty asfaltových směsí se struskou vykazovaly spíše lepší výsledky odolnosti vůči účinkům vody a mrazu (ITSR). Na druhou stranu, ale vykazovaly nižší dílčí pevnosti v příčném tahu.
- Moduly tuhosti stejně jako pevnosti v příčném tahu variant se struskovým kamenivem byly spíše nižší. Je nutné zdůraznit, že referenční asfaltové směsi vykazovaly velmi vysoké moduly tuhosti. Snížení jejich hodnot by mohlo mít pozitivní vliv na vlastnosti v oboru nízkých teplot.
- U odolnosti vůči šíření mrazové trhliny bylo zřejmé opět mírné zhoršení vlastností, které však nebylo bezesbýtku potvrzeno zkouškou pevnosti v tahu za ohybu.
- Odolnost vůči trvalým deformacím se zdá z pohledu použití struskového kameniva jako „kritická“. Varianty se struskovým kamenivem vykázaly horší výsledky, ale výsledky byly hluboko pod normovými hranicemi.
- Náhrada 100 % přírodního kameniva kamenivem struskovým nevykázala zatím dostatečně dobré výsledky a nelze ji nijak doporučit a podpořit. V roce 2018 byla vyrobena pouze 1 variant asfaltové směsi a ta vykazovala natolik špatné výsledky, že nebyla provedena ani celá série testů. Z pohledu této varianty se 100% náhrada jeví jako spíše nevhodná.

Použití struskového kameniva v asfaltových směsích může mít cílený pozitivní vliv na životní prostředí. Těžba přírodního drceného kameniva je environmentální zátěž a vhodných zdrojů kameniva ubývá. Je nutné stále častěji hledat nová vhodná ložiska pro těžbu. Rozšiřování současných lomů není navíc možné do nekonečna. Struska je materiál, kterého se v některých průmyslových oblastech nachází velké množství a skládkuje se bez dalšího použití, je však vždy předem nutné stanovit, zda je daný zdroj strusky vhodný k dalšímu zpracování.

Poděkování

Tento článek vznikl v rámci projektu programu TAČR ZÉTA, projekt č. TJ01000435 s přispěním výzkumného partnera společnosti POZEMNÍ KOMUNIKACE BOHEMIA, a.s.

Použitá literatura

- [1] Ahmedzade, Perviz & Sengoz, Burak 2015. **Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete.** *Journal of Hazardous Materials*. Volume 165, Issues 1–3, 15 June 2009: 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>
- [2] Ameri, Mahmoud & Hesami, Saeid & Goli, Hadi 2013. **Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag.** *Construction and Building Materials*, Volume 49: 611-617. DOI10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034
- [3] Bocci, Edoardo 2018. **Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures.** *Construction and Building Materials*, Volume 161: 156-164, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.120>.
- [4] Chen, Jian-Shiuh & Wei, Shih-Hsiu 2016. **Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag.** *Construction and Building Materials*, Volume 128: 148-153, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.027>
- [5] Masoudia, Sajjad & Abtahia, Sayyed Mahdi & Goli, Ahmad 2017. **Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging.** *Construction and Building Materials*, Volume 135: 260-266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>
- [6] Patel, Jigar P. 2006. **Broader Use of Steel Slag Aggregates in Concrete.** *Bachelor thesis*, Maharaja Sayajirao University of Baroda, India.
- [7] Piatak, Nadine M. 2018. **Environmental Characteristics and Utilization Potential of Metallurgical Slag: Chapter 19.** *Environmental Geochemistry (Second Edition)*: 487-519 ISBN 9780444637635, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63763-5.00020-3>
- [8] Viman, Leif & Ahmed, Abubeker W. & Said, Safwat & Lind, Lotta 2016. **Evaluation of Slag as aggregates in Asphalt Mixtures.** *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 1-3 June 2016, Prague, Czech Republic. [dx.doi.org/10.14311/EE.2016.238](https://doi.org/10.14311/EE.2016.238)
- [9] Wang, George 2010. **Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate.** *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 10: 1961-1966, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.004>
- [10] Haritonovs Viktors, Zaumanis Martins, Smirnovs Juris 2013. **Use of Unconventional Aggregates in Hot Mix Asphalt Concrete.** *Construction Science*. Vol. 14, 2013, pp. 44-49. ISSN 14077329. DOI: 10.2478/cons-2013-0007
- [11] Vacková Pavla, Kotoušová Adriana, Valentin Jan 2018. **Use of recycled aggregate from blast furnace slag during in the design of asphalt mixtures.** *Waste forum*. No. 1:60-72. ISSN: 1804-0195.