



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VYUŽITÍ TECHNOLOGIE PĚNOASFALTU

USAGE OF FOAM BITUMEN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Natália Prídavková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Natália Prídavková
Název	Využití technologie pěnoasfaltu
Vedoucí práce	Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Specifikační a zkušební normy z oblasti asfaltových poživ

Normy řady ČSN EN 13108 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály

ČSN 73 6121 Stavba vozovek - Vrstvy z hutněných asfaltových směsí - Provádění a kontrola shody

Zkušební normy pro asfaltové směsi řady EN 12697

Firemní materiály

Internetové zdroje

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V bakalářské práci bude rešeršní formou zpracována problematika využití technologie pěnoasfaltu při výrobě a pokládce asfaltových směsí.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Cieľom bakalárskej práce bolo spracovať formou rešerše problematiku technológie penoasfaltu pri výrobe a pokládke asfaltových zmesí. Prvá kapitola je venovaná súvislostiam potrebným k pochopeniu problematike znižovania výrobných teplôt a využitia teplých asfaltových zmesí, predovšetkým penoasfaltu. Druhá kapitola je zameraná na objasnenie pojmu teplé asfaltové zmesi a vysvetľuje technológiu výroby penoasfaltu a vlastností asfaltovej peny. Predposledná a najrozsiahlejšia kapitola je prehľadom používaných komerčných produktov, postupov a skúseností s penoasfaltom v zahraničí, kde sú teplé technológie rozšírenejšie. Výsledky týchto štúdií dokazujú, že penoasfalt, ale aj iné druhy teplých asfaltových zmesí, sú ekologickejším ekvivalentom ku klasickým horúcim zmesiam. Posledná kapitola zhrňuje skúsenosti v Českej republike a legislatívu týkajúcu sa technológie penoasfaltu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

penoasfalt, teplé asfaltové zmesi, znižovanie pracovných teplôt, organické prísady, chemické prísady, peniace technológie, asfaltová pena, voda, speňovacie zariadenie, redukcia emisií, znižovanie energetickej náročnosti

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis was to describe the issue of foam bitumen technology in the production and paving of asphalt mixtures. The first chapter is devoted to the contexts needed to understand the issues of reducing production temperatures and the use of warm mix asphalt (WMA), especially foamed bitumen. The second chapter is aimed to understand the concept of warm mix asphalt and explains the production technology of foamed bitumen and the asphalt foam properties. The penultimate and most comprehensive chapter is an overview of commercial products, practices and experience with foamed bitumen abroad, where WMA technologies are more widespread. The results of these studies show that foaming processes, as well as other types of WMA, are more ecological equivalent to commonly used hot mix asphalt. The last chapter summarizes the experience in the Czech Republic and its technical standards of foamed bitumen technology.

KEYWORDS

foamed bitumen, warm mix asphalt, WMA, reducing production temperatures, organic additives, chemical additives, foaming techniques, water, foaming device, reducing emissions, reducing fuel usage

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA VŠKP

Natália Prídavková *Využití technologie pěnoasfaltu*. Brno, 2018. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu spracovala samostatne a že som uviedla všetky použité informačné zdroje.

V Brne dňa 25. 5. 2018

Natália Prídavková
autor práce

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa rada poďakovala vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petrovi Hýzlovi, Ph. D. za vzorné vedenie pri spracovaní tejto práce. Ďalej by som chcela poďakovať svoje rodine a priateľovi za podporu počas štúdia.

OBSAH

ÚVOD	1
1 TECHNOLÓGIA STAVBY VOZOVIEK.....	3
1.1 Konštrukcia vozovky	3
1.2 Asfaltová vrstva	4
1.2.1 Asfalt.....	4
1.2.2 Asfaltové zmesi.....	6
2 TEPLÉ ASFALTOVÉ ZMESI	10
2.1 Druhy teplých asfaltových zmesí.....	11
2.1.1 Organické prísady.....	11
2.1.2 Chemické prísady	12
2.1.3 Peniace technológie	13
2.2 Výroba penoasfaltu priamou metódou	14
2.2.1 Vlastnosti asfaltovej peny.....	16
3 SKÚSENOSTI S PENOASFALDOM V ZAHRANIČÍ	21
3.1 Začiatky penoasfaltu.....	21
3.2 Na prelome storočí	22

3.3	Vzostup WMA	23
3.3.1	Francúzsko	24
3.3.2	Holandsko	25
3.3.3	Dánsko.....	26
3.3.4	Nórsko	27
3.3.5	USA	29
3.3.6	Slovensko	33
4	SKÚSENOSTI S PENOASFALTOM V ČESKEJ REPUBLIKE.....	38
4.1	Legislatíva	41
	ZÁVER.....	44
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....	47

ÚVOD

Za posledných 100 rokov môžeme pozorovať viac ako štvornásobný nárast ľudskej populácie, a s tým súvisiace stúpajúce trendy využívania neobnoviteľných zdrojov planéty na výrobu statkov a služieb, ktoré uspokojujú naše každodenné potreby. Doprava je jedným z týchto odvetví, ktoré síce majú nespochybniteľný prínos pre rozvoj ľudskej spoločnosti ale i negatívny dopad na životné prostredie.

V cestnej doprave rozlišujeme dva typy vozoviek, tuhé a netuhé. Najpoužívanejšie sú netuhé vozovky s asfaltovým krytom. Výrobu asfaltových zmesí považujeme za energeticky náročnú, pretože sa vykonáva štandardne za veľmi vysokých teplôt, pričom prispieva k tvorbe skleníkových plynov. Problémom globálneho otepľovania sa zaoberajú svetové organizácie a vlády, ktoré problém riešia a snažia sa negatívne dopady priemyslu obmedzovať. Príkladom môže byť Parížska dohoda z roku 2015, ktorá predstavuje akčný plán zameraný na obmedzenie globálneho otepľovania výrazne pod 2°C do roku 2020 [1].

Zmena klímy je dôležitou globálnou otázkou, ktorá sa týka každého z nás, súčasný stav je alarmujúci a nároky na technologické inovácie s ohľadom na životné prostredie sú stále vyššie a v stavebnej praxi tomu nie je inak. Jednou z týchto inovácií sú nízkoteplotné (teplé) asfaltové zmesi (z anglického označenia *WMA* - *Warm Mix Asphalt*), pri ktorých sa používajú o pár desiatok stupňov nižšie pracovné teploty, čím vedia veľmi výrazne znížiť tvorbu skleníkových plynov a celkovú energetickú náročnosť. Existuje niekoľko spôsobov výroby teplých asfaltových zmesí, ktorých cieľom je znížiť viskozitu výslednej zmesi. Napríklad pridávaním malého množstva vody do horúceho asfaltu vznikne pena, umožňujúca dokonalé obalenie kameniva asfaltom a následné spracovanie pri nižších teplotách. Táto technológia sa nazýva penoasfalt.

Technológia penosfaltu je využívaná hlavne v zahraničí (USA, Francúzsko), v Českej republike je pojem penoasfalt ustálený najmä v súvislosti s recykláciou za studena. [2] Práve z tohto dôvodu je cieľom tejto bakalárskej práce rešeršnou formou priblíženie poznatkov zo zahraničia, kde využívajú penoasfalt už pri výrobe a pokládke a dokazujú, že teplé asfaltové zmesi sú ekvivalentom horúcich zmesí.

1 TECHNOLÓGIA STAVBY VOZOVIEK

Táto kapitola sa venuje základným pojmom týkajúcich sa stavby vozoviek, rozdelenia asfaltových zmesí a súvislostí potrebných k pochopeniu využitia teplých asfaltových zmesí, predovšetkým penoasfaltu.

1.1 KONŠTRUKCIA VOZOVKY

Z ekonomických aj praktických dôvodov sa vozovka stavia z viacerých vrstiev vzájomne rozdielneho zloženia, v ktorom každá vrstva plní svoju špecifickú úlohu v závislosti na spôsobe jej namáhania. Vozovka je namáhaná dopravou, vodou a mrazom, pôsobením vzdušného kyslíka, premrzaním vozovky do podložia a zmenami teploty. Najnamáhanejšími časťami vozovky sú krycie vrstvy, pretože s pribúdajúcou hĺbkou, od povrchu k podložiu, účinok namáhania klesá. Každá konštrukčná vrstva je vyrobená z jedného stavebného materiálu alebo zo stavebnej zmesi vyrobenej špecifickým technologickým postupom.

V Čechách rozlišujeme tieto typy konštrukčných vrstiev:

- obrusná
- ložná
- podkladová
- ochranná

Konštrukčné vrstvy ďalej členíme na stmelené a nestmelené podľa obsahu spojiva, ktoré môže byť buď hydraulické (typickým predstaviteľom je cement) alebo na báze asfaltu. Príkladom stmelených vrstiev sú napr. cementobetonové kryty (tzv. tuhé vozovky), asfaltové vrstvy (netuhé) alebo vozovky z dlažby. Tieto obrusné (krycie) vrstvy sú priamo vystavené klimatickým vplyvom a dopravnému zaťaženiu

a sú na nich kladené najvyššie nároky z hľadiska kvality materiálov aj technologického prevedenia.

U obrusných vrstiev sa sledujú ešte ďalšie požiadavky na trvanlivosť a to:

- odolnosť proti vyhladzovaniu a obrusovaniu od pôsobenia šmykových napätí kolies vozidla
- odolnosť proti pôsobeniu zrážkovej vody, atmosférického kyslíka, mrazu
- dostatočné protišmykové vlastnosti po celú dobu životnosti
- rovnosť povrchu, ktorý ma vplyv na komfort jazdy
- priečny sklon pre zaistenie odtoku zrážkovej vody
- zabezpečiť nepriepustnosť vody do konštrukcie vozovky a podložia [3]

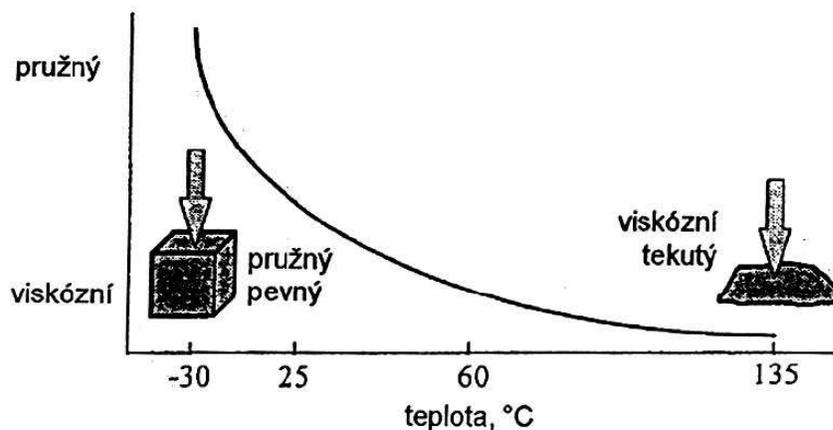
1.2 ASFALTOVÁ VRSTVA

Najrozšírenejším typom vrstvy používaným pre kryt vozovky sú asfaltové vrstvy, ktoré nás v kontexte tejto bakalárskej práce zaujímajú najviac. Asfaltové vrstvy sú zmesi kameniva a asfaltového spojiva, prípadne ďalších aditív zlepšujúcich požadované vlastnosti. Asfaltovým spojivom môže byť cestný asfalt, asfaltová emulzia alebo asfaltová pena. [3]

1.2.1 ASFALT

Asfalt, resp. asfaltové spojivo (anglicky *bitumen*) je z chemického pohľadu koloidná zmes vysokomolekulárnych uhľovodíkov a heteroatomických látok rôznych organických zlúčenín. Obsahuje tekuté zložky ako maltény (nasýtené a aromatické oleje, živice) a pevné asfaltény.

Z fyzikálneho pohľadu sa jedná o amorfný, visko-elastický materiál, ktorého chovanie ovplyvňuje predovšetkým teplota. Pri nízkych teplotách sa chová ako pružná pevná látka a pri vysokých teplotách ako tekutina



Graf 1.1 Visko-elastické chovanie asfaltu [3]

Asfalty vplyvom chemických a fyzikálnych procesov (účinkom kyslíku, teploty, ultrafialového žiarenia) starnú; zvyšuje sa podiel vysokomolekulárnych látok a asfalt sa stáva tvrdším.

Asfalty delíme podľa pôvodu na prírodné (najznámejšie nálezisko v jazere Trinidad) a ropné, vyrábané destilovaním surovej ropy v rafinériách. Už v roku 1873 vo Washington D.C. prebehlo prvé asfaltovanie vozovky. Existuje niekoľko druhov ropných asfaltov napr. cestné, modifikované, multigrádové atď.

Označovanie asfaltov sa riadi platnými normami pre jednotlivé druhy. V Európe sa označujú podľa výsledkov skúšky penetrácie a zaraďujú sa do jednotlivých skupín (tvrdé, bežné, mäkké) a tried (gradácií). V Čechách sa najbežnejšie stretáme s gradáciou 50/70 alebo 70/100. [3]

1.2.2 ASFALTOVÉ ZMESI

Existujú rôzne druhy asfaltových zmesí a v závislosti na dopravnom zaťažení a klimatických podmienkach a podľa toho pre akú vrstvu konštrukcie sú určené sa rozhodne aké vstupné materiály sa použijú na jej výrobu: asfaltové spojivo a kamenivo.

Podľa účelu použitia existujú tieto druhy asfaltových zmesí:

- asfaltový betón AC (*Asphalt Concrete*)
- AC pre veľmi tenké vrstvy BBTM (*Beton Bitumeneux Très Minces*)
- asfaltový koberec mastixový SMA (*Stone Mastix Asphalt*)
- asfaltový koberec drenážny PA (*Porous Asphalt*)
- asfaltový koberec otvorený AKO
- liaty asfalt MA (*Mastix Asphalt*)

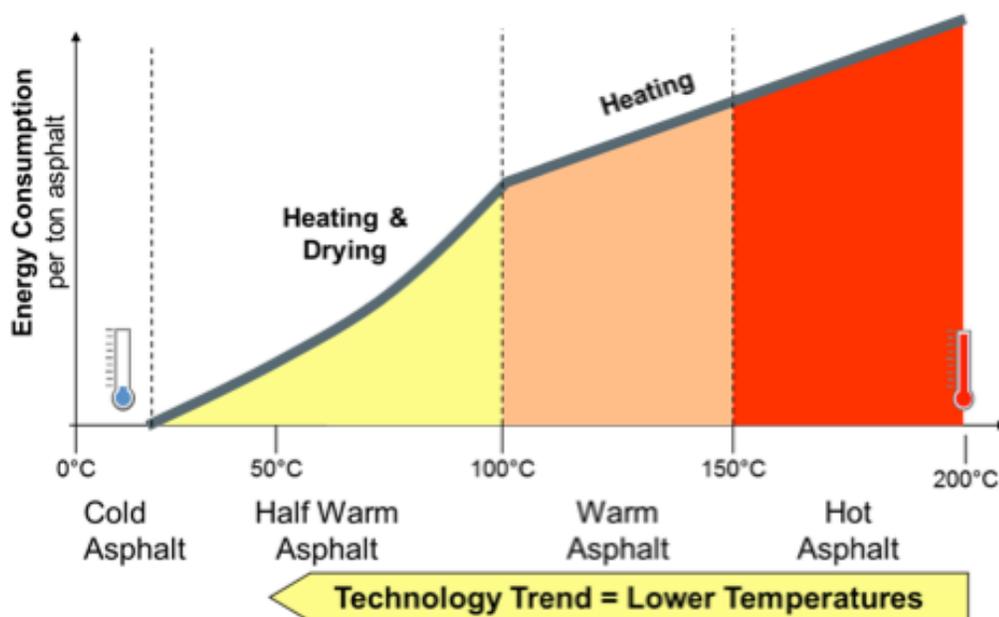
Asfaltovú zmes tvorí kostra vzájomne zakliesnených zrn kameniva, ktoré sú na povrchu obalené tenkou vrstvou asfaltu. Výroba prebieha na obalovníach z kadiaľ sa dovezie na stavbu, položí sa finišerom a zhutní valcom (nie v prípade liateho asfaltu).

Na fungovaní asfaltových zmesí sa podieľa viacero faktorov, ktoré majú vypovedajúcu hodnotu o ich kvalite, ako napr. medzerovitosť, zrnitosť zmesi kameniva, obsah asfaltu (4 – 7 %), druh asfaltu a príľnavosť asfaltu ku kamenivu. [3]

Asfaltové zmesi vieme rozdeliť do štyroch skupín podľa výrobnéj teploty:

- studené (*Cold Mix Asphalt*)
- poloteplé (*Half Warm Mix Asphalt*)
- teplé (*WMA – Warm Mix Asphalt*)
- horúce (*HMA – Hot Mix Asphalt*)

Horúce asfaltové vrstvy sa vyrábajú obalovaním zmesi kameniva asfaltom na obalovniach za vysokej teploty (150 – 200 °C). Takejto teploty treba dosiahnuť kvôli dostatočnému vysušeniu kameniva a zároveň na zníženie viskozity asfaltu, čím sa zabezpečí potrebné obalenie kameniva asfaltom, požadovaná spracovateľnosť zmesi pri ukladaní a hutnení a následne aj požadovaná životnosť zmesi v konštrukcii vozovky. Dosiahnutie takejto teploty vyžaduje spotrebu energie na ohrev – vykurovacie palivá, za vzniku nežiadanych spalín a výparov (CO₂, plynné organické látky, NO_x) ktoré spôsobujú skleníkový efekt a negatívne ovplyvňujú pracovné prostredie zamestnancov.



Graf 1.2 Rozdelenie asfaltových zmesí v závislosti na výrobnej teplote [8]

Studené zmesi sa vyrábajú najčastejšie na báze asfaltových emulzií. Najviac rozšírenou úpravou sú tenké úpravy, tzv. emulzné kalové zákryty alebo mikrokoberce. Použitie studených zmesí ako náhrady klasických horúcich zmesí je rozšírené iba v niektorých krajinách (USA, Francúzsko), v českých podmienkach sa využívajú len v obmedzenom rozsahu pri opravách vozovky, alebo ako spojovacie postreky či membránové vrstvy (SAMI), ktoré sa používajú pri pokládke nových

vrstiev. Technologický proces je realizovaný pri bežných klimatických teplotách, čím sa znižuje dopad na životné prostredie a je založený na využití asfaltových emulzií a špeciálne upravených asfaltových spojív.

Dôvodom rozšírenia studených zmesí v USA a Francúzsku je predovšetkým závislosť tejto technológie na stabilnom, teplom a suchom počasí, ktoré umožňuje tento typ zmesi efektívne vyrábať. Ďalším aspektom sú aj veľké prepravné vzdialenosti v rozľahlých oblastiach, kedy je vhodnejšie využívať miestne materiály a jednoduché miešacie zariadenia. [3]

V posledných rokoch môžeme v našich zemepisných šírkach pozorovať nárast priemerných teplôt. Následkom toho musia asfaltové zmesi odolávať zvýšeným klimatickým účinkom, čo v konečnom dôsledku vedie k zmene ich správania smerom od pružno-plastického k plastickému. V kombinácii so zaťažením ťažkými nákladnými vozidlami tak vznikajú v asfaltových vrstvách trvalé deformácie.



Obrázok 1.1 Finišer [41]

Na elimináciu týchto negatívnych účinkov sa postupne prechádza na gradačne tvrdšie typy cestných asfaltov, resp. na polymérom modifikované asfalty. Tieto typy spojív však vzhľadom na svoju viskozitu vedú k zvyšovaniu teplôt pri výrobe asfaltových zmesí, čo má nepriaznivý vplyv na životné prostredie. Riešením sú tak technológie, ktorými možno znížiť teploty pri výrobe asfaltových zmesí. [4]

V súčasnosti je znižovanie teploty pri výrobe a spracovaní asfaltových zmesí vysoko aktuálnou témou, ktoré súčasne rieši znižovanie nákladov, ako i zníženie emisií skleníkových plynov. Existuje vyše 20 technologických spôsobov ako vyrobiť tzv. teplú asfaltovú zmes – napr. aj penoasfalt a tejto problematike sa venuje kapitola 2.

Ďalšou aktuálnou témou je recyklácia stavebných materiálov, ktorá sa vykonáva za horúca alebo za tepla a jej hlavným cieľom je opätovné využitie stavebných materiálov, čím šetrí prírodné neobnoviteľné zdroje, znižuje objem stavebného odpadu a tvorbu skládok a celkovo rešpektuje životné prostredie. Svoje pevné miesto v recyklácii za studena si našla aj technológia penoasfaltu. V súvislosti s recykláciou je dôležité poznať pojem R – materiál, ktorý je často súčasťou teplých asfaltových zmesí a jedná sa o starú rozpojenú asfaltovú zmes, ktorá sa získava frézovaním alebo vybúraním a drvením asfaltových vrstiev pri rekonštrukcii vozoviek. [3] Konkrétne recyklácii za studena sa venuje predpis TP 208 – Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena [5] a TP 112 – Studené pěnoasfaltové vrstvy [6].

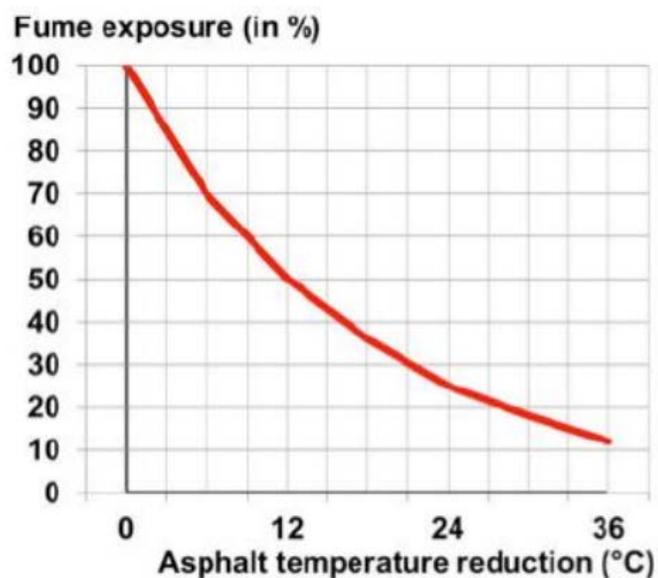
2 TEPLÉ ASFALTOVÉ ZMESI

Teplá asfaltová zmes sa z angličtiny označuje ako *Warm Mix Asphalt (WMA)* a jedná sa o asfaltovú zmes vyrábanú a spracovávanú o 20 až 40°C menej ako štandardne používané horúce asfaltové zmesi resp. *Hot Mix Asphalt (HMA)*.

Z pohľadu BOZP je práca s nižšími teplotami bezpečnejšia a množstvo aerosólov a výparov (TOM, z angličtiny *Total Organic Matter* – zlúčeniny uhlíka), ktorým je pracovník vystavený, vie byť až o 36 % nižší v závislosti od druhu použitej zmesi. [7]

Nižšie teploty miešania a pokládky, ktoré je možné dosiahnuť použitím teplých asfaltových zmesí, minimalizujú emisie až o 50 % pri každom znížení teploty o 12 °C. [8]

Bolo spočítané, že ak sú výrobné teploty nižšie o 28°C, spotreba paliva na nahriatie a vysušenie agregátu (kameniva) sa zníži o 11%. [9]



Graf 2.1 Graf závislosti redukcie teploty na množstve emisií [34]

2.1 DRUHY TEPLÝCH ASFALTOVÝCH ZMESÍ

Existuje niekoľko spôsobov ako teplú asfaltovú zmes vyrobiť. Tieto technológie majú za úlohu znižovať viskozitu asfaltu a zároveň zachovať dostatočnú schopnosť obaliť kamenivo a ďalej zmes spracovávať pri nižších teplotách.

Najpoužívanejšie technologické postupy sú:

- Organické aditíva
- Chemické aditíva
- Peniace technológie

2.1.1 ORGANICKÉ PRÍSADY

Organické príslady (aditíva) sú látky, ktoré umožňujú zmeniť reologické vlastnosti asfaltových spojív. Ich použitím sa zníži viskozita asfaltového spojiva a tým i výslednej asfaltovej zmesi.

Najčastejšie používané organické príslady sú:

- Fischer-Tropschove parafíny (FT parafíny) - alifatické uhľovodíky s dlhým reťazcom, ktoré vznikajú syntézou zo zemného plynu. Rozsah teplôt topenia je 115 až 120 °C.
- Amidy mastných kyselín s rozsahom teplôt topenia 140 až 145 °C.
- Montánne vosky získavané spracovaním hnedého uhlia majú široký rozsah teplôt 110 až 140 °C

Ak zmes dosiahne teplotu nižšiu, ako sú teploty topenia vyššie uvedených organických príslad, začne kryštalizovať a tým prispieva k zvyšovaniu stability a odolnosti voči vzniku trvalých deformácií. Pri vyšších teplotách sa organické

prísady plne rozpustia, vytvárajú homogénnu látku a v tekutom stave znižujú viskozitu asfaltovej zmesi.

Organické prísady sa do asfaltového spojiva alebo zmesi pridávajú v doplnkovom pracovnom kroku v množstve 2-3 % z hmotnosti asfaltového spojiva. Môžu sa dávkovať priamo na obalovni alebo sa použijú priemyslovo vyrobené nízkoviskózne asfaltové spojivá dodávané výrobcom, ktorý vždy deklaruje vlastnosti daného použitého spojiva. [10]

Príkladom konkrétnych organických prísad sú:

- Sasobit® - produkt z Južnej Afriky od firmy Sasol Wax, jedná sa o jemný kryštalický alifatický uhľovodík s dlhým reťazcom, ktorý sa vyrába splyňovaním uhlia s použitím Fischer-Tropsch (FT) procesu
- Asphaltan B® - zmes látok na báze zložiek montánneho vosku a uhľovodíkov s vyššou molekulovou hmotnosťou; vyvinutý v Nemecku firmou Romonta GmbH [11]

2.1.2 CHEMICKÉ PRÍSADY

Chemické prísady na rozdiel od organických alebo minerálnych prísad nemenia viskozitu asfaltovej zmesi. Fungujú ako povrchovo aktívne látky a regulujú trecie sily na mikroskopickom rozhraní prísad a asfaltu v rozsahu teplôt 80 °C až 140 °C. Redukcia pracovných teplôt asfaltovej zmesi chemickými prísadami je 20 až 40 °C. [8]

Evotherm™ je produkt z Južnej Karolíny, USA vyvinutý firmou MeadWestvaco Asphalt Innovations, ktorý funguje na báze chemických prísad. Počas výroby sa namiesto tradičného asfaltového spojiva používa asfaltová emulzia z Evothermu, tá sa potom ďalej zmieša s agregátom. [11]

2.1.3 PENIACE TECHNOLOGIE

Na zníženie viskozity asfaltu sa aplikuje široká škála penivých techník. Podstatou týchto techník je zavedenie malého množstva vody do horúceho asfaltu pri použití rôznych prostriedkov. Voda pri vysokej teplote začne meniť svoje skupenstvo z kvapalného na plynné a vytvárať penu, čím zväčší objem asfaltového spojiva a na krátky časový úsek zníži viskozitu asfaltového spojiva. Takto vzniknutá pena umožňuje dokonale obaliť kamenivo a zmes ďalej spracovávať pri nižších teplotách.

Najčastejšie sa využívajú dve peniace technológie:

- Použitie injektážnej penovej dýzy – priama metóda
- Použitie minerálu alebo sekvenčná technika – nepriama metóda

V nepriamej metóde sa uplatňuje napríklad použite syntetických zeolitov. Zeolity sú silikáty alkalických zemín s mikroporóznou štruktúrou, ktoré obsahujú asi 20 % viazanej vody. Pri zahriatí nad 100 °C plynule a bez zmien kryštalickej štruktúry uvoľňujú (kryštalickú) vodu, namiesto ktorej prijímajú iné zlúčeniny a dochádza k peniacemu efektu po dobu 6 až 7 hodín, až kým neklesne teplota späť pod 100 °C. [8]

Zeolity sa dávajú v množstve 0,2 až 0,4 % z hmotnosti asfaltovej zmesi v závislosti na type zmesi. Účinok zmeny viskozity zeolitom je nezávislý na druhu použitého spojiva ale vzhľadom k charakteru látky je časovo obmedzený, preto je nutné zohľadniť túto skutočnosť pri skladovaní a preprave. [5]

Príkladom syntetického zeolitu je:

- Aspha-Min®; vyvinutý nemeckou firmou Eurovia Services GmbH, obsahuje 21 % viazanej vody, ktorá sa uvoľní pri teplote 80 – 160 °C
- Advera® WMA od spoločnosti PQ Corporation z Pennsylvánie v USA, s obsahom vody 18 – 21 %, ktorá sa uvoľňuje už pri 100 °C [11]

Druhou nepriamou peniacou metódou je využitie vlhkosti na agregáte (piesok, R-materiál), jedná sa o sekvenčnú techniku. Hrubý agregát, ktorý predstavuje zhruba 80 % zmesi sa zohreje na teplotu 130 – 160 °C a zmieša sa asfaltovým spojivom, čím vytvorí veľmi hrubú zmes. V druhej fáze sa pridá studená alebo mokrá frakcia agregátu, ktorá zreaguje s asfaltovou zmesou a začne peniť, čím obalí asfaltom i zvyšok jemnejšej frakcie. [8]

Nepriama metóda s použitím zeolitu umožňuje pokles pracovných teplôt približne o 30 °C, pri použití sekvenčnej techniky o 20 až 40 °C.

2.2 VÝROBA PENOASFALTU PRIAMOU METÓDOU

Pri výrobe asfaltovej zmesi je nutný proces miešania kameniva s asfaltom, filerom a ďalšími prísadami, ktorý prebieha na obalovniach kontinuálneho typu alebo prerušovane – tzv. šaržové obalovne. Zatiaľ čo kontinuálne obalovne sú veľmi rozšírené v USA, v Európe prevládajú skôr šaržové obalovne, ktoré umožňujú zmeniť zloženie asfaltovej zmesi pri výrobe každej šarže. [12]

Aby bolo možné vyrobiť teplé asfaltové zmesi je potrebné súčasné zariadenia upraviť tak, že sa pridá speňovacie zariadenie pred miešací bubon. Firmy, ktoré penoasfalt vyrábajú, si vyvíjajú a patentujú vlastné zariadenia umožňujúce dávkovanie vody do horúceho asfaltu.

Asfaltová pena vzniká v expanznej komore speňovacieho zariadenia pridaním vody a vzduchu pod veľkým tlakom, do predom načerpaného horúceho asfaltového spojiva. Voda pri vysokej teplote zmení svoje skupenstvo z kvapalného na vodnú paru a celá zmes naberie až 20-násobok svojho pôvodného objemu.



Obrázok 2.1 Laboratórne speňovacie zariadenie firmy Wirtgen [13]

Asfaltová pena ďalej putuje cez vstrekovacie dýzy do miešacieho bubna, kde je pripravená na zmiešanie so suchým a nahriatým kamenivom a inými prísadami. [13]

Množstvo a pomer jednotlivých zložiek asfaltovej peny závisí na výrobcovi, tzn. spoločnosti, ktorá produkt vyvíja a zloženie optimalizuje.

Špecifikácia vstupných materiálov na výrobu asfaltovej peny: [14]

- demineralizovaná voda 2 – 5 % hmotnosti asfaltu a o teplote 10 až 25 °C
- horúce asfaltové spojivo 50/70 – 160/70 o teplote 170 až 190 °C
- štandardný tlak vstrekovanej vody 4 – 5 bar
- vŕhaný vzduch pod tlakom 0 – 10 bar

2.2.1 VLASTNOSTI ASFALTOVEJ PENY

Vzhľadom na nízku tepelnú vodivosť asfaltu a vody, môže bublina asfaltovej peny zostať stabilná len po určitý čas. Ako sa koloidná hmota asfaltového spojiva a vody ochladzuje pri teplote okolia, para v bublinách kondenzuje a spôsobuje rozpad bublín a zároveň celej peny. Tento jav je zvyčajne merateľný len v niekoľkých sekundách, preto je dôležitá a sledovaná kvalita asfaltovej peny. [15]



Legenda:

hot bitumen – horúce asfaltové spojivo

water – voda

air – vzduch

foamed bitumen – asfaltová pena

Obrázok 2.2 Speňovacie zariadenie [13]

Kvalitu asfaltovej peny určujeme podľa dvoch sledovaných parametrov:

- Expanzný pomer ER (z angl. *Expansion Ratio*) alebo Ex [-]
- Polčas usadenia peny $T_{1/2}$ [s] (z angl. *Half-life*)

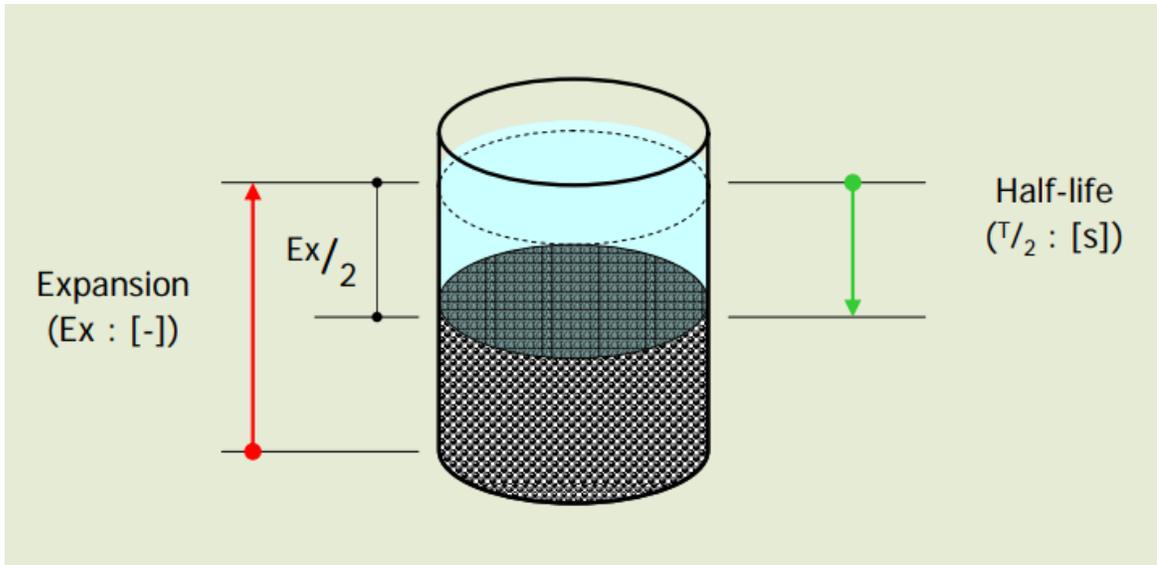


Obrázok 2.3 Spenené asfaltové spojivo [37]

Expanzný pomer ER je definovaný ako pomer dosiahnutého objemu asfaltovej peny a objemu pôvodného asfaltového spojiva. Asfaltové peny s hodnotou expanzného pomeru 8 – 15 pokladáme za peny vyššej kvality.

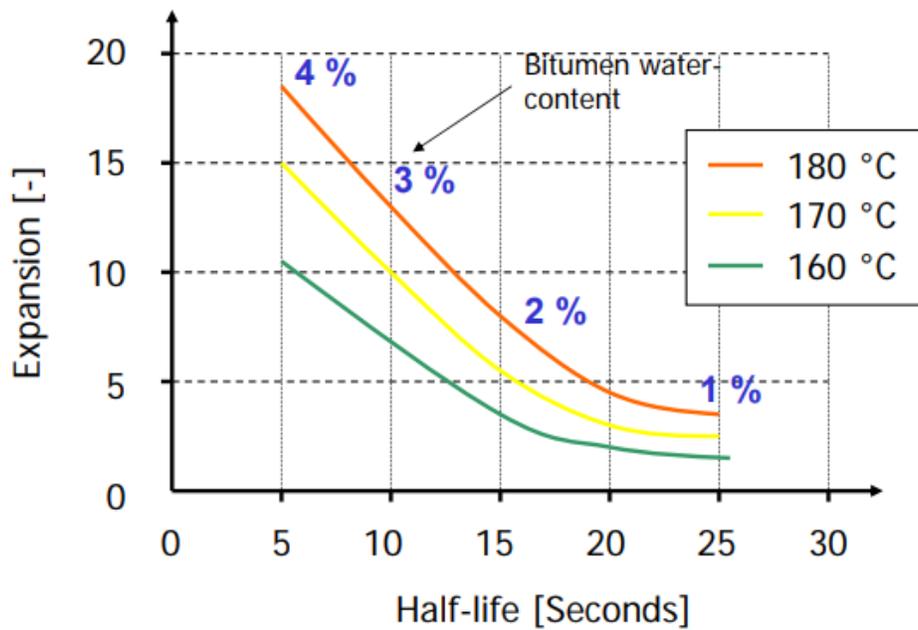
Polčas usadenia asfaltovej peny $T_{1/2}$ je definovaný ako doba v sekundách, za ktorú dôjde k zníženiu maximálneho objemu asfaltovej peny o 50 %. Štandardne sa hodnota $T_{1/2}$ pohybuje v rozmedzí 10 až 15 sekúnd. Za kvalitné asfaltové peny sa považujú tie, ktoré sa rozpadnú za dlhšiu dobu ako 15 sekúnd. [14]

Polčas usadenia peny vyjadruje stabilitu asfaltovej peny a je nepriamo úmerný expanznému pomeru. Pri zvyšovaní podielu vody v horúcom asfalte sa oba parametre rozvíjajú v opačných smeroch, ako je vidieť v Grafe 2.3.

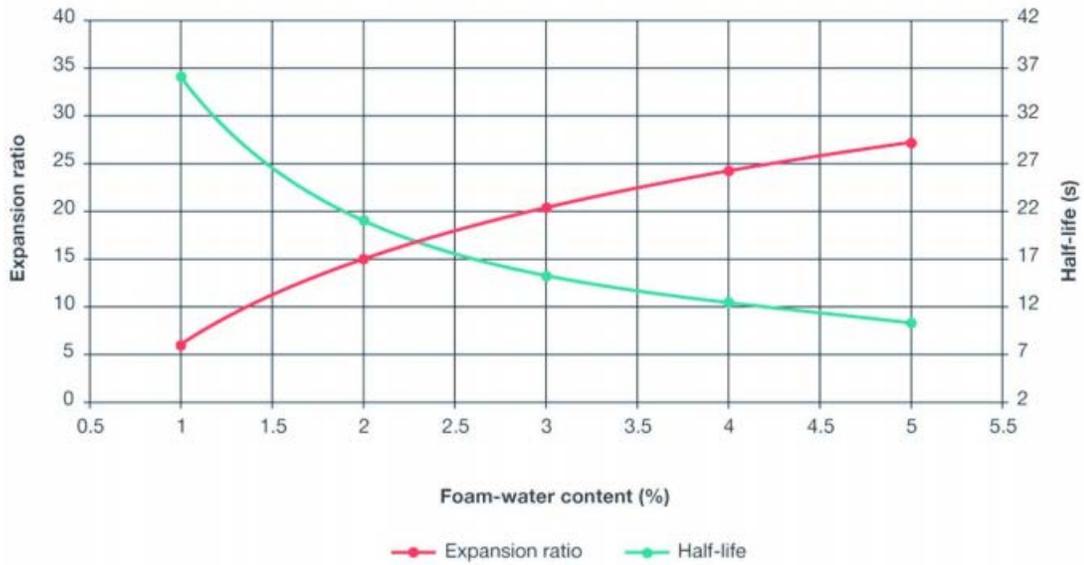


Obrázok 2.4 Vzťah medzi expanzným pomerom a polčasom usadenia asfaltovej peny [38]

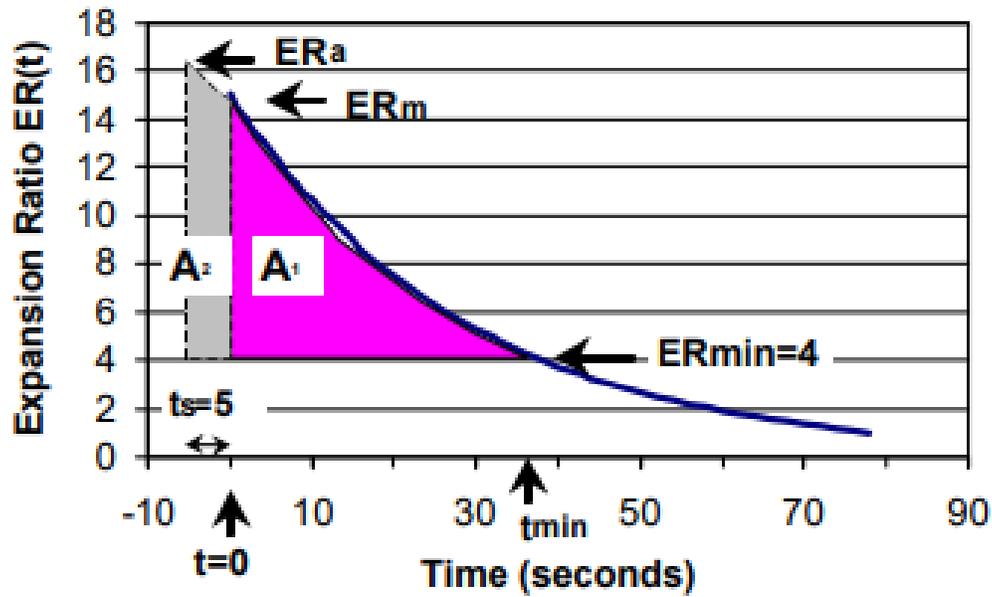
Oba parametre sú závislé na druhu a pôvode asfaltového spojiva, na teplote horúceho asfaltového spojiva ako aj na množstve vstrekovanej vody.



Graf 2.2 Efekt teploty asfaltovej zmesi na Expanzný pomer a Polčas usadenia peny [38]



Graf 2.3 Graf závislosti Expanzného pomeru a Polčasu usadenia peny [38]



Graf 2.4 Príklad: Index napnenia ($FI=A_1+A_2$) pre asfaltovú zmes s $ER=4$ [-]; [15]

Vplyv na penivosť môžu mať aj základné fyzikálne podmienky ako teplota, vlhkosť a tlak okolitého prostredia. Dostatočnú homogenitu penoasfaltu ovplyvňuje aj veľkosť a usporiadanie miešacieho zariadenia napr. veľkosť vstrekovacej zóny. [14]

Expanzný pomer a Počas usadenia peny nie sú dostatočné ukazovatele kvality a miery použiteľnosti asphaltovej peny pre zmiešanie s kamenivom alebo R - materiálom (pri recyklácii za studena).

Vhodným parametrom je ten, ktorý odráža schopnosť peny zmiešať sa s agregátom – kamenivom. Expanzný pomer charakterizuje viskozitu peny, zatiaľ čo rýchlosť akou kolabuje pena je definovaná rozpadovou krivkou, čo je údaj o čase, ktorý je k dispozícii na miešanie. Plocha pod rozpadovou krivkou bola definovaná ako Index napenenia FI (z angl. *foam index*) a je vhodným empirickým parametrom na určenie kvality asphaltovej peny. [15]

3 SKÚSENOSTI S PENOASFALTOM V ZAHRANIČÍ

3.1 ZAČIATKY PENOASFALTU

Penenie asfaltu nie je žiadnou novinkou, prvý riadený technologický proces výroby penoasfaltu bol vyvinutý a patentovaný Dr. Ladisom Csanyim z Iowa State University, USA v roku 1957. K vynálezu penoasfaltu ho dovedol nedostatok kvalitného kameniva do asfaltových zmesí v štáte Iowa. Pôvodne ho využíval ako vylepšené spojivo pre stabilizáciu zemín. Skúmal rôzne metódy výroby asfaltovej peny, ktoré by boli vhodné k pokládke a prišiel s jednoduchou a efektívnou metódou vstrekovania pary do horúceho asfaltu. Táto metóda sa však preukázala ako nepraktická k použitiu in-situ, hlavne kvôli špeciálnym zariadeniam ako napr. parné kotle. [16] [14]

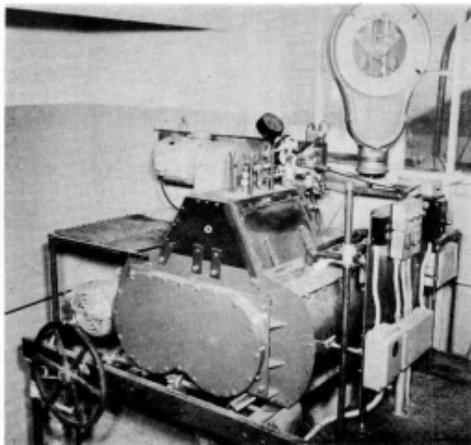


Figure 3. Pilot mixer equipped for foam asphalt mix operation.

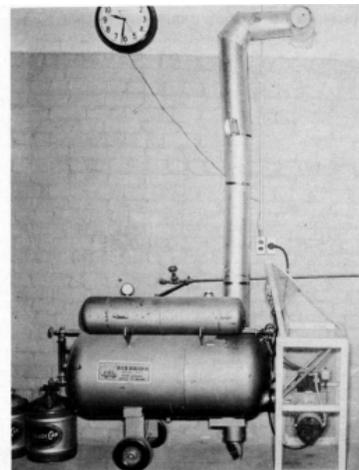


Figure 4. Small boiler unit for generating steam.

Obrázok 3.1 Parné zariadenie na výrobu penoasfaltu [16]

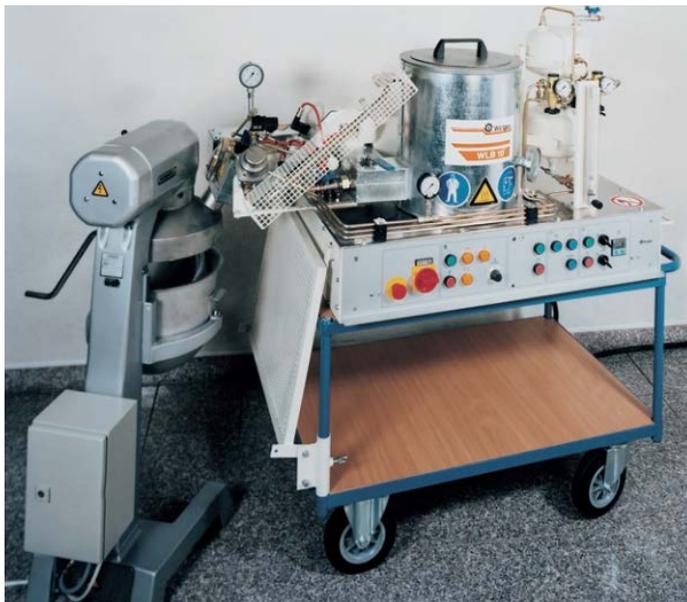
Prvý zaznamenaný skúšobný úsek bol uskutočnený v roku 1957 na miestnej okresnej komunikácii v štáte Iowa. Ďalšie projekty boli v Arizone a tiež v Nipawin, Kanada na začiatku 60. rokov.

V 1968 spoločnosť Mobil Oil Australia kúpila patenty od Dr. Csanyi a zmenila pôvodný postup. Namiesto pary začali vstrekovat' studenú vodu v nízkotlakovom systéme, vrátane možnosti použitia i iných prísad. Technológia penoasfaltu sa tak stala praktickejšia a ekonomickejšia. Následne získala na popularite v krajinách ako Austrália, Nemecko, Nový Zéland, Južná Afrika a neskôr USA a Veľká Británia. [14]

3.2 NA PRELOME STOROČÍ

Po roku 1991, kedy spoločnosti Mobil Oil Australia vypršal patent a technologický postup speňovania asfaltu vodou mohol byť použitý bez zakúpenia licencie, prebehlo mnoho výskumov po celom svete.

Významným priekopníkom bola firma Wirtgen, ktorá v polovici 90. rokov vyvinula laboratórne speňovacie zariadenie WLB-10. Zariadenie slúžilo na výrobu asfaltovej peny pomocou vstrekovanej vody a vzduchu a využívalo sa pri recyklácii asfaltových vozoviek za studena. Výsledkom pokusov bolo napr. zistenie, že asfalty



Obrázok 3.2 Speňovacie zariadenie WLB 10 firmy Wirtgen [39]

s väčšou penetráciou zvyknú peniť lepšie (vhodné je asfaltové spojivo so 100 penetračnými jednotkami).

Niekoľko ďalších projektov týkajúcich sa využitia penoasfaltu v studených technológiách bolo prevedených napr. v Južnej Afrike v rokoch 1994 až 1997, ktoré preukázali dobrú kvalitu, odolnosť a životnosť recyklovaných vozoviek. [17]

V roku 1999 Kim Jonathan Jenkins z University of Stellenbosch, JAR na konferencii o asfaltových vozovkách prednášal o penivosti asfaltu ako o hlavnom faktore, ktorý sa podieľa na kvalite penoasfaltu a predstavil Index penivosti (viac v kapitole 2.2.1) [15]

Vo všeobecnosti sa predpokladalo, že mäkké asfaltové spojivá a vyššie teploty produkujú lepšiu kvalitu peny, avšak experimenty vykonané Z. He a W. Lu z Číny v roku 2004 nepotvrdili spojitosť medzi kvalitou asfaltovej peny a teplotou asfaltu. [18]

V roku 2005 sa Gui-ping He a Wing-gun Wong z Honkong Polytechnic University svojím výskumom podporili tvrdenie, že asfaltové spojivo s dobrým peniacim potenciálom môže produkovať menej kvalitnú penu, pokiaľ nie sú podmienky optimalizované. Potvrdili, že na kvalitu peny má veľký vplyv viskozita asfaltového spojiva (hodnota penetrácie) a množstvo vstreknutej vody, naopak tlak vháňaného vzduchu mal veľmi malý efekt na výsledný Index napenenia. [19]

3.3 VZOSTUP WMA

Od 90. rokov a počiatkom 21. storočia sa pojem globálne otepľovanie dostal do povedomia širokej verejnosti a téma udržateľného vývoja získavala na dôležitosť. Začala sa napríklad sledovať produkcia CO₂ a celková energetická spotreba. V roku 1997 bola podpísaná medzinárodná dohoda o znížení emisií

skleníkových plynov tzv. Kjótsky protokol, na ktorý v roku 2015 nadviazala Parížska dohoda. Jej cieľom je udržať nárast globálnej priemernej teploty pod hranicou 2 °C. Všetky tieto aspekty sa stali a stále sú hnacím motorom pokroku i v oblasti teplých asfaltových zmesí.

WMA vzniklo v Európe koncom 90. rokov a v roku 2002 sa vďaka štúdiám európskych technológií americkou organizáciou NAPA (*National Asphalt Pavement Association*) sa im dostalo pozornosti i v USA, kde získal na popularite veľmi rýchlo a niekoľko laboratórií začalo svoje vlastné výskumy. [11] Technológia penoasfaltu už mala svoje pevné miesto v recyklácii za studena.

3.3.1 FRANCÚZSKO

Teoretický výpočet jednej z technológií WMA vo Francúzsku nazvanou LEA (z angličtiny *low-energy asphalt*, po francúzsky EBE – *enrobage à basse energie*) preukázal 50-percentnú úsporu energie na vyhriatie jednej tony LEA (83MJ/t) v porovnaní s klasickou horúcou zmesou - HMA (175MJ/t). Úspora sa týkala

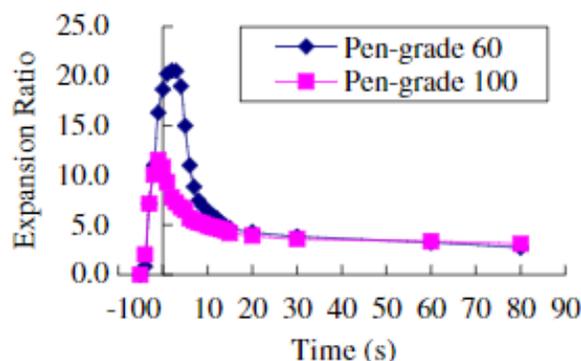


Fig. 5. Decay of the two bitumens at 180 °C, 5 bar and 3% water content.

Obrázok 3.3 Rozpadové krivky dvoch rôznych asfaltových spojív pri rovnakých podmienkach (teplota asfaltu 180°C, tlak vzduchu 5 barov, obsah vody 3%) [19]

i množstva oxidu uhličitého a oxidu dusného, vid' Tabuľka 3.1 Porovnanie množstva emisií jednej tony LEA a HMA [20] Technológia LEA využíva na spenenie asfaltu vlhkosť obsiahnutú v agregáte. Hrubý agregát (väčšie frakcie kameniva) sa zohreje na teplotu približne 150 °C a zmieša sa s asfaltovým spojivom o teplote 140 °C až 180 °C (záleží na druhu asfaltu). Po pridaní špeciálnych aditív a zvyšku agregátu, vlhkého piesku a prahových častíc, začne asfaltové spojivo peniť a obalovať vlhké častice. Výsledná zmes dosiahne ekvilibrium pri teplote cca 100 °C. [20]

Tabuľka 3.1 Porovnanie množstva emisií jednej tony LEA a HMA [20]

TABLE 3 Comparison of Greenhouse Gas Emissions for Tonne of HMA and Tonne of LEA

	Total Q (MJ)	Fuel Input (MJ)	GGE ^a			Total (kg CO ₂ eq)
			CO ₂ (kg CO ₂ eq)	N ₂ O (kg CO ₂ eq)	CH ₄ (kg CO ₂ eq)	
HMA mix						
Dryer	172	191	15	0.148	0	15
Bitumen heat	5	6	0.44	0.004	0	0.44
Total						16
LEA mix						
Dryer	79	88	7	0.068	0	7
Bitumen heat	5	6	0.44	0.004	0	0.44
Total						7

^akg CO₂ eq = kg CO₂ + kg CO₂ eq (N₂O).

3.3.2 HOLANDSKO

LT-Asphalt (z angličtiny *low-temperature asphalt*, nízko-teplotný asfalt) holandskej firmy Nynas je vyrábaný pomocou špeciálneho peniaceho prístroja a pridaním 0,5 – 1,0 % hydrofilného fileru, ktorý pomáha udržať a kontrolovať latentnú vlhkosť pred napenením. Ich vlastné špeciálne asfaltové spojivo Nyfoam napenia pomocou vodných trysiek a zmiešajú s kamenivom o teplote 90 °C a hygroskopického fileru.

Výsledná zmes má teplotu okolo 100 °C a pokladá sa klasicky pomocou finišeru. Výrobok zostáva funkčný až do 60 °C, čím zvyšuje flexibilitu zvýšením pracovného času na prepravu a pokládku, energetické úspory sú až 40 %.

Nynas urobila niekoľko skúšobných úsekov v Holandsku a po štyroch rokoch preukázali rovnaké mechanické vlastnosti ako ich horúce zmesi. Venujú sa aj in situ recyklácii asfaltových vozoviek za studena, ich technológia sa nazýva Bitufoam® a bola použitá napríklad pri rekonštrukcii prístavu v Antverpách v Belgicku v roku 2012. [21] [22]

3.3.3 DÁNSKO

V Dánsku spoločnosť NCC vyrába penoasfalt pomocou patentovaného peniaceho generátora. V septembri 2012 uskutočnili štúdiu v spolupráci s Dánskym riaditeľstvom ciest a diaľnic na úseku v meste Ulladulla. Položili WMA za rovnakých podmienok ako tradične vyrábanú zmes. Použili polymérom modifikovaný SMA 11



Obrázok 3.4 Skúšobný úsek WMA v Ulladulla, Holandsko [8]

s teplotou o 20 °C nižšou ako horúca zmes. Porovnávali oba materiály a získali zhodné výsledky priľnavosti a volumetrických parametrov. Spôsob pokladania oboch zmesí bol identický – pomocou finišeru. Penoasfalt preukázal o niečo kratšiu dobu tvrdnutia. Po tomto úspešnom pokuse NCC uskutočnila ešte niekoľko ďalších úsekov s využitím technológie penoasfaltu. [8]

3.3.4 NÓRSKO

Technológia penoasfaltu WAM-Foam® (*Warm Asphalt Mix Foam*) vznikla v spolupráci firiem Shell International Petroleum Company Ltd., Veľká Británia a nórskym Kolo-Veidekke už v roku 1995. Princípom tejto technológie je spojenie dvoch samostatných zložiek s asfaltovým spojivom rozdielnej penetrácie. Najprv sa agregát zohreje na teplotu 130 °C a pokryje mäkkším asfaltovým spojivom (zvyčajne 20 – 30 % celkového spojiva). V druhom kroku sa tvrdšie spojivo (penetrácia od 10 – 100 mm v závislosti od požiadaviek na vozovku) primieša do vopred potiahnutých agregátov v podobe peny. Asfaltová pena vzniká odporovaním vstreknutej studenej vody o hmotnosti 2 – 5 % tvrdého asfaltu do zohriateho asfaltového spojiva. Zmes tvrdého a mäkkého spojiva zabezpečuje požadované vlastnosti výslednej asfaltovej zmesi. [23]

WAM-Foam® technológia je vhodná pre vozovky s intenzitou dopravy 1500 až 22000 áut/deň. K pokládke je možné použiť štandardné zariadenia. [11]

Spoločnosť Veritas v mene firmy Veidekke Industri zmerala zmenu spotreby paliva a emisií prachu, CO₂, CO a NO_x dvoch zmesí; Agb11 s bežnou horúcou zmesou a s použitím peniacej technológie WAM-Foam® (redukcia teploty o 40 °C). Obe zmesi obsahovali 15 % recyklovaného materiálu. Pri použití teplej zmesi došlo k cca 50 % redukcii, viď Tabuľka 3.2. [24]

V roku 2010 bol v Nórsku iniciovaný projekt nízko-teplotného asfaltu LTA - 2011 reprezentantmi The Norwegian Asphalt and Road Contracting Association (FAV), ktorý pozostával z dvoch častí; prvá sa zaoberala analýzou pracovného prostredia a vplyvom na zdravie pracovníkov, zatiaľ čo druhá sa sústredila na kvalitu asfaltových zmesí. Spolu bolo vybudovaných 11 testovacích úsekov, rovnobežne vedľa seba boli vrstvy z horúcej a teplej asfaltovej zmesi. Celkom bolo testovaných 6 WMA technológií, tri z nich boli na báze prísad a tri na báze penenia. Referenčné materiály HMA aj WMA mali rovnaké zloženie, okrem malých množstiev prímiesí.

Výsledky štúdie pracovného prostredia ukázali významné zníženie asfaltových výparov o 58 až 67 % v závislosti od metódy merania pri priemernom znížení teploty asfaltu o 29 °C. Meranie prostredia zahŕňalo stacionárne odbery vzoriek asfaltových pár a výparov, organických a elementárnych uhlíkov, amínov a polyamínov ako aj dýchatelného prachu. Výskumníci porovnávali i rozdiely vo fyzickej náročnosti na základe meranej srdcovej frekvencie pracovníkov pri výkone práce. Výsledky však nepreukázali žiadne štatisticky významné rozdiely.

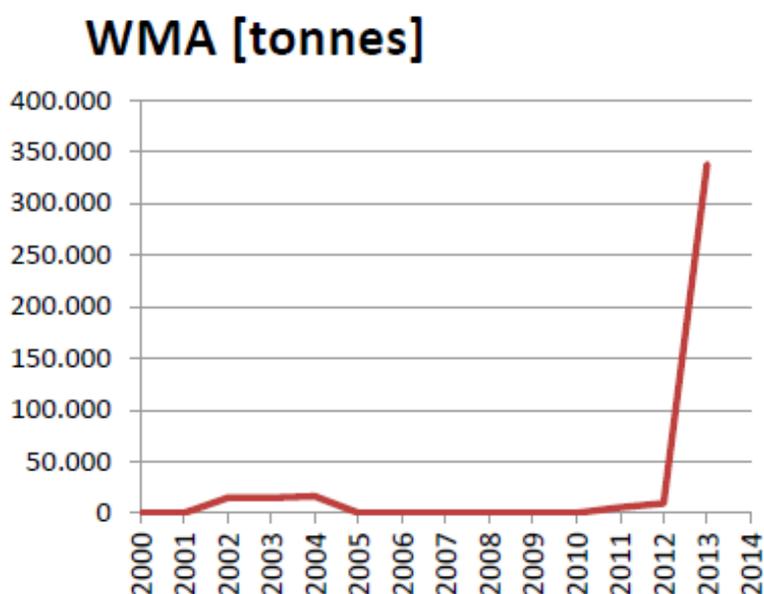
Kvalitu zmesí porovnávali na základe meraní odolnosti voči trvalým deformáciám, rovinatosti (International Roughness Index – IRI), medzerovitosti

Tabuľka 3.2 Spotreba paliva a emisií pri výrobe za horúca (Agb 11)

Asphalt type	Diesel consumption [litre/tonnes mix]	CO ₂ [kg/hour]	CO [kg/hour]	NOx [kg/hour]
Agb 11	ca. 4,5	2888	49	1,5
WAgb 11	ca. 2,7	1980	35	0,3
Reduction	40 %	31,5 %	28,5 %	61,5 %

a prílnavosti a testy nepreukázali žiadne veľké rozdiely medzi teplými a horúcimi zmesami.

V roku 2012 zaviedla Nórska správa ciest finančnú odmenu dodávateľom; za predpokladu zachovania rovnakej kvality dostanú za každú tonu asfaltovej zmesi, ktorá má teplotu nižšiu minimálne o 25 °C ako bežné horúce zmesi, bonus 4€. Zvýhodnenie malo kladný dopad na zvýšenie produkcie teplých asfaltových zmesí a na konci roku 2013 bolo vyprodukovaných až 210 000 ton WMA.



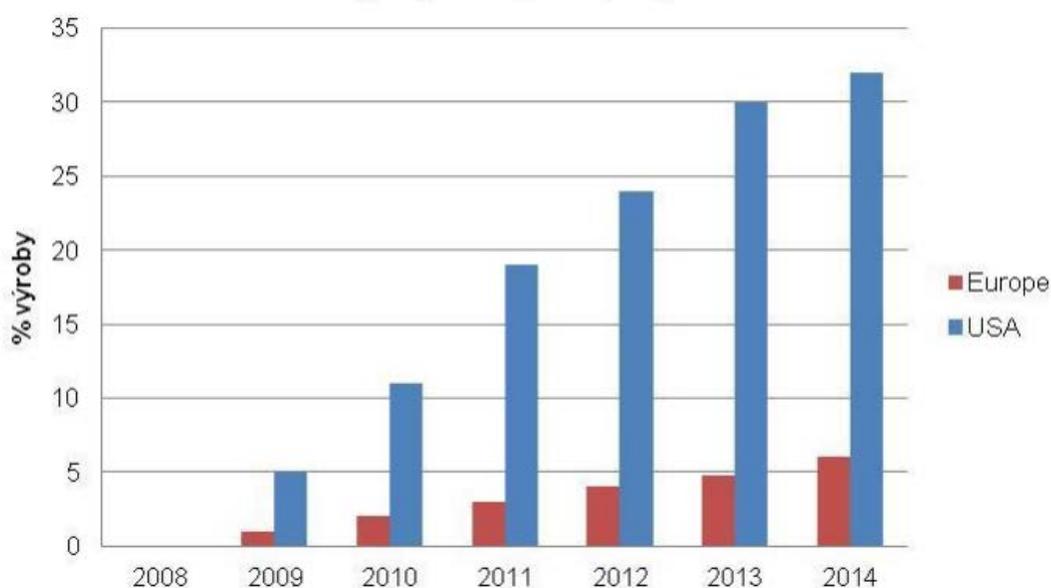
Obrázok 3.5 Vzostup použitia WMA v Nórsku [25]

3.3.5 USA

The Federal Highway Administration (*U.S. Department of Transportation*) spolu s AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) a NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) už od roku 1990 robia pravidelne a systematicky medzinárodný prieskum inovatívnych technológií, ktoré môžu posunúť rozvoj amerického dopravného systému. Vo svojej štúdii z roku

2008 prinášajú súhrn poznatkov o európskom pokroku v oblasti teplých asfaltových zmesí, výsledkom je i Tabuľka 3.4 na konci kapitoly. [11]

Aj napriek tomu, že teplé technológie vznikli v Európe, sú to práve Spojené štáty americké, ktoré robia najväčší pokrok a zažívajú rozmach. V roku 2009 vyprodukovali len 5 % WMA, v roku 2012 to už bolo 24 % a v súčasnosti cca 30 %; z toho 88 % je vyrobených pomocou peniacich technológií. [25]



Obrázok 3.6 Porovnanie podielu výroby WMA v USA a v Európe [40]

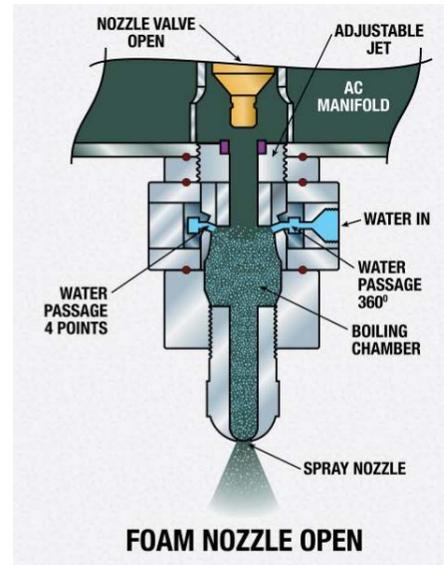
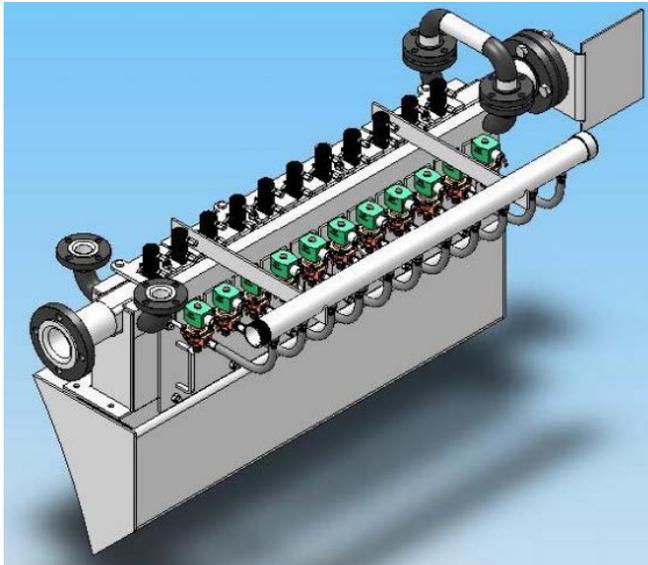
Technológiu Double Barrel Green (DBG) priniesla na trh americká firma Astec Industries. Jedná sa o čistú technológiu penoasfaltu bez použitia aditív, či špeciálnych asfaltových zmesí. The Double Barrel® Green System vyžaduje použitie kontinuálnej obalovne Astec Double Barrel® s ich multitryskovým napeňovacím zariadením. Tento systém sa dá dosiahnuť i úpravou už existujúcich obalovní a to inštaláciou peniča a nádrže s vodou



Obrázok 3.7 Double Barrel® Green obalovňa [26]

Asfaltové spojivo prúdi cez sériu šiestich peniacich komôr s vodnými tryskami a vytvára dôkladne premiešanú asfaltovú penu. Voda sa do systému dostáva pomocou piestového čerpadla z nekorodujúcich vodných nádrží a umožňuje presné dávkovanie vody (5,3 % / t zmesi).

Pri výrobe nevznikajú žiadne výpary, pretože asfalt nikdy nie je zohriaty nad teplotu varu. DBG systém znižuje spotrebu paliva a umožňuje i pridanie R- materiálov. Vozovky dosahujú väčšiu životnosť vďaka menšej oxidácii zmesi a kvalitnom zhutnení. Prvý testovací úsek uskutočnili v apríli 2007 – 300 ton mixu s 30 % RAP o teplote 130 °C. Výsledky testov ukázali 10 % redukciu CO₂, CO a NO_x; 24 % zníženie spotreby energie. Pevnosť v ťahu neukázala žiaden negatívny vplyv na odolnosť proti vode alebo vlhkosti. [26] [27] [28]

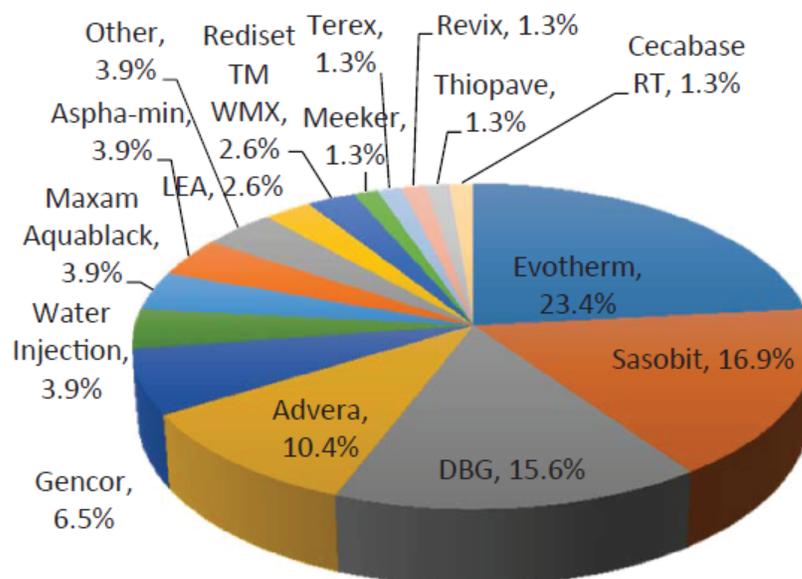


Obrázok 3.8 Napeňovacie zariadenie DBG [26]

V rokoch 2005 až 2012 testovali v rámci NCHRP projektu sedemnásť WMA technológií (na vozovkách s aspoň 4 – 10 ročnou prevádzkovou dobou. Každý z projektov mal aj kontrolný úsek HMA na porovnanie. Najrozšírenejším spôsobom výroby WMA boli peniace technológie (až 53,2 %). Z konkrétnych technológií to boli Evotherm™ (chemické prísady) a Sasobit® (organické prísady). Ďalej peniace technológie ako Double Barrel Green (DBG) a Advera® (syntetický zeolit) vid' Graf 4.1. [29]

Horúce a teplé asfaltové zmesi vychádzajú vo výsledkoch rovnako a nie sú medzi nimi veľké rozdiely. Boli nájdené (vo WMA aj HMA) priečne praskliny na povrchu vozoviek starších ako 4 roky, pravdepodobne zapríčinené kombináciou tepelného a reflexného praskania. Chemické a peniace WMA sa ukázali ako odolnejšie voči starnutiu a vzniku prasklín ako vozovky s použitím organických prísad. Vznik pozdĺžnych prasklín bol pozorovaný taktiež po 4 rokoch a organické WMA preukázali voči nim horšiu odolnosť. Všetky zmesi (HMA a WMA) majú

porovnateľnú odolnosť voči vyjazdeniu koľají a neboli nájdené žiadne známky poškodenia vlhkosťou.



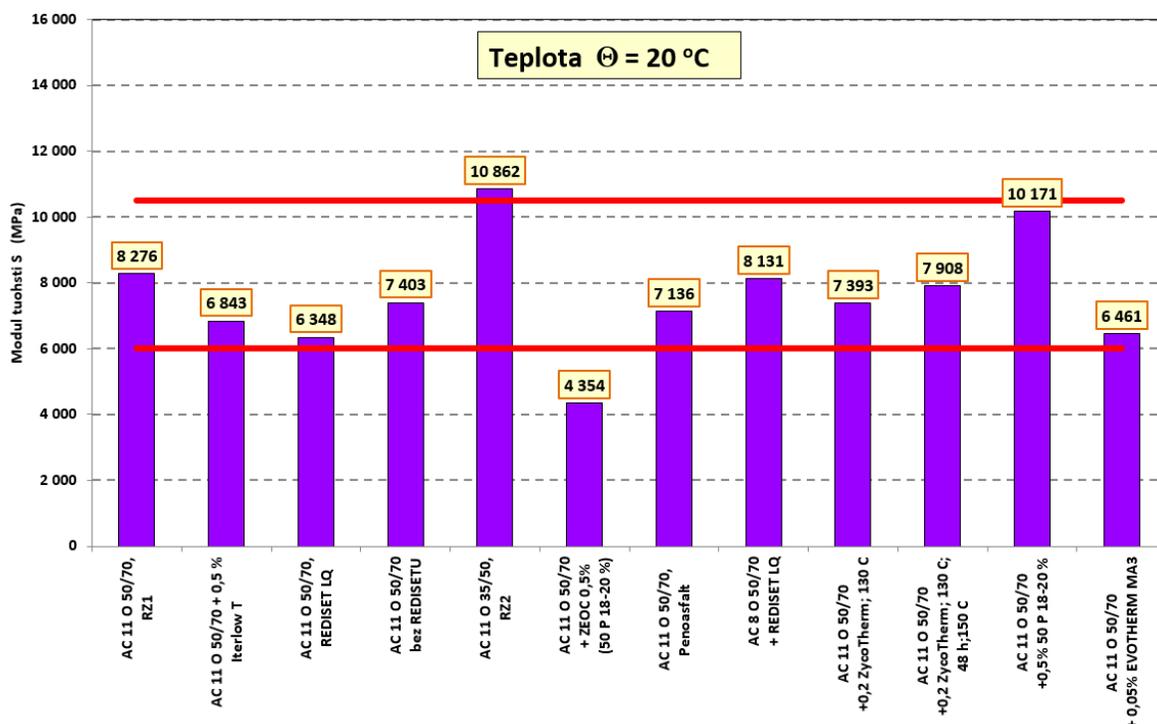
Graf 4.1 Rozdelenie technológií WMA na testovaných úsekoch v USA v rokoch 2005 – 2012 [29]

3.3.6 SLOVENSKO

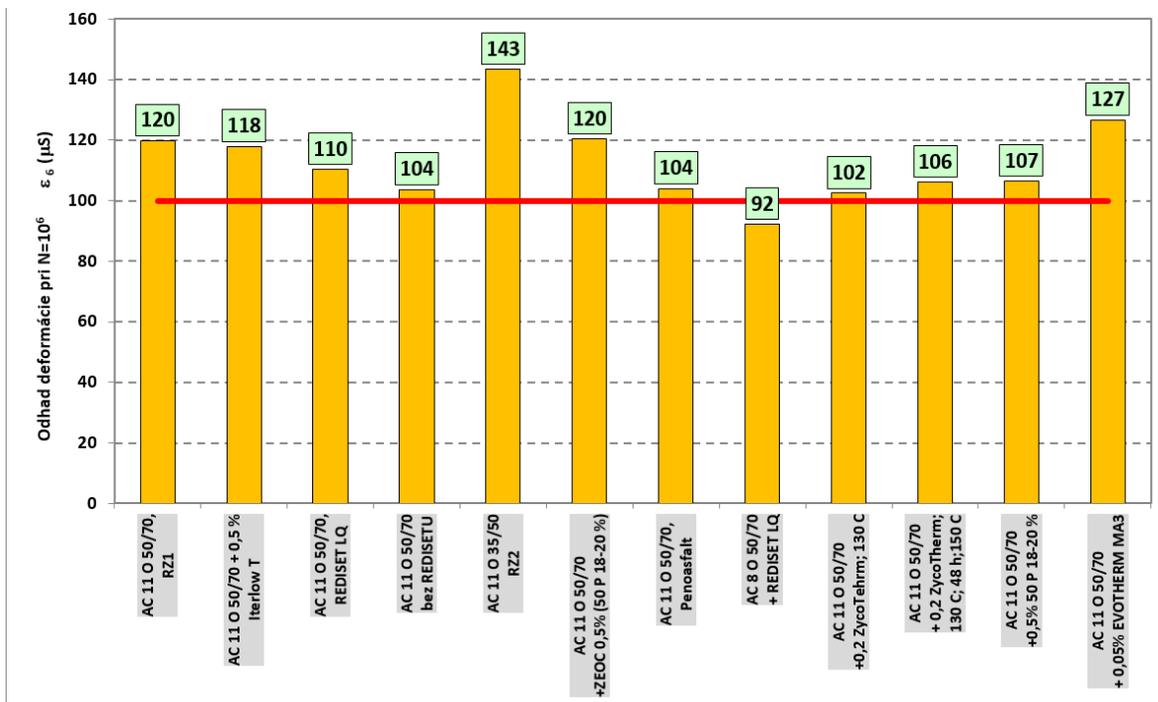
Na Slovensku sa v roku 2013 spustil projekt s názvom „Asfaltové zmesi s nižšou energetickou náročnosťou a s menšou záťažou pre životné prostredie“ pod záštitou spoločnosti VUIS – CESTY, spol. s r. o.. Cieľom projektu bolo hlavne výber vhodných technológií pre tamajšie podmienky a ich laboratórne a experimentálne zhodnotenie. Testovali asfaltový betón (AC 11 50/70 II) s použitím komerčných prísad (Rediset LQ, Evotherm MA3), prírodného zeolitu a aj technológiu penoasfaltu.

Po overení empirických a funkčných vlastností v laboratórnych podmienkach zhodnotili nasledovné:

- účinnosť prísady treba preukázať dosiahnutím predpísaných parametrov (katalógové listy) všetkých sledovaných vlastností v skúške typu pre konkrétnu asfaltovú zmes
- citlivosť na vodu (ITSR) sa na overovaných prísadách podarilo udržať v požadovaných hodnotách
- modul tuhosti stanovený pre vrstvy vozovky diaľnic a rýchlostných ciest sa v takmer všetkých prípadoch podarilo dodržať
- hodnoty pomernej deformácie sú v porovnaní so štandardnými asfaltovými zmesami o niečo nižšie
- najlepšie výsledky s prísadami so zeolitom boli tie s vyšším obsahom vody (18 - 20 %)



Graf 4.2 Modul tuhosti asfaltovej zmesi v závislosti od prísady [30]



Graf 4.3 Hodnota pomernej deformácie v závislosti na prísade [30]

Po vyhodnotení poznatkov z overovania vlastností, výroby a spracovania, vyrobených technológiou penoasfaltu skonštatovali:

- technológia si vyžaduje použitie spoľahlivého speňovacieho zariadenia, ktoré musí byť správne začlenené do technologickej linky
- na kontrolu dávkovania vody treba inštalovať merač a pravidelne kontrolovať jej spotrebu
- výsledné parametre asfaltových zmesí vyrobených technológiou penoasfaltu sú rovnocenné so zmesami vyrobenými klasickou metódou

Vplyv na životné prostredie sa hodnotí podľa množstva emisií a spotrebovanej energie. Na Slovensku sa najviac používajú ako vykurovacie médiá: zemný plyn (ZP), skvapalnený ropný plyn (LPG) a ľahký vykurovací olej (LVO). Cenovo najvýhodnejšie sú plynné médiá a LPG. Na výrobu asfaltovej zmesi typu AC

s spotrebuje 350 až 460 MJ/t čo predstavuje cca 6€/t. Pri použití technológie teplých asfaltových zmesí môžeme hovoriť o úspore 15 – 35 %, tj. 1 až 2 €/t. Z hľadiska vyprodukovaných emisií je najvýhodnejší LPG, ktorý vyprodukuje menej ako 20 kg CO₂ na tonu zmesi. Zemný plyn a ľahký vykurovací olej naberá hodnoty až 30 kg/t. Výsledky meraní dostatočne nepreukázali úspory a navrhujú dlhodobejšie merania vo viacerých výrobných. [30]

Začiatkom roka 2017 na Slovensku prijali nové technicko-kvalitatívne podmienky pre výrobu nízkoteplotných asfaltových zmesí (NAZ=WMA) TKP 41, ktoré presne definovali možnosť použitia prísad a penoasfaltu na výrobu teplých asfaltových zmesí. Doposiaľ termín NAZ nebol nikde definovaný a regulovaný, čo z pohľadu verejných zákaziek bol problém a technológie sa nemohli v praxi uplatňovať. [4]

Priekopníkom WMA technológie na Slovensku (aj v Čechách) je rozhodne nadnárodná spoločnosť COLAS, ktorá má patentovo chránenú vlastnú zostavu na penenie asfaltu vodou. Od roku 2014 pracuje na zdokonalení technológie penoasfaltu, pri prvých pokusoch dávkovali vodu na 2,5 % a po sérií pokusov znížili dávku na 1,5 % pretože im to spôsobovalo technologické problémy; vodná para pri dávkovaní zložiek do miešačky unikala a kondenzovala, na kondenzát sa usadzoval prach zo sypkých materiálov a upchával potrubia. V roku 2016, po vyladení systému a znížení dávky vody, vyprodukovali 26500 t penoasfaltu. [31]

Tabuľka 3.3 Zoznam WMA peniacich technológií používaných v Európe v roku 2007 [11]

WMA Process	Company	Additive	Production Temperature (at plant) °C	Use Reported in	Approximate Total Tonnage Produced to Date
FOAMING PROCESSES (continued)					
LT Asphalt (foamed asphalt with addition of hygroscopic filler to maintain workability)	Nynas	Yes, added 0.5–1.0% of a hygroscopic filler	90 °C (194 °F)	Netherlands and Italy	Unknown
WAM-Foam (soft binder coating followed by foamed hard binder)	Kolo Veidekke, Shell Bitumen (patent rights worldwide, except U.S.), and BP (patent rights U.S.)	Not necessary; a surfactant may be added to aid in the foaming of certain binders and an antistripping agent may be added to the soft binder	110–120 °C (230–248 °F)	France and Norway, also Canada, Italy, Luxembourg, Netherlands, Sweden, Switzerland, and United Kingdom	>60,000 tons
Aspha-min (zeolite)	Eurovia and MHI	Yes, about 0.3% by total weight of mix	Varies, 20–30 °C (36–54 °F) drop from HMA. German guideline recommends 130–170 °C (266–338 °F), depending on binder stiffness	France, Germany, and U.S.	About 300,000 tons
ECOMAC (cold mix warmed before laying)	Screg	Yes (unknown type/quantity)	Placed at about 45 °C (113 °F)	France	Some trials
LEA, also EBE and EBT (foaming from portion of aggregate fraction)	LEACO, Fairco, and Eiffage Travaux Publics	Yes, 0.2–0.5% by weight of binder of a coating and adhesion agent	<100 °C (212 °F)	France, Spain, Italy, and U.S.	>100,000 tons
LEAB® (direct foam with binder additive)	BAM	Yes, added at 0.1% by weight of binder to stabilize foam, aid in coating, and promote adhesion	90 °C (194 °F)	Netherlands	Seven commercial projects

4 SKÚSENOSTI S PENOASFALTOM V ČESKEJ REPUBLIKE

Prvú skúsenosť s teplými asfaltovými zmesami v Čechách získala firma Froněk, spol. s.r.o., ktorá odskúšala technológiu penoasfaltu v roku 2013 na dvoch úsekoch; II/235 Terešovská Huť – Terešov a II/233 Prašný újezd. V ložných vrstvách boli použité asfaltové spojivá gradácie 70/100 s dvomi úrovňami dávkovaného množstva R – materiálu, konkrétne s 50 % a 75 % hmotnosti výslednej zmesi. V obrusných vrstvách boli použité asfaltové zmesi typu ACO 11+ so spojivom 50/70 vo variantoch 20 % a 40 % R – materiálu. Návrhy zmesí boli vypracované na ČVUT v Prahe.



Obrázok 4.1 Jadrové vývrty ložných vrstiev s penoasfaltom [32]

Asfaltová zmes bola vyrobená na obalovni Brant, ktorá je vybavená paralelným sušiacim bubnom na R – materiál a umožňuje pridávať do zmesi vyšší podiel recyklátu. Vedľa miešačky na obalovni je nainštalované aj zariadenie na výrobu penoasfaltu. Voda je privádzaná potrubím cez vyrovnávaciu nádržku a čerpadlom dávkovaná do vodorovného miešacieho valca, do ktorého je zároveň privádzaný aj asfalt a vzniká asfaltová pena. Tá je ďalej vedená do miešačky, kde sa

premiesi s kamenivom a recyklátom. Asfaltová zmes po dopravení na stavbu (35km) mala teplotu 115 °C.



Obrázok 4.2 Zariadenie na výrobu penoasfaltuu na obalovni Brant firmy Froněk [32]

Po desiatich mesiacoch bola uskutočnená vizuálna kontrola prevedených vrstiev. Stav bol veľmi dobrý, bez porúch a lokálnych segregácií, výška vrstiev odpovedala požiadavkám projektu. Zmes bola uzavretá, s dobrou makrotextúrou povrchu. [32]

V roku 2013 firma Eurovia pri stavbe tunelového komplexu Blanka v Prahe z dôvodu obmedzeného vetrania a zachovania bezpečia pracovného prostredia pre pracovníkov, bola nutená znížiť množstvo výparov a exhalácií počas pokládky. Využili technológiu NAZ (=WMA) s použitím organických prísad, konkrétne Evotherm ® MA3, čím znížili teplotu asfaltovej zmesi o 30 °C a množstvo exhalácií o polovicu. [33]

Koncom roka 2016 spoločnosť Colas uskutočnila pokusnú výrobu malého množstva penoasfaltu pre pokládku obrusnej a ložnej vrstvy na miestnej komunikácii v obci Olbramkostel. Laboratórium na VUT v Brne otestovalo zmesi ACO 11 a ACP 16 vo verzii klasickej horúcej asfaltovej zmesi a penoasfaltu v dvoch



Obrázok 4.3 Pokládka NAZ v tuneli Blanka [33]

skúšobných teplotách $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obe zmesi dosiahli rovnakých hodnôt modulu tuhosti. Asfaltová pena však obsahovala nízke množstvo vody. [34] [35]

V októbri 2017 sa uskutočnili ďalšie skúšky penoasfaltu v Čenkove, obsah vody bol 1,5 – 2,0 % a výrobné teploty $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $155\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri pokládke neboli pozorované žiadne problémy a spracovateľnosť zmesi bola rovnaká ako u horúcej zmesi. Pri zhutnení bolo nutné viac pojazdov valca, ale požadovanú mieru dosiahli.

Tabuľka 4.1 Modul tuhosti ACO 11 a ACP 16 pri dvoch skúšobných teplotách [34]

ACO 11						ACP 16						
Stiffness Modulus, cf CSN EN 12697-26												
-5°C	5Hz	10Hz	15 Hz	20Hz	25Hz		-5°C	5Hz	10Hz	15 Hz	20Hz	25Hz
BV	12439	12917	13244	13477	13628	Mpa	BV	12841	13176	13343	13485	13560
F	13606	14227	14534	14797	14818	Mpa	F	13489	13950	14173	14437	14658
BV = horká asf. smés F = pěna												
15°C	5Hz	10Hz	15 Hz	20Hz	25Hz		15°C	5Hz	10Hz	15 Hz	20Hz	25Hz
BV	7263	8086	8564	8926	9234	Mpa	BV	9063	9645	9997	10318	10510
F	6568	7447	7952	8364	8678	Mpa	F	8359	9124	9623	10008	10280

Odporúčania na minimálne teplotu sú 130 °C, pre bežné stavby 150 °C, a množstvo vody 1,5 %. [34]

V decembri 2017 bola v rámci diplomovej práce na Fakulte stavební, VUT v Brne, prevedená skúška stanovenia nízkoteplotných vlastností s rovnomerne riadeným poklesom teplôt (TSRST), ktorou je možné regulovať vznik mrazových trhlin. Ďalej boli stanovené moduly tuhosti a objemové hmotnosti zhutnených asfaltových zmesí štyroch asfaltových zmesí typu asfaltový betón AC z cestného asfaltu 50/70; ACO 11+ a ACP 16+, obe aj vo verziách s penoasfaltom, množstvo vody 2,5 %. Na základe výsledkov skúšok je možné konštatovať, že technológia speneného asfaltu nijak nezhoršila sledované parametre. [36]

4.1 LEGISLATÍVA

Európske výrobkové normy ČSN EN 13108 nezakazujú použitie teplých asfaltových zmesí, tzn. ani penoasfaltu. Tieto normy obsahujú požiadavky na maximálne výrobné teploty pre jednotlivé typy zmesí, minimálne teploty sú deklarované výrobcom. Ďalej v nich nájdeme ustanovenia, ako zachádzať s asfaltovými zmesami obsahujúcimi aditíva, ak takéto zmesi dosahujú ekvivalentné vlastnosti. Môžeme teda tvrdiť, že európske normy nezakazujú použitie nízkoteplotných zmesí vrátane penoasfaltovej technológie. [35]

V Českej republike sú platné dva predpisy (*technické podmienky - TP*) Ministerstva dopravy, ktoré sa týkajú penoasfaltu a teplých asfaltových zmesí:

- TP 112 – Studené pěnoasfaltové vrstvy [6]
- TP 238 – Nízkoteplotní asfaltové směsi [10]

Technické podmienky TP 112 z roku 2007 stanovujú zásady pre použitie, prevedenie a kontrolu konštrukčných vrstiev vozovky pozemných komunikácií

vrátane dočasných provizórnych trás a konštrukcií dopravných a iných plôch, nemotoristických komunikácií a spevnených krajníc z penoasfaltovej zmesi pri ich výstavbe, oprave a údržbe.

Predpis rozoznáva niekoľko termínov v súvislosti s technológiou penoasfaltu:

- studená penoasfaltová vrstva – podkladná, ložná a pípadne orbusná vrstva z penoasfaltovej zmesi
- pënoasfaltová zmes - stavebné zmes s prípadnými prísadami obalená za studena asfaltovú penou,
- asfaltová pena - špeciálnym postupom spenený ropný alebo prírodný asfalt s prípadným obsahom vhodných prísad, ktorého viskozita a povrchové napätie sú zmenené natoľko, že za studena obaľuje vlhké jemnozrnné materiály. [6]

V TP 112 sú síce uvedené informácie o technológii penoasfaltu, ale iba pre penoasfaltové zmesi za studena. V predpise je ďalej uvedené, že tieto zmesi je možné využívať bez obmedzenia len pre podkladové vrstvy, pre ložnú vrstvy len do triedy dopravného zaťaženia (V) a pre obrusnej vrstvy len pre najnižšiu triedu dopravného zaťaženia (VI). Navyše je nutné zabezpečiť povrch tejto obrusnej vrstvy náterom alebo emulznou kalovou vrstvou. Nejedná sa teda o technológiu výroby štandardných asfaltových zmesí za horúca ani o technológiu teplých asfaltových zmesí, ktoré by boli vhodné pre pokládku obrusných alebo ložných asfaltových vrstiev. Predpis zároveň nepokladá penoasfaltovú vrstvu za ekvivalent za horúca vyrábaných vrstiev.

Predbežné technické podmienky Ministerstva dopravy z roku 2012 pod označením TP 238 - Nízkoteplovní asfaltové směsi platia pre návrh, výrobu, dopravu, pokládku, inšpekciu a skúšanie nízkoteplovných asfaltových zmesí, ktoré sú

využitelné pre všetky typy asfaltových úprav aplikované v jednotlivých vrstvách konštrukcie vozovky, vrátane zmesí typu VMT definovaných v TP 151 – Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT). Nízkoteplotné asfaltové zmesi sú zmesi, ktoré sa vyrábajú a spracovávajú pri teplotách nad 100 ° C, pričom dochádza k využitiu prísad, ktoré upravujú (znižujú) viskozitu asfaltového spojiva, resp. zmesi. Oproti bežným asfaltovým zmesiam u nich možno doceliť čiastkového zníženie pracovných teplôt, spravidla v rozsahu 10 °C až 30 °C. Opísané prísady môžu v prípade nevyčerpania celého potenciálu zníženia teploty zlepšiť spracovateľnosť liateho asfaltu a mieru zhutnenia ostatných asfaltových zmesí. TP 238 uvádzajú aj niektoré základné údaje pre ich aplikáciu v konštrukciách vozoviek. Predpis popisuje technologické možnosti, ako vyrobiť teplú asfaltovú zmes použitím nízkoviskózných spojív, alebo dávkovaním organických, chemických či minerálnych prísad (napr. zeolit), neopisuje ale výrobu teplej asfaltovej zmesi za pomocou technológie penoasfaltu. [35]

ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo rešeršnou formou zhrnúť poznatky o využití technológie penoasfaltu. Keďže v Čechách táto technológia zatiaľ nie veľmi rozšírená, valná časť použitých zdrojov pochádza zo zahraničných internetových stránok výrobcov alebo inštitúcií, ktoré sa problematikou zaoberajú. Práca ponúka zhrnutie základných pojmov týkajúcich sa technológie teplých asfaltových zmesí, hlavne penoasfaltu a prehľad komerčných produktov a vedeckých poznatkov využívajúcich túto technológiu.

Teplé asfaltové zmesi sa vyrábajú pri teplotách nižších o 20 až 40 °C ako bežné horúce zmesi. Hlavnými benefitmi sú: redukcia emisií a palív, praktickosť napr. pri pokládke – vďaka nižším teplotám väčšie dojazdové vzdialenosti, možnosť využitia väčšieho množstva R - materiálu a priaznivejšie pracovné prostredie.

Štúdie ukazujú, že ak sa výrobná teplota zníži o 28 °C spotreba paliva sa zníži o 11 % a pri každom znížení o 12 °C sa minimalizujú emisie až o 50 %.

V súčasnosti existuje vyše 20 technologických postupov ako vyrobiť teplú asfaltovú zmes. Rozlišujem technológie na báze organických (Sasobit®, Asphaltan B®) alebo chemických aditív (Evotherm™) a peniace technológie – penoasfalt. Asfaltovú penu je možné vyrobiť tzv. nepriamo - využitím minerálov ako zeolit, s obsahom viazanej vody, ktorú pri vysokej teplote uvoľní a asfalt napení. Takýmito technológiami sú napr. Aspha-Min® z Nemecka a americká Advera®. Priama metóda výroby pozostáva zo vstreknutia 2 – 5 % vody do horúceho asfaltu a vyžaduje špeciálne, častokrát patentované, speňovacie zariadenia.

Väčšina technológií na výrobu penoasfaltu je akousi modifikáciou medzi týmito dvomi metódami, častokrät firmy navyše používajú špeciálne aditíva aby dosiahli požadovaných vlastností výslednej zmesi.

Francúzska LEA využíva k napneniu vlhkosť obsiahnutú v agregáte, do holandského LT-Asphalt-u sa pridáva k vode i hydrofilný filer. Nórska technológia WAM-Foam® mieša dve asfaltové spojivá s rozdielnou penetráciou (tvrdá a mäkká) a asfaltovú penu vyrába vstreknutím vody do zohriateho spojiva. Výsledná zmes má o 40 °C nižšiu teplotu a ku kamenivu je možné primiešať aj R- materiál. Rok 2012 bol pre Nórsko prelomový, čo sa týka množstva vyprodukovaných WMA, vďaka finančnej odmene od vlády vzrástlo použitie WMA za tri roky takmer 7-násobne. USA v súčasnosti produkuje zhruba 30 % celkovej výroby v podobe teplých zmesí, z toho 80% je technológiou penoasfaltu. Veľké zastúpenia na trhu má Double Barrel® Green System, ktorý nepoužíva žiadne aditíva a špeciálne spojivá, len patentované napeňovacie zariadenie a upravenú obalovňu. Výsledky ich testov preukázali 10 % redukciu emisií a 24 % úsporu paliva. V rámci amerického projektu NCHRP sa testovalo sedemnášť WMA technológií so 4 - 10 ročnou prevádzkou a výsledky boli porovnateľné s referenčným horúcimi vrstvami. Ukázalo sa, že organické prísady sú menej odolné voči starnutiu ako chemické a peniace. Všetky štúdie zahraničných i domácich výskumov potvrdili porovnateľné vlastnosti horúcich a teplých asfaltových zmesí.

V Čechách a aj na Slovensku je výroba penoasfaltu oproti zvyšku sveta stále „v plienkach“ a to aj napriek snahe nadnárodných spoločností ako Colas, ktorý pôsobí na oboch trhoch, sa nedarí technológiu penoasfaltu zaradiť do bežnej praxe. Krokom vpred bolo určite vydanie nových technických podmienok TP 238, ktoré riešia problematiku nízkoteplotných zmesí, ale nepopisujú technológiu penoasfaltu ako ekvivalentu horúcich zmesí.

K rozšírenie použitia penoasfaltu, alebo iných druhov teplých asfaltových zmesí, by mohli pomôcť ústretové kroky zo strany štátu po vzore Nórska a takisto systematický výskum (nad)národných organizácií, ktorý výrazne posunul napr. produkciu WMA v USA.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] *EUR-Lex Prístup k právu Európskej únie*. b.r. Dostupné také z: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=CELEX:22016A1019(01))
- [2] ING. JAN ZAJÍČEK – APT SERVIS, IČ.: *RECYKLACE KONSTRUKČNÍCH VRSTEV NETUHÝCH - TECHNICKÉ PODMÍNKY - TP208*. Ministerstvo dopravy - OSI, 2009, s.28. Dostupné také z:http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_208.pdf
- [3] ING. JAN ZAJÍČEK A KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, s.r.o., 2014.
- [4] DR. PETER BRIATKA, MBA,. *NÍZKOTEPLTNÉ ASFALTOVÉ ZMESI, ÚVOD K TÉME. ASB.sk - odborný stavebný portál*. 2017. Dostupné také z: <https://www.asb.sk/inzinierske-stavby/vozovky/nizkoteplotne-asfaltove-zmesi-uvod-kteme>
- [5] MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *TP 208 Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena*. b.r. Dostupné také z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_208.pdf
- [6] MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *TP 112 Studené pěnoasfaltové vrstvy*. 2007. Dostupné také z: [http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_112\(1\).pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_112(1).pdf)
- [7] ANTHONY J. KRIECH, Linda. *Comparison of worker breathing zone exposures between hot mix asphalt and*. 2011, s. 16. Dostupné také z: http://www.asphaltpavement.org/big_files/11mwmx/Papers/WM3_Osborn.pdf

- [8] ASSOCIATION, European. *The use of Warm Mix Asphalt*. ©European Asphalt Pavement Association, 2014. Dostupné také z: <http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20Promotion%20Tool/EAPA%20Position%20Paper%20-%20WMA%20-%20version%20October%202014.pdf>
- [9] CERVARICH, M. *Foaming the Asphalt: New Warm-Mix Technique Challenges Conventional Wisdom*. Lanham, Maryland, US: National Asphalt Pavement Association, 2007.
- [10] MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *TP 238 Nízkoteplotní asfaltové směsi*. 2012. Dostupné také z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_238.pdf
- [11] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, American. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. 2008. Dostupné také z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>
- [12] SLOVENSKO, WIRTGEN. b.r. Dostupné také z: <https://www.wirtgen-group.com/slovensko/sk/technologies/asphalt-production/>
- [13] WIRTGEN, . *Wirtgen - brochure - foamed bitumen*. b.r. Dostupné také z: https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_product_divisions/media_1_product_divisions_soil_stabilizers___cold_recyclers/W_brochure_Foamed-Bitumen_0116_EN.pdf
- [14] ING. PETR MONDSCHHEIN, Ph. *Recyklace vozovek - přednáška z predmetu Silniční stavby 2*. b.r. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/2842790-Recyklace-vozovek-silnicni-stavby-2.html>

- [15] KJ JENKINS, MFC. *CHARACTERISATION OF FOAMED BITUMEN*. 1999.
Dostupné také z:
<https://www.viastrade.it/letteratura/bitume/CHARACTERISATION%20OF%20FOAMED%20BITUMEN.pdf>
- [16] CSANYI, LADIS. *Foamed Asphalt in Bituminous Paving Mixtures*. Iowa, 1957.
Dostupné také z: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/160/160-002.pdf>
- [17] KHATIB, Jamal. *Sustainability of Construction Materials*. 2016, 359,360.
Dostupné také z:
https://books.google.cz/books?id=5_9JCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sk#v=onepage&q&f=false
- [18] Z. HE, W. *RESEARCH ON THE PROPERTIES OF ROAD BUILDING MATERIALS TREATED WITH FOAMED BITUMEN IN CHINA*. Shanghai, China, 2004.
Dostupné také z:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.580.7124&rep=rep1&type=pdf>
- [19] GUI-PING HE, Wing-gun. *Decay properties of the foamed bitumens*. Honkong, 2005. Dostupné také z: <https://kundoc.com/pdf-decay-properties-of-the-foamed-bitumens.html>
- [20] ALAIN ROMIER, Maurice. *Low-Energy Asphalt with Performance of Hot-Mix Asphalt*. Washington, DC, USA, 2006. Dostupné také z:
<https://docslide.net/download/link/low-energy-asphalt-with-performance-of-hot-mix-asphalt>

- [21] NYNAS, . b.r. Dostupné také z: <https://www.nynas.com/lv-LV/product-areas-solutions/bitumen-for-paving/bitumen-for-paving-applications/case-types/port/industrial-site-within-the-port-of-antwerp-belgium/>
- [22] NYNAS, . *LT-Asfalt COLD & SEMI-WARM APPLICATIONS - brochure*. b.r. Dostupné také z: [https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wpis/GB_EN_LT-Asphalt/\\$File/LT-Asphalt_GB_EN_PIS.pdf](https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wpis/GB_EN_LT-Asphalt/$File/LT-Asphalt_GB_EN_PIS.pdf)
- [23] O.R. LARSEN, Ø. *WAM FOAM ASPHALT PRODUCTION AT LOWER OPERATING TEMPERATURES AS AN ENVIRONMENTAL FRIENDLY ALTERNATIVE TO HMA*. Kolo Veidekke and Shell, 2004. Dostupné také z: <https://pdfs.semanticscholar.org/2345/2fe23484cfcf099451483ccd52300e4d336e.pdf>
- [24] NORWEGIAN ASPHALT AND ROAD CONTRACTING ASSOCIATION (FAV): VEIDEKKE INDUSTRI, Lemminkäinen. *Norwegian WMA project – Low Temperature Asphalt 2011*. 2011. Main report.
- [25] ASSOCIATION, EAPA. *The use of Warm Mix Asphalt, EAPA – Position Paper*. 2014.
- [26] *Double Barrel green WMA process*. b.r. Dostupné také z: http://www.warmmixasphalt.org/submissions/55_20080101_Norm%20Smith%20-%20Astec%20Double%20Barrel%20Green.pdf
- [27] *BG Europe (UK) LTD*. b.r. Dostupné také z: <http://www.bgeuropa.co.uk/products/asphalt-plants-continuous-mix/astec-double-barrel-green-1>
- [28] BRENT MIDDLETON, M.Sc. a Bob FORFYLOW. *AN EVALUATION OF WARM MIX ASPHALT PRODUCED WITH THE DOUBLE BARREL GREEN PROCESS*. 2008.

- [29] *Long-Term Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies*. 2017. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Research report 843. National Academy of Sciences.
- [30] ING. LUBOMÍR POLAKOVIČ, CSc.,. *Asfaltové zmesi s nižšou energetickou náročnosťou a s menšou záťažou pre životne prostredie. Magazín Stroje a Mechanizácia*. 2017. Dostupné také z: <https://www.strojeamechanizacia.sk/clanky/766/asfaltove-zmesi-s-nizsou-energetickou-narocnostou-a-s-mensou-zatazou-pre-zivotne-prostredie>
- [31] DR. PETER BRIATKA, MBA,. *NÍZKOTEPLTNÉ ASFALTOVÉ ZMESI, SKÚSENOSTI Z VÝROBY. ASB.sk odborný stavebný portál*. 2017. Dostupné také z: https://www.asb.sk/inziniarske-stavby/vozovky/nizkoteplotne-asfaltove-zmesi-skusenosti-z-vyroby?from=rss&utm_content=new_articles
- [32] *Příspěvky na nové technologie 2015*. 2015. Dostupné také z: http://www.sfdi.cz/soubory/obrazky-clanky/poskytovani-prispevku/projektove-cinnosti/2015_sfdi_nove_technologie_brozura.pdf
- [33] CVACH, Ing. *Stavební a investorské noviny*. 2013. Dostupné také z: <http://tvstav.cz/clanek/2817-tunel-blanka-ma-jiz-asfaltovy-povrch>
- [34] JEAN PAUL DUPUY, Xavier. *PĚNOASFALTOVÉ SMĚSI - prezentácia na Konferencii asfaltových vozoviek 2017*. 2017. Dostupné také z: http://www.asfaltove-vozovky.cz/av2017/data/prezentace/t1-8_dupuy.pdf
- [35] PETR HÝZL, Ondřej. *Rešerše na stav techniky pro využití technologie pěnoasfaltu při výrobě asfaltových směsí za horka*. Brno, 2017. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.
- [36] VENCLÍKOVÁ, Bc. *Využití pěnoasfaltu v asfaltových směsí, diplomová práce*. 2018.

- [37] GROUP, Wirtgen. b.r. Dostupné také z:
<https://www.wirtgen.de/en/technologies/cold-recycling/schaumbitumen.php>
- [38] GROUP), Andreas. *Crp.pt Portuguese Road Center (CRP)*. 1999. Dostupné také z:
http://www.crp.pt/docs/A18S104-6_2_AndreasMarquardt.pdf
- [39] GROUP, Wirtgen. *Laboratory-scale foamed bitumen plant WLB 10 - brochure*. b.r. Dostupné také z: https://media.wirtgen-group.com/media/06_sasww/_local_content/wirtgen_america/infomaterial_9/informative_material___out_of_production_/out_of_production_wirtgen_/p_wlb_10_e_old.pdf
- [40] MASTNÝ, Bc. *Vliv syntetických vosků a rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s R-materiálem (Diplomová práce)*. 2017. Dostupné také z:
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68060/F1-DP-2017-Mastny-Jan-381423.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [41] *Wikipedia.cz*.
Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fini%C5%A1er>