

EMISE CO₂ Z VÝROBY ŽELEZOBETONOVÝCH PRVKŮ – CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Anna Horáková, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
anna.horakova@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek se zabývá výpočtem množství emisí oxidu uhličitého CO₂ z výroby železobetonových konstrukčních prvků, protože toto hledisko se v současné době stává stále důležitějším. Tyto výpočty jsou založeny na využití dat z různých databází měrných emisí materiálů, které jsou při výrobě konstrukčních prvků použity. Databází existuje větší množství a údaje, které poskytují, se často poněkud liší. Cílem této práce je porovnat údaje z různých existujících databází, ověřit vliv zdroje a stáří použitých dat na výsledek a vybrat ta data, jejichž odchylka má na výsledek nejvýraznější vliv. Tato citlivostní analýza je základem pro tvorbu metodiky posuzování železobetonových konstrukcí z hlediska produkce emisí oxidu uhličitého.

KLÍČOVÁ SLOVA

Emise CO₂ • Environmentální vlivy • Citlivostní analýza • Železobetonové konstrukce

ABSTRACT

The paper deals with the calculation of carbon dioxide (CO₂) emissions from production of reinforced concrete structural elements. Nowadays, environmental aspects are becoming increasingly important. These calculations are based on the use of various material databases to obtain specific emissions of materials used for the structural elements production. There are plenty of databases and the specific emissions obtained for a particular material often differ depending on the database. The aim of this work is to compare data from various existing databases, verify the effect of the source and age of these data on the result and select materials whose specific emissions have the most significant effect on the result. This sensitivity analysis is the first step in the development of a methodology of evaluation of reinforced concrete structures in terms of carbon dioxide emissions.

KEYWORDS

CO₂ emissions • Environmental impacts • Sensitivity analysis • Reinforced concrete structures

1. ÚVOD

V posledních letech se otázka vlivu výstavby na životní prostředí stává stále významnější. Největší důraz je obvykle kladen na produkci emisí oxidu uhličitého CO₂. Oxid uhličitý je nejvýznamnějším skleníkovým plynem a zásadní měrou se podílí na globálním oteplování a změně klimatu. Zvyšování teploty na Zemi je obecně vnímáno jako stále větší hrozba, protože v důsledku tání ledovců a zvyšování hladin oceánů může postupně dojít k zaplavení mnoha hustě osídlených území. Proto se už několik let stupňují snahy jednotlivých zemí snižovat produkci skleníkových plynů, zejména oxidu uhličitého. Tato tendence se nevyhýbá ani stavebnímu průmyslu, i zde je patrná snaha firem snižovat emise z výstavby a provozu stavebních konstrukcí.

Co se týče metodiky pro posuzování emisí CO₂ vyprodukovaných v souvislosti se stavební činností, ve většině států žádné podrobnější postupy pro výpočet nejsou definovány. Některé státy mají k dispozici databázi, která obsahuje měrné emise CO₂ pro stavební materiály. Taková databáze je k dispozici i v ČR (Envimat) a v mnoha dalších zemích (Německo – Ökobaudat, Francie – CSTB, Norsko – EPD Norge, Dánsko – EPD Danmark). Dále existují mezinárodní databáze (Environdec, Ecoinvent). Údaje v těchto databázích však často nejsou ověřovány žádnou další institucí a obvykle také chybí informace o tom, jak byly konkrétní hodnoty získány a jak jsou tyto údaje staré. Další problém představuje skutečnost, že databáze obvykle neobsahuje všechny údaje potřebné pro výpočet produkce emisí CO₂ z výstavby určité konstrukce. Obvykle například databáze obsahují údaje pouze pro některé druhy cementu (nebo dokonce pouze průměrný údaj pro všechny druhy cementu) nebo zde chybí údaje pro přísady do betonu (např. superplastifikátory). To potom při výpočtu často vede k nutnosti kombinace více databází z různých zemí. Tento postup není z hlediska použitelnosti výsledku zcela optimální, protože měrné emise pro jednotlivé materiály jsou více či méně závislé na lokálních podmínkách, především na zdrojích energie v dané zemi. Použití údajů pocházejících z lokality, kde jsou využívány značně odlišné zdroje energie (například země s velkým podílem vodních elektráren), může vést ke zkreslení výsledku. Závislost měrných emisí materiálů na způsobu výpočtu, lokalitě a jejich zdrojích energie ilustrují

* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEng.

rozdíly v údajích z různých databází pro jeden materiál (Tabulka 1).

Pro praktické výpočty je zásadní určit, které materiály mají na celkové množství emisí z výroby konstrukce nejvýznamnější vliv a jak se změní výsledek v případě, že budou pro tyto materiály uvažovány údaje z jiné databáze, případně údaje několik let staré. Také je třeba ověřit, jaký vliv na výsledek má uvažovaný druh cementu, protože mnoho druhů v databázích měrných emisí materiálů chybí. Toto ověření má význam i vzhledem k tomu, že mnoho databází uvádí pro cement průměrnou hodnotu. Pokud by druh cementu měl na výsledek výrazný vliv, nemá použití průměrné hodnoty pro výpočet praktický smysl.

Tabulka 1: Měrné emise materiálů dle různých databází.

Materiál	Databáze			
	Envimat	Ökobaudat	Environdec	EPD Norge
Cement CEM I	0.822	-	0.860	0.726
Cement CEM II/B-M	0.705	0.720	0.599	0.582
Cement CEM II/A	0.455	0.378	-	0.430
Ocel	1.482	0.683	0.779	0.577
Štěrka	4.398E-03	2.854E-03	3.840E-03	2.750E-03
Písek	2.406E-03	2.854E-03	2.260E-03	2.340E-03

2. POSTUP ANALÝZY

Při porovnání údajů o měrných emisích z několika databází byly zjištěny poměrně velké rozdíly. Proto byly tyto hodnoty porovnány ještě s údaji od výrobců, pokud jsou k dispozici. Údaje pro cement byly zjištěny z výroční zprávy Svazu výrobců cementu ČR pro rok 2019 (Svaz výrobců cementu ČR 2019). Data pro rok 2020 ještě nejsou plně zpracovaná, tudíž kompletní zpráva pro tento rok zatím není k dispozici. Výroční zpráva uvádí celkovou produkci cementu, celkovou produkci slínku a celkové množství emisí CO₂, které vznikly při jeho výrobě. Toto množství zahrnuje emise uvolněné při přípravě surovinové moučky, výpalu slínku, mletí slínku a balení cementu. Nejsou zde zahrnuty emise vyprodukované při těžbě a dopravě surovin, ale toto množství emisí je vzhledem k celkovému množství emisí zanedbatelné. Z hlediska produkce emisí CO₂ je nejvýznamnější fází výroby výpal slínku, zanedbatelný vliv má potom ještě příprava surovinové moučky a mletí slínku (Výzkumný ústav maltovin Praha, 2015). Z údajů uvedených ve výroční zprávě byly spočteny měrné emise CO₂ pro jednotkové množství cementu a pro jednotkové množství slínku.

Emise vznikající při výrobě jednotkového množství slínku byly dále použity pro výpočet měrných emisí jednotlivých druhů cementu. Tento výpočet vycházel z definovaného složení jednotlivých druhů cementu (Výzkumný ústav maltovin Praha, 2015). Základem byl vždy obsah slínku, protože podíl ostatních složek na produkci emisí CO₂ byl oproti slínku velmi malý. Pro druhotné suroviny, jako

je popílek, struska nebo mikrosilika, byly uvažovány pouze emise související s jejich případným mletím. Tyto emise byly spočteny na základě přibližné spotřeby energie (Dvořák et al. 2017). Podobné hodnoty pro spotřebu energie při mletí surovin byly uvedeny i v jiných zdrojích, proto tento údaj nebyl blíže analyzován. Spotřeba energie byla potom přepočtena na produkci emisí CO₂ na základě emisního faktoru pro elektřinu (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2021). Sečtením měrných emisí pro jednotlivé složky cementu byla získána hodnota měrných emisí pro daný druh cementu.

Měrné emise pro ocel byly stanoveny dle výroční zprávy pro udržitelný rozvoj ocelárny ArcelorMittal Ostrava. Použita byla data z roku 2018, protože novější nejsou k dispozici. Dle starších výročních zpráv se však v řádu jednotek let měrné emise příliš neměnily, proto lze data považovat za aktuální.

Pro ověření vlivu různých faktorů výpočtu na výsledek byly uvažovány tři železobetonové konstrukční prvky – deska, trám a sloup. Parametry těchto prvků jsou uvedeny v Tabulce 2 a uvažované složení betonu v Tabulce 3.

Tabulka 2: Parametry uvažovaných konstrukčních prvků.

	Rozměry	Vyztužení	Stupeň vyztužení
Deska	150 x 1000 mm	Ø 8 mm po 150 mm	0.223 %
Trám	600 x 300 mm	4 x Ø 25 mm + 2 x Ø 12 mm	1.216 %
Sloup	300 x 300 mm	4 x Ø 14 mm	0.684 %

Tabulka 3: Složení uvažovaného betonu

Složení betonu	
Cement	380 kg/m ³
Voda	190 kg/m ³
Písek	705 kg/m ³
Štěrka	1100 kg/m ³
Superplastifikátor	2 kg/m ³

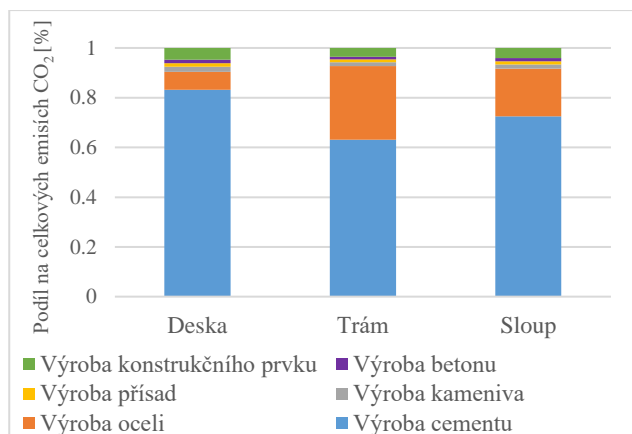
Pro nosné prvky byly záměrně zvoleny odlišné stupně vyztužení, aby bylo možno přibližně identifikovat, kdy hraje vliv oceli na celkové emise CO₂ významnou roli. Pro tyto konstrukce byly postupně počítány celkové emise CO₂ vyprodukované při jejich výrobě. Nejprve bylo spočteno, jak se na celkových emisích z výroby konstrukčního prvku podílí výroba jednotlivých materiálů a výroba samotné konstrukce (výroba monolitického betonu a doprava betonu a vyztuže do bednění). V tomto výpočtu byly uvažovány měrné emise pro beton a ocel z údajů převzatých od výrobce, pro kamenivo byla uvažována data z české databáze (Envimat), pro superplastifikátor údaje z mezinárodní databáze Environdec a pro stavební procesy údaje z německé databáze (Ökobaudat). Data o měrných emisích přísad do betonu, stejně jako data o emisích ze stavebních procesů, obecně nejsou moc dobře dostupná. Z hlediska celkového množství emisí CO₂ vyprodukovaného při výrobě konstrukce však patří k těm

méně významným položkám. Tato skutečnost tedy z praktického hlediska nepředstavuje velký problém.

Následně bylo ověřováno, jak se změní výsledky v případě uvažování různých druhů cementu, různě starých dat pro měrné emise z výroby cementu a dat pocházejících z různých databází (pro měrné emise cementu, oceli a kameniva). Na základě těchto výpočtů bylo předběžně stanoveno, jaké údaje budou muset být podrobněji ověřené pro tvorbu metodiky pro hodnocení konstrukcí z hlediska emisí oxidu uhličitého.

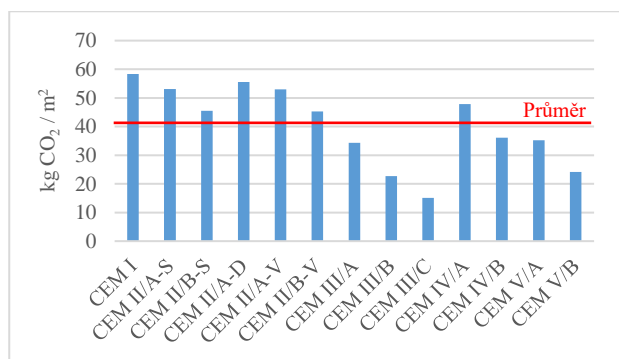
3. VÝSLEDKY

Jak se dalo očekávat, největší vliv na celkové množství emisí oxidu uhličitého má výroba cementu. Poměrně velký vliv má však také výroba oceli, zvláště u konstrukčních prvků s větším stupněm vyztužení (v tomto případě trám). Procentuální podíl jednotlivých položek na celkovém množství emisí z výroby uvažovaných konstrukčních prvků je znázorněn na Obrázku 1.



Obrázek 1: Podíl jednotlivých fází výroby na celkovém množství emisí z výroby konstrukčních prvků

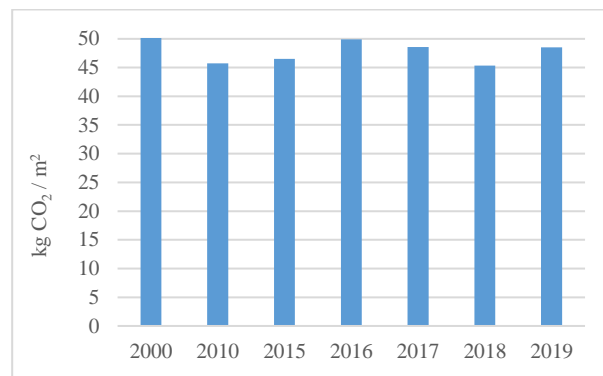
Protože výroba cementu má na výsledné množství vyprodukovaných emisí největší vliv, byly údaje o měrných emisích tohoto materiálu analyzovány podrobněji. V grafu na Obrázku 2 je znázorněno porovnání celkových emisí CO₂ vyprodukovaných při výrobě 1 m² desky při uvažování různých druhů cementu. Je zřejmé, že druh cementu má na celkovou produkci emisí značný vliv.



Obrázek 2: Závislost množství emisí CO₂ na druhu cementu

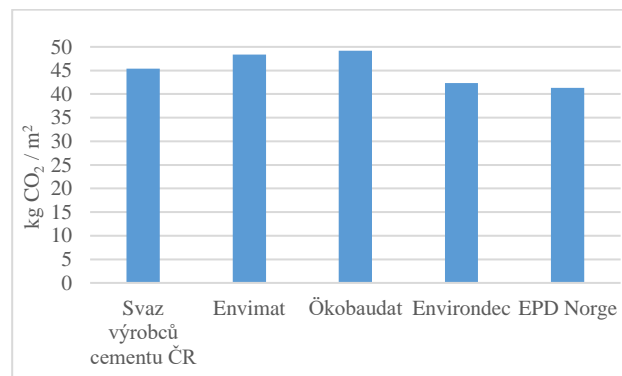
Použití průměrné hodnoty měrných emisí pro cement z libovolné databáze tedy nelze pro výpočet celkových emisí CO₂ doporučit, pokud je možno použít přesnější hodnotu. Měrné emise pro cement jsou totiž výrazně závislé na obsahu slínku, protože emise vzniklé při výrobě ostatních složek jsou oproti emisím vznikajícím při výrobě slínku prakticky zanedbatelné. Pokud by tedy pro beton s portlandským cementem byla použita průměrná hodnota měrných emisí pro cement, došlo by k podhodnocení celkových emisí vyprodukovaných při výrobě konstrukce.

Určitý vliv na výsledek má také stáří dat, která byla pro výpočet použita. Tuto závislost ilustruje Obrázek 3. Opět je zde porovnáno množství emisí vyprodukovaných při výrobě 1 m² desky. Vliv stáří dat, ze kterých výpočet vycházel, není příliš výrazný. Ovlivnění výsledku se pohybuje v menších jednotkách procent, průměrně kolem cca 2 %. Použití několik let starých dat tedy nepředstavuje pro přesnost výsledku problém. Vzhledem ke kolísání měrných emisí z výroby cementu v průběhu let by zřejmě bylo vhodné uvažovat například průměrnou hodnotu z posledních 5 let.



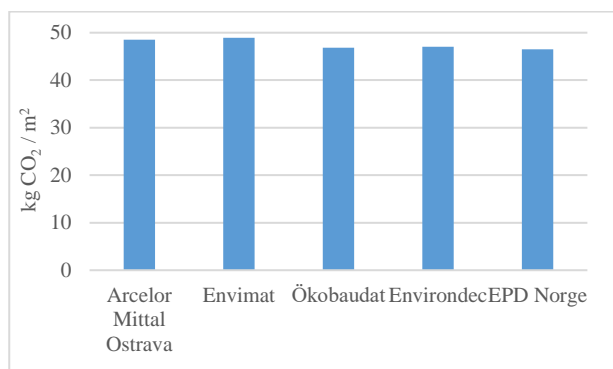
Obrázek 3: Závislost množství emisí CO₂ na stáří použitých dat pro cement

Obrázek 4 znázorňuje, jak výsledek ovlivní uvažování údajů pro měrné emise cementu z různých databází. Opět byly porovnávány výsledky pro 1 m² desky. Uvažován byl cement CEM II/B-M, protože pro tento druh cementu byly k dispozici údaje ve všech zkoumaných databázích. Zdroj dat má na výsledek větší vliv než jejich stáří. Rozdíl ve výsledku při uvažování údajů z jiné databáze se pohybuje cca mezi 6 a 9 %.



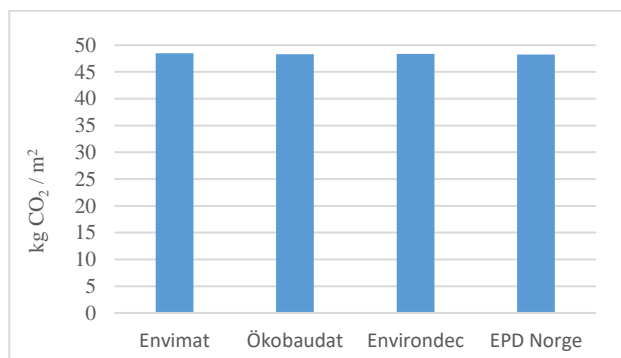
Obrázek 4: Závislost množství emisí CO₂ na zdroji dat pro cement

Pokud porovnáme výsledek při uvažování dat převzatých od výrobců cementu a výsledek při uvažování údajů z databáze, nejmenší rozdíl vychází pro českou databázi Envimat. Největší rozdíl je potom při porovnání s norskou databází EPD Norge. Tento výsledek ilustruje vhodnost použití místní databáze, protože databáze je obvykle založena na datech pocházejících od výrobců v dané lokalitě a vychází tedy z jejího složení zdrojů energie. Toto je důležité zejména pro ty materiály, které mají na výsledné množství vyprodukovaných emisí největší vliv, v případě železobetonových konstrukcí se jedná o cement a ocel. Závislost množství celkových vyprodukovaných emisí CO₂ na zdroji dat pro ocel je znázorněna na Obrázku 5. Zde je průměrný rozdíl ve výsledku při uvažování údajů z jiného zdroje cca 3 %. Rozdíl je menší než v případě cementu, protože stupeň vyztužení uvažované železobetonové desky je poměrně nízký.



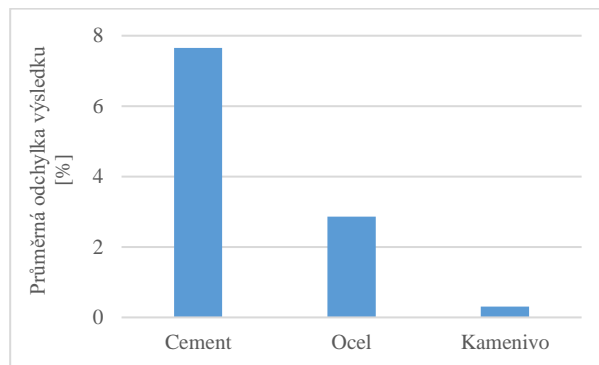
Obrázek 5: Závislost množství emisí CO₂ na zdroji dat pro ocel

Pro porovnání je na Obrázku 6 znázorněna tato závislost pro kamenivo. Protože výroba kameniva se na celkových vyprodukovaných emisích CO₂ podílí velmi málo, je vliv zdroje údajů pro kamenivo zanedbatelný. Rozdíl ve výsledku při uvažování dat z jiného zdroje činí přibližně 0.4 %.



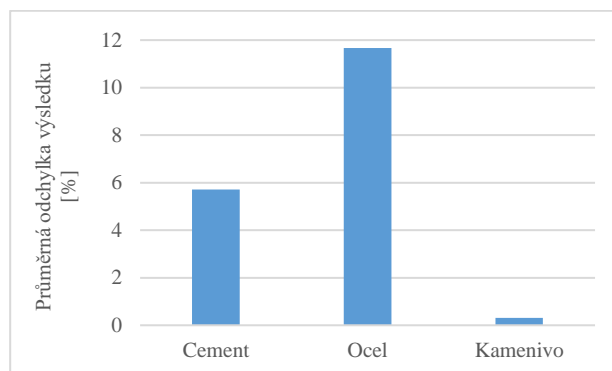
Obrázek 6: Závislost množství emisí CO₂ na zdroji dat pro kamenivo

Na Obrázku 7 je porovnán vliv zdroje dat na výsledek v případě cementu, oceli a kameniva. Porovnáván je vliv zdroje dat pro jednotlivé materiály v případě výpočtu celkového množství emisí vyprodukovaných při výrobě 1 m² železobetonové desky.



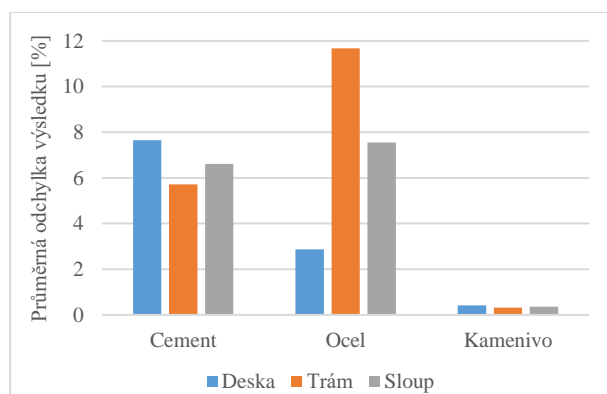
Obrázek 7: Průměrná odchylka výsledku při změně zdroje použitých dat pro jednotlivé materiály - deska

Jak moc výsledek ovlivní změna zdroje dat pro určitý materiál závisí samozřejmě na konkrétním konstrukčním prvku. V případě desky je vliv změny dat pro ocel poměrně malý v porovnání s tímto vlivem pro cement. Jinak tomu však bude v případě trámu, u kterého je uvažován výrazně větší stupeň vyztužení. Toto porovnání pro trám znázorňuje Obrázek 8.



Obrázek 8: Průměrná odchylka výsledku při změně zdroje použitých dat pro jednotlivé materiály - trám

Na Obrázku 9 je potom porovnání vlivu zdroje dat pro jednotlivé materiály v případě všech tří uvažovaných konstrukčních prvcích.



Obrázek 8: Průměrná odchylka výsledku při změně zdroje použitých dat pro jednotlivé materiály - trám

V případě sloupu je vliv zdroje dat pro ocel a cement téměř vyrovnán. Bylo dopočítáno, že v tomto případě přibližně od stupně vyztužení 0.6 % začíná převažovat vliv oceli na rozptyl výsledku. Tato hranice je samozřejmě závislá na rozptylu údajů z jednotlivých databází pro oba materiály, může však poskytnout alespoň přibližnou představu o tom, kdy začíná zdroj dat pro ocel hrát důležitější roli než zdroj dat pro cement.

4. DISKUZE

Na celkovém množství emisí CO₂ vzniklých při výrobě konstrukčního prvku se nejvýraznější měrou podílí výroba oceli a cementu. Výsledek se proto může nezanedbatelně měnit v závislosti na zdroji údajů o měrných emisích těchto materiálů. Je tedy třeba se při výpočtu soustředit na věrohodnost dat zejména v případě těchto dvou materiálů.

Především je třeba rozlišovat jednotlivé druhy cementu, protože obsah slínku v cementu hraje v celkových vyprodukovaných emisích zásadní roli. Průměrná hodnota měrných emisí pro cement, která je často v databázích k dispozici, není příliš vhodná pro použití do výpočtů. Přibližně odpovídá hodnotám pro portlandský směsný cement. Pokud by však pro konstrukční prvek byl použit jiný druh cementu, bylo by výsledné množství vyprodukovaných emisí odlišné. V této souvislosti je třeba zmínit, že druh použitého cementu má vliv na pevnostní a trvanlivostní vlastnosti výsledného betonu. Použití cementu s vyšším obsahem slínku tak může vést k redukci rozměrů nosných prvků a zároveň k nižší potřebě oprav v průběhu životnosti konstrukčního prvku. Nelze tedy jednoznačně tvrdit, že použití cementu s vyšším obsahem slínku vždy vede k nárůstu vyprodukovaných emisí CO₂ v rámci celého životního cyklu konstrukčního prvku.

Vhodné je přednostně používat lokální databáze měrných emisí materiálů, protože vycházejí ze spotřeby energie v podmínkách dané lokality. K větším nepřesnostem ve výpočtu může vést například využití databáze sestavené pro lokalitu, ve které je výrazně vyšší využití energie z vodních elektráren.

5. ZÁVĚR

Z provedené analýzy plyne, že při výpočtu množství emisí CO₂, které vzniknou při výrobě železobetonového konstrukčního prvku, je třeba nejvíce pozornosti věnovat údajům o měrných emisích cementu a oceli. Výroba těchto materiálů má totiž největší vliv na celkovou produkci emisí. Při tvorbě metodiky pro hodnocení železobetonových konstrukcí z hlediska produkce emisí CO₂ je důležité především zdůraznit potřebu rozlišování jednotlivých druhů cementu. Množství emisí z výroby cementu je totiž zásadním způsobem ovlivněno obsahem slínku v cementu. Obecně je vhodné používat, pokud možno, údaje z databází vytvořených pro danou lokalitu nebo alespoň využít databázi pocházející z takové země, ve které je podobná skladba zdrojů energie jako u nás. Do výpočtu celkové produkce emisí oxidu uhličitého obecně vstupuje mnoho nejistot, proto u materiálů, jejichž výroba nemá na celkové množství emisí velký vliv, není tak

zásadní zabývat se podrobně přesností použitých údajů o měrných emisích. Vždy je však třeba mít alespoň přibližnou představu o měrných emisích materiálů, aby nebyl ve výpočtu použit údaj, který vůbec neodpovídá skutečnosti.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vytvořen za finanční podpory interní studentské grantové soutěže ČVUT v Praze v rámci projektu SGS19/149/OHK1/3T/11 - Trvanlivost betonové konstrukce a hodnocení jejího životního cyklu.

Reference

- Svaz výrobců cementu ČR. Data o výrobě. Dostupné z: <https://www.svcement.cz/data/data-2020/>.
- Dvořák, K., Dolák, D., Hájková, I. (2017) Srovnání konečných vlastností portlandských cementů vlivem druhu mletí. *TZB info* 5 (19) 1-6.
- Výzkumný ústav maltovin Praha (2015) Cementárny a environmentální prohlášení o výrobku (EPD).
- Výzkumný ústav maltovin Praha (2015) Portlandské směsné cementy a portlandské cementy s vápencem.
- Ministerstvo průmyslu a obchodu (2021) Hodnota emisního faktoru CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010-2019. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/hodnota-emisniho-faktoru-co2-z-vyroby-elektřiny-za-leta-2010_2019--258830/.
- ArcelorMittal Ostrava (2018). Zpráva o udržitelnosti. Dostupné z: https://libertyostrava.cz/app/uploads/2019/12/Liberty_Zprava_o_udržitelnosti_2018.pdf
- Envimat. Dostupné z: <http://www.envimat.cz/>.
- Ökobaudat. Dostupné z: <https://www.oekobaudat.de/>
- Environdec. Dostupné z: <https://www.environdec.com/>
- EPD Norge. Dostupné z: <https://www.epd-norge.no>