



## Zlepšená environmentální stopa a trvanlivost vozovek při použití vápenného hydrátu v asfaltových směsích vyráběných za horka.

Co-Authors & Presenter:

Shtiza A., Denayer C., Lesueur D., Ritter H-J., Schlegel T., Pavlik J.

Please use the following to refer to the paper:

Shtiza A., Denayer C., Lesueur D., Ritter H-J., Schlegel T., Pavlik J. 2017. Zlepšená environmentální stopa a trvanlivost vozovek při použití vápenného hydrátu v asfaltových směsích vyráběných za horka. (Assessing improved environmental footprint and road durability using hydrated lime in hot mix asphalt). Conference Asphalt Pavements. 28-29 November 2017 in České Budějovice, (Czech Republic). Presentation and full paper In Czech language. Pp. 7.



**EuLA**, the European Lime Association, represents about 95% of the European lime production through its 21 national member associations. The European lime sector operates around 600 lime kilns in the EU, producing in total around 28,4 million tons of lime and dolime; and contributing around € 2,5 billion to Europe's GDP.

Take a look at our website: [www.eula.eu](http://www.eula.eu)



## **4.2 ZLEPŠENÁ ENVIRONMENTÁLNÍ STOPA A TRVANLIVOST VOZOVEK PŘI POUŽITÍ VÁPENNÉHO HYDRÁTU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH VYRÁBĚNÝCH ZA HORKA**

### **IMPROVED ENVIRONMENTAL FOOTPRINT AND ROAD DURABILITY USING HYDRATED LIME IN HOT MIX ASPHALT (HMA)**

**A. SHTIZA, European Lime Association (EuLA), Brussels, Belgie/Belgium**  
**C. DENAYER, Carmeuse Coordination Centre, Louvain-la-Neuve, Belgie/Belgium**  
**D. LESUEUR, Lhoist Southern Europe, Paris, Francie/France**  
**H-J RITTER, Federation of German Lime Industry (BVK), Cologne, Německo/Germany**  
**T. SCHLEGEL, EESAC, Duingt, Francie/France**  
**J. PAVLIK, Lhoist Central Europe, Tmaň u Berouna, Česká republika/Czech Republic**

#### **Anotace**

Je doloženo, že přidání vápenného hydrátu do asfaltových směsí vyráběných za horka (HMA) vede k několika zlepšením v celkové výkonnosti vozovky (větší odolnost proti působení vody, mrazu a trvalým deformacím, rovněž působí jako přísada proti stárnutí asfaltu). Výsledkem je prodloužení životnosti asfaltových vozovek. Byla provedena analýza životního cyklu porovnávající dopady na životní prostředí podle norem ISO 14040-14044 u běžné asfaltové směsi (HMA) a směsi modifikované 1,5 % vápenného hydrátu, která byla ověřena externím hodnotitelem. Studie ukázala, že díky použití vápenného hydrátu ve směsi do obrusné vrstvy se životnost prodloužila o 25 %. To vede ke snížení environmentální stopy během životnosti celé vozovky (50 let) ve všech kategoriích dopadu na životní prostředí.

V případě, že se bere v potaz pouze fáze výstavby vozovky, vykazují asfaltové směsi s použitím vápenného hydrátu o 19 % vyšší úroveň emisí skleníkových plynů (GHG), než v případě klasických asfaltových směsí. Naopak při uvažování celého životního cyklu s prodlouženou životností jsou emise skleníkových plynů sníženy o 23 % při použití modifikované asfaltové směsi. To je významný přínos. Je proto velmi důležité, aby se provádělo hodnocení vozovek pro celý životní cyklus, má-li být získán celkový (holistický) obrázek dopadu na životní prostředí. Směs modifikovaná vápenným hydrátem vychází při hodnocení pro období 50 let jako lacinější (o 30 %). Dále je třeba připomenout, že každý krok údržby, který není nutné realizovat, zabraňuje vzniku dopravních kongescí (zácp), způsobených prováděním údržby. Tímto způsobem je použití vápenného hydrátu udržitelným a trvanlivějším řešením pro moderní vozovky. Výsledky této studie jsou též v souladu s nedávnými iniciativami EU týkajícími se efektivního využívání surovin a udržitelné výstavby, které vyžadují optimalizaci dostupných finančních a surovinových zdrojů.

#### **Abstract**

The evidence shows that adding hydrated lime to Hot Mix Asphalt (HMA) creates multiple benefits in the overall road performance (increased moisture sensitivity resistance, frost and rutting resistance, as well as an anti-aging agent for bitumen) and results in the extension of life span of asphalt pavements. A life cycle assessment (LCA) study comparing the environmental impact of the conventional Hot Mixed Asphalt (HMA) versus modified HMA (with 1.5% of hydrated lime) was carried out in line with ISO 14040-14044 standards and was validated by an external critical reviewer. The study shows that thanks to the use of hydrated lime in HMA the wearing course durability is extended by 25%, which leads to a decrease in the overall environmental footprint over the lifetime of a road (50 years) for all environmental impact categories.

If only road construction is considered, the conclusion would be that modified HMA has 19% higher GHG emissions compared to classical HMA. But once the full life cycle of the pavement is considered, with the improved durability also accounted for, then GHG are reduced by 23% in favour of modified HMA resulting in significant positive impacts. Therefore, it is very important that road pavements are



evaluated over their whole life cycle if a holistic environmental picture is to be assessed. The modified HMA is the cheaper solution (by almost 30%) over 50 years. Moreover, it is worth reminding that each maintenance step avoided prevents the formation of traffic jams created by the maintenance works. This makes hydrated lime a sustainable and durable solution for better pavements. The conclusions of this study are in line with the recent EU initiatives on resource efficiency and sustainable construction, which require optimising the available financial and raw materials resources.

## Úvod

Vápno se průmyslově vyrábí z vápence. Přírodní vápence, které jsou složeny téměř výlučně z uhličitanu vápenatého  $\text{CaCO}_3$  se přeměňují tepelným rozkladem na oxid vápenatý  $\text{CaO}$  (nehašené vápno). Z něho se po styku s vodou vyrábí vápenný hydrát (hašené vápno). To je suchý prášek složený z hydroxidu vápenatého  $\text{Ca(OH)}_2$ . Vápenné výrobky mají univerzální použití. Uplatňují se v řadě různých oborů například v zemědělství, ochraně životního prostředí, stavebnictví atd.

Je známo, že vápenný hydrát v asfaltových směsích vyráběných za horka má několik příznivých účinků na celkové vlastnosti vozovky (zvyšuje odolnost vůči vodě a mrazu, zpomaluje stárnutí asfaltu). To vede k prodloužení životnosti vozovek. Evropský svaz výrobců vápna (EuLA) provedl analýzu životního cyklu (LCA), ve které porovnával dopad na životní prostředí po dobu životnosti vozovky u klasické asfaltové směsi vyrobené za horka (HMA) se směsí upravenou 1,5 % vápenného hydrátu (Schlegel et al., 2012; 2016).

Vápenný hydrát je znám jako přísada do asfaltových směsí již od konce 19. století, v USA již od počátků silničního stavitelství. Působení vápenného hydrátu na asfaltové směsi bylo v USA objasněno v sedmdesátých letech minulého století. Souviselo to částečně s tím, že během ropné krize v roce 1973 došlo obecně k poklesu kvality asfaltů a účinky vlhkosti a mrazu se staly v té době jednou z nejdůležitějších příčin poruch na asfaltových vozovkách. Vápenný hydrát byl odzkoušen a prokázalo se, že je to nejúčinnější přísada pro zvýšení odolnosti proti vodě a mrazu, zpomalení stárnutí asfaltu a zlepšení funkčních vlastností asfaltových směsí (odolnost proti tvorbě trvalých deformací, únavě a vzniku trhlin vlivem změn teplot). Tím se prodlužuje životnost vozovek. Státní správa v USA odhadovala na základě zkušeností, že přidání 1 – 1,5 % vápenného hydrátu (vztaženo k hmotnosti suchého kameniva) vedlo ke zvýšení životnosti asfaltových směsí od 2 do 10 let nebo o 20 – 50 %. Pro tyto příznivé účinky je nyní vápenný hydrát předepisován v mnoha amerických státech. Odhaduje se, že asi 10 % asfaltových směsí vyráběných v USA obsahuje vápenný hydrát.

Od roku 1980 byl vápenný hydrát užíván stále více v mnoha evropských zemích i v jiných částech světa.

To bylo doloženo v rozsáhlé rešerši literatury Lesueur (2011). Nárůst celkového dopravního zatížení, časté dopravní zácpy, velká hustota obyvatel, nedostatek místa pro výstavbu nových silnic a obavy o životní prostředí, které z toho vyplývaly, vedly k tomu, že evropské instituce a země upravily své návrhové metody a praxi v hospodaření s vozovkami s přihlédnutím k Udržitelnému zadávání veřejných zakázek (Green Public Procurement - GPP) v silničním stavitelství (EC, 2010 a; b). Nové iniciativy týkající se nerostných surovin, principy udržitelnosti a finanční omezení vyžadují optimalizaci využívání dostupných nerostných surovin, finančních a pracovních zdrojů.

Holandsko je jedinou evropskou zemí, ve které je v některých asfaltových směsích vyráběných za horka používání vápenného hydrátu povinné. Používá se asi v 7 % všech asfaltových směsí. Podle podrobné rešerše literatury zpracované Evropským svazem výrobců vápna (EuLA) je to v ostatních evropských zemích většinou méně než 1 % (Lesueur, 2011; Lesueur et al, 2013). Například soukromá společnost SANEF, která je koncesionářem dálnic v severní Francii, v současné době předepisuje použití vápenného hydrátu do asfaltových směsí pro obrusné vrstvy na síti dálnic, které spravuje. Zjistila, že asfaltová směs modifikovaná vápenným hydrátem má o 20 – 25 % delší životnost. Podobná pozorování v Holandsku vedla k tomu, že vápenný hydrát je předepsán pro asfaltové drenážní koberce, které jsou nyní na 70 % silniční sítě v zemi. Výsledkem těchto národních iniciativ je, že použití vápenného hydrátu v asfaltových směsích roste ve většině evropských zemí, zejména v Rakousku, Dánsku, Francii, Německu, Holandsku, Polsku, Velké Británii a Švýcarsku. Je pravděpodobné, že pro své výhody bude používání vápenného hydrátu v příštích letech v Evropě dále růst.



Cílem této analýzy životního cyklu, vypracované EuLA, je posoudit a porovnat environmentální stopu klasické asfaltové směsi vyrobené za horka (bez vápenného hydrátu) se směsí upravenou (1,5 % vápenného hydrátu) během celého životního cyklu vozovky. Studie byla provedena v souladu s požadavky norem ISO 14040-14044 (ISO 14040-14044, 2006 a; b), aby se zajistily požadavky na konsistentní a relevantní kvalitu dat.

## Metodika

Předmětem studie je výpočet environmentální stopy klasické asfaltové směsi (bez vápenného hydrátu) a směsi upravené 1,5 % vápenného hydrátu, jak je ukázáno v tabulce 1. Hranice systému posuzování životního cyklu LCA jsou uvažovány způsobem “od kolébky do hrobu”. Zahrnuje těžbu a dopravu surovin, výrobu a dopravu asfaltové směsi, stavbu silnice, údržbu silnice, recyklaci asfaltových směsí, konec životnosti.

**Tabulka 1: Složení klasické a upravené asfaltové směsi**

	Klasická asfaltová směs (bez vápenného hydrátu)	Upravená asfaltová směs (s vápenným hydrátem)
asfalt	5 %	5%
písek	38 %	38 %
drobné kamenivo	26 %	26 %
hrubé kamenivo	29 %	29 %
filer	2 %	0,5 %
vápenný hydrát	0 %	1,5 %

Přírodní suroviny použité pro výrobu klasické a upravené asfaltové směsi jsou stejné. Suroviny potřebné pro výrobu klasické asfaltové směsi jsou asfalt, písek, drobné kamenivo, hrubé kamenivo a filer. Do upravené směsi je přidán vápenný hydrát, jak je podrobně popsáno v [Schlegel et al \(2016\)](#). Výroba asfaltové směsi spočívá ve vysušení písku a kameniva, jejich zahřátí na 180 °C a následném smíchání všech složek (asfalt, kamenivo případně též vápenný hydrát). Podle použité technologie to může být provedeno v jednom nebo ve dvou krocích. Po vyrobení je asfaltová směs uložena do vozovky. Protože životnost obrusné vrstvy (horní vrstvy vozovky) je mnohem kratší než životnost celé vozovky, je obrusná vrstva v pravidelných intervalech vyměňována. Údaje o scénářích údržby byly převzaty z LCA provedené francouzským sdružením silničních dodavatelů USIRF, kterou provedl [Bilal et al \(2008; 2009\)](#). Podle informací silničních firem se životnost obrusné vrstvy obvykle pohybuje mezi 7 - 12 lety. Pro modelování v naší studii byla použita průměrná hodnota 10 let. Pro klasickou asfaltovou vozovku dochází při údržbě o zvýšení celkové tloušťky o 130 mm v následujících krocích

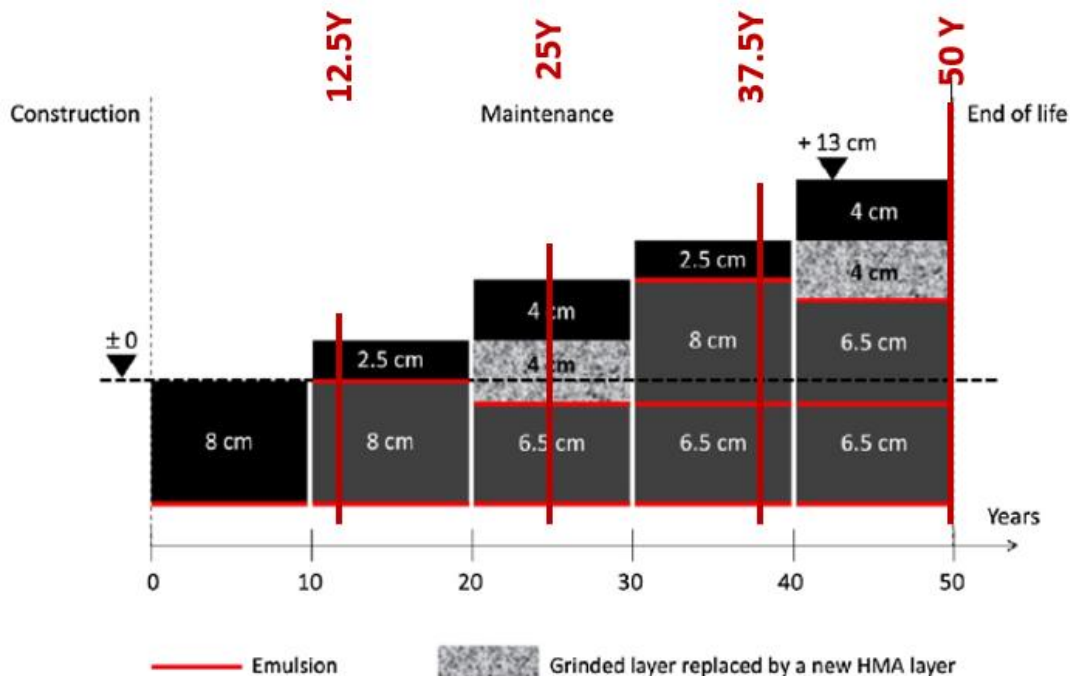
- po 10 letech: zesílení vozovky o 25 mm asfaltové směsi
- po 20 letech: frézování 40 mm a uložení 80 mm nové asfaltové vrstvy
- po 30 letech: stejný scénář jako po 10 letech
- po 40 letech: stejný scénář jako po 20 letech
- po 50 letech: konec životnosti

Při stejných principech údržby pro směs upravenou vápenným hydrátem je zesílení celkem o 90 mm v následujících krocích

- po 12,5 letech: zesílení vozovky o 25 mm asfaltové směsi
- po 25 letech: frézování 40 mm a uložení 80 mm nové asfaltové vrstvy
- po 37,5 letech: stejný scénář jako po 12,5 letech

po 50 letech: konec životnosti

Oba scénáře jsou znázorněny na obrázku 1.



Termíny v obrázku:

construction = konstrukce

maintenance = údržba

end of life = konec životnosti

years = roky

emulsion = emulze

grinded layer replaced by a new HMA layer = odfrézovaná vrstva nahrazená novou asfaltovou směsí

12,5 Y = 12,5 let

**Obrázek 1: Shrnutí jednotlivých kroků konstrukce a údržby obrusné vrstvy uvažované v LCA modelu, u klasické asfaltové směsi (bez vápenného hydrátu, roky kroků údržby vyznačeny na ose dole) a u upravené směsi (s vápenným hydrátem, roky kroků údržby vyznačeny červeně nahoře)**

Při recyklaci asfaltových směsí se předpokládala přeprava vyfrézovaného materiálu z vozovky na obalovnu a to, že tam bude R-materiál (RAP) v celém rozsahu znovu použit podle následujících dvou variant. V prvním případě se přidá do nové asfaltové směsi 50 % původního materiálu. V LCA modelu se uvažuje, že R-materiál nahradí původní asfalt, písek drobné a hrubé kamenivo i filer, které by jinak musely být obalovnou zakoupeny z jednotlivých výroben těchto materiálů. Proto je v použitém modelu započtena výroba těchto materiálů a jejich doprava, které nebylo zapotřebí realizovat.

Ve druhém scénáři se pro 50 % písku a kameniva předpokládá externí použití. V tomto případě se předpokládá, že potenciální uživatelé písku a kameniva použijí R-materiál jako náhradu, kterou by si jinak museli zakoupit z výroben mimo obalovnu. Proto se v LCA uvažuje pouze s výrobou odpovídajícího množství písku a kameniva.

LCA studie provedená EuLA je stejná jako scénář publikovaný v Bilal et al, (2008; 2009). Hlavní předpoklady posouzení LCA jsou tyto:

1. Životnost vozovky 50 let;
2. Tloušťka asfaltové vrstvy 80 mm;
3. scénář stavby a údržby podobný jako v publikované LCA studii provedené USIRF Bilal et al, (2008; 2009);
4. klasická asfaltová směs má životnost obrusné vrstvy 10 let; údržba vždy po 10 letech;

5. upravená asfaltová směs (+ 1,5% vápenného hydrátu) zvýší životnost o 25 % (kroky údržby vždy po 12,5 letech)

Funkční jednotka zvolená pro studii LCA je jeden kilometr silnice ve Francii šířky 3,5 m, tj. plocha povrchu 3500 m<sup>2</sup> a životnost vozovky 50 let (což odpovídá předpokládané životnosti). Po porovnání s podobnými studiemi LCA (University of Biberach, 2009; Sebben Paranhos, 2007), jsou předpoklady o dopravních vzdálenostech použité v této LCA souhrnně uvedeny v tabulce 2. Protože francouzská studie LCA (Bilal et al., 2008) ukázala, že v přepravních vzdálenostech složek pro výrobu asfaltových směsí je značná variabilita, byl vliv dopravních vzdáleností na výsledky LCA posouzen analýzou citlivosti s dalšími parametry.

**Tabulka 2: Hlavní předpoklady pro modelování dopravy**

Parametr	Hlavní předpoklady modelování dopravy z výroben na obalovnu							Modelování dopravy z obalovny na stavby (výstavba a údržba)	
	Asfalt	Emulze	Písek	DDK	HD K	Filer	Váp. hydrát	AC	R-materiál
Typ dopravy	Kamiony pro přepravu surovin, emisní norma Euro IV								
Max. hmotnost	27 tun								
Vytížení vozidla	100 % (plné) <sup>a</sup>							100 % <sup>b</sup>	0 % <sup>b</sup>
Vytížení vozidla	0 % (prázdné) <sup>c</sup>							0 % <sup>d</sup>	100 % <sup>d</sup>
Prům. vzdál. (km)	500	500	50	50	50	150	250	500	500
Podíl intravilán (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Podíl extravilán (%)	25	25	100	100	100	25	25	100	100
Podíl dálnice (%)	75	75	0	0	0	75	75	0	0
Obsah síry v palivu	10 ppm								
Obsah biopaliv	0 %								
Užitá databáze LCI	ELCD/GaBi 4.4								

<sup>a</sup> vytížení vozidla při cestě zpět na obalovnu asfaltových směsí

<sup>b</sup> vytížení vozidla při cestě na stavbu

<sup>c</sup> vytížení vozidla při cestě zpět z obalovny

<sup>d</sup> vytížení vozidla při cestě zpět na obalovnu

Na základě požadavků ISO 14040-14044 byl výstup ze studie doplněn analýzou citlivosti. Mezi parametry, které byly měněny, jsou:

1. Jiná sestava dat pro provedení LCA
2. Změna spotřeby energie a druhu paliva na obalovně
3. Změna dopravní vzdálenosti pro písek a kamenivo
4. Změna intervalů údržby (kratší i delší intervaly)
5. Zvýšení množství vápenného hydrátu v asfaltové směsi

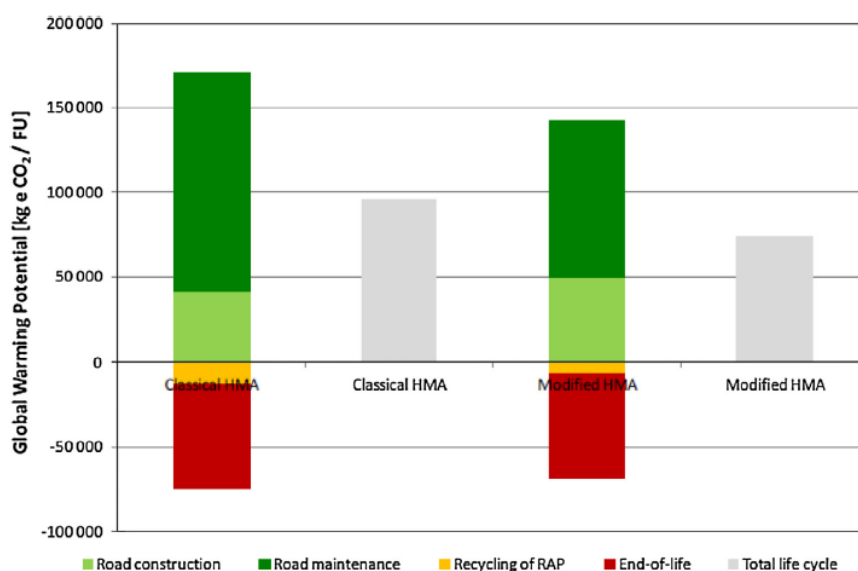
Při všech těchto změnách byl výsledek ten, že asfaltová směs s vápenným hydrátem má nižší environmentální stopu pro celé období životnosti vozovky. Podle ustanovení v normách ISO 14044 standard (ISO, 2006 a, b), prošla studie kritickým přezkoumáním externím posuzovatelem (TNO Utrecht, Netherlands).

## Závěry

Hodnocení životního cyklu podle norem ISO 14040-14044 ukázalo, že díky prodloužení životnosti vozovky o 25 % vede použití vápenného hydrátu v asfaltových směsích ke snížení celkové

environmentální stopy během životnosti vozovky (50 let). Asfaltová směs s vápenným hydrátem má za výše uvedených předpokladů menší environmentální stopu ve většině kategorií environmentálních dopadů.

Primární celková spotřeba energie je o 43 % nižší, při použití asfaltových směsí s vápenným hydrátem než u klasické asfaltové směsi. Údržba vozovky má na celkové spotřebě energie hlavní podíl. Podíly různých procesů na celkové primární spotřebě energie jsou v klesajícím pořadí významu následující: výroba asfaltu, výroba asfaltové směsi, palivo spotřebované kamiony při dopravě (suroviny, AC, R-materiál) a palivo spotřebované pro mobilní strojní zařízení (při stavbě a údržbě). Asfaltové směsi s vápenným hydrátem spotřebují méně zdrojů než klasické asfaltové směsi. Úspory jsou podobné jako u spotřeby energie. To je snadno vysvětlitelné skutečností, že fosilní paliva (zejména nafta pro výrobu asfaltu a motorová nafta, kterou spotřebují kamiony a mobilní strojní zařízení) se podílí téměř z 99 % na potenciálu vyčerpání abiotických zdrojů. Podle inventarizačních analýz životního cyklu činí emise CO<sub>2</sub> 90 až 93 % emisí skleníkových plynů. Obdobně jako u spotřeby energie, je údržba vozovky během životního cyklu složkou, která nejvíce přispívá k emisím skleníkových plynů. Pro zvolený scénář do konce životnosti vede varianta asfaltových směsí s vápenným hydrátem ke snížení emisí skleníkových plynů o 23 % než u varianty s klasickými asfaltovými směsmi. I když se použil jiný scénář celého životního cyklu bez získání kreditu (při obchodování s emisemi), byly by úspory v emisích skleníkových plynů okolo 14 %, jak je znázorněno na obrázku 2.



**Obrázek 2: Potenciál globálního oteplování [kg CO<sub>2</sub>, ekv./FU]**

Termíny v obrázku:

Road construction = stavba silnice

Road maintenance = údržba silnice

Recycling of RAP = recyklace R-materiálu

End of life = konec životnosti

Total life cycle = celkový životní cyklus

FU = funkční jednotka

Rozdíl v potenciálu acidifikace mezi dvěma řešeními je okolo 44 % ve prospěch asfaltových směsí s vápenným hydrátem. Potenciál eutrofizace prostředí je hlavně přičítán emisím NO<sub>x</sub>, které vedou k výskytu dusičnanů v povrchových vodách. Proto všechny spalovací procesy, které emitují oxidy dusíku (jak bylo již uvedeno), přispívají nepřímo k eutrofizaci. Rozdíl v potenciálu eutrofizace mezi dvěma řešeními je okolo 45 % ve prospěch asfaltových směsí s vápenným hydrátem. Pro každý krok údržby, který se nemusí realizovat, nedojde k dopravním kongescím, ke kterým by při pracích údržby došlo. Výsledky této studie byly potvrzeny externím posuzovatelem. Výsledky mají celkový přínos pro



udržitelný rozvoj v oboru stavby silnic. Výsledky této studie jsou též v souladu s nedávnými iniciativami EU týkajícími se surovin, principů udržitelnosti a finančních omezení, které vyžadují optimalizaci existujících zdrojů surovin, finančních prostředků a pracovních sil.

## Závěry

Klíčovým výstupem studie EuLA je to, že použití vápenného hydrátu v asfaltových směsích v obrusné vrstvě vede k nižší environmentální stopě u hlavních kategorií environmentálních dopadů: spotřeby energie, vyčerpávání abiotických zdrojů, změny klimatu, acidifikace ovzduší, tvorby fotochemických oxidantů, ničení stratosférické ozonové vrstvy a eutrofizace. Prodloužení doby životnosti použitím asfaltových směsí s vápenným hydrátem je dostatečné k tomu, aby bylo možné vynechat jeden krok údržby během životnosti vozovky proti řešení s klasickými asfaltovými směsmi. Navíc tento ušetřený krok údržby nevyvolá dopravní kongesci, ke které při provádění údržby dochází.

## Poděkování

Autoři děkují panu Darren Scutt za jeho pomoc při korektuře angličtiny v původním textu. Velká část tohoto článku byla publikována v časopise Journal 'Transportation Research Part D: Transport and Environment'.

## Literatura

- [1] Bilal J., Grosshenny V., Lecouls H., Le Noan C., Marcilloux J., Quéro J.-F., Verhée F., 2009. Caractéristiques environnementales des matériaux routiers – Rectificatif – analyse de Cycle de Vie des enrobés bitumineux: vers un amendement Matériaux routiers à la norme NF P01 010, Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française (USIRF) – French Trade Association of road contractors. Rev. Gén. Routes Aéroports 872 (in French).
- [2] Bilal J., Grosshenny V., Lecouls H., Le Noan C., Marcilloux J., Quéro J.-F., Verhée F., 2008. Caractéristiques environnementales des matériaux routiers – analyse de Cycle de Vie des enrobés bitumineux: vers un amendement Matériaux routiers à la norme NF P01 010 ». Rev. Gén. Routes Aéroports 865, 60–67 (in French).
- [3] European Commission, 2010a. Green Public Procurement Road Construction and Traffic Signs Background Report, Pp. 1-49. [http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/road\\_construction\\_and\\_traffic\\_signs\\_GPP\\_background\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/road_construction_and_traffic_signs_GPP_background_report.pdf).
- [4] European Commission, 2010b. Road Construction Traffic Signs Product Sheet, Pp. 1–12. [http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/road\\_construction\\_and\\_traffic\\_signs\\_GPP\\_product\\_sheet.pdf](http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/road_construction_and_traffic_signs_GPP_product_sheet.pdf).
- [5] ISO-14040, 2006a. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. International Organization of Standardization (in English). 1–12.
- [6] ISO-14044, 2006b. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. International Organization of Standardization (in English) pp. 1–46.
- [7] Lesueur, D., 2011. Hydrated Lime: A Proven Additive for Durable Asphalt Pavements – Critical Literature Review. Ed., European Lime Association (EuLA) Brussels. pp. 1–96. Available in EN, FR, DE and PL from <http://www.eula.eu/documents/hydrated-lime-proven-additive-durable-asphalt-pavements-critical-literature-review-paper>
- [8] Lesueur, D., Petit, J., Ritter, H.-J., 2013. The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review". Road Materials Pavement Design. Volume 14, Pp. 1–16.
- [9] Schlegel T., Puiatti D., Ritter H.-J., Lesueur D., Denayer C., Shtiza A. 2016. The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 48, Pp. 141–160.
- [10] Schlegel T., Puiatti D., Ritter H.-J., Lesueur D., Denayer C., Petit J., Shtiza A., 2012. Use of hydrated lime to improve environmental footprint of Hot Mix Asphalt and road durability. 18<sup>th</sup> Life Cycle Assessment Symposium Copenhagen (Denmark): Sustainability Assessment in the 21st





century Tools, Trends & Applications. 26-28 November 2012. Proceedings Pp. 74. Platform presentation.

- [11] Sebben Paranhos R., 2007. Approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobes à chaud (Ph.D. Thesis). University of Rouen, France, pp. 1–295 (in French).
- [12] University of Biberach, 2009. Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbah-nen – 2009 update – Study performed by University of Biberach for the German Asphalt Association DAV1, Pp. 1–55.