



Výskum a inovácie pre dekarbonizáciu stavebnej činnosti prostredníctvom nízkoemisných stavebných procesov a materiálov v cirkulárnej ekonomike (DEKAST)

Kód projektu: 09I04-03-V02-00051

Financované Európskou úniou
z prostriedkov Plánu obnovy
a odolnosti SR



Financovaný
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD PODPRESEDU VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY
PRE PLÁN OBNOVY
A ZNALOSTNÚ EKONOMIKU



VÝSKUMNÁ
AGENTÚRA

Výstup 1. Publikácia - stavebné materiály

k projektu s názvom „Výskum a inovácie pre dekarbonizáciu stavebnej činnosti prostredníctvom nízkoemisných stavebných procesov a materiálov v cirkulárnej ekonomike“

v rámci pracovného balíka KPB1 s názvom Stavebné materiály

STAVEBNÉ MATERIÁLY

december 2025

Technická univerzita v Košiciach

Zväz stavebného priemyslu Slovenska

www.tuke.sk/dekast



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPÓRTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Obsah

Zoznam obrázkov	5
Zoznam tabuliek.....	6
Zoznam skratiek a značiek.....	7
1 ÚVOD	8
2 Hodnotenie environmentálnych vplyvov stavebných materiálov a výrobkov	10
2.1 Metóda emisných faktorov	10
2.2 Top-down metóda.....	10
2.3 Bottom-up metóda	11
2.4 Priame meranie	11
2.5 LCA prístup, procesne orientovaná LCA.....	11
2.5.1 Postup LCA.....	11
2.5.2 Fázy životného cyklu produktu	14
2.5.3 LCIA metódy	14
2.5.4 Softvérové nástroje pre LCA analýzu	15
2.6 Input–Output analýza a hybridná LCA	16
3 Environmentálne vyhlásenie o stavebných výrobkoch	18
3.1 Hodnotené fázy životného cyklu	19
4 Kľúčové stavebné materiály.....	23
4.1 Kamenivo	24
4.1.1 Definícia a druhy kameniva	24
4.1.2 Uhlíková stopa kameniva	24
4.1.3 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG kameniva v hodnotených krajinách.....	26
4.1.4 Ťažba kameniva na Slovensku.....	27
4.1.5 Opatrenia na dekarbonizáciu kameniva.....	29
4.2 Cement a betón.....	32
4.2.1 Výroba cementu	32
4.2.2 Výroba cementu vo svete	33
4.2.3 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG cementov v hodnotených krajinách.....	34
4.2.4 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG betónov v hodnotených krajinách.....	36
4.2.5 Súčasný trendy vo výrobe cementu a betónu na Slovensku.....	38
4.2.5.1 Výroba cementu na Slovensku	38
4.2.5.2 Výroba betónu na Slovensku.....	42
4.2.6 Opatrenia na znižovanie uhlíkovej stopy	44
4.2.6.1 Sekvestrácia uhlíka v betónových konštrukciách počas ich životného cyklu 44	
4.2.6.2 Opatrenia na zvyšovanie energetickej efektívnosti	46
4.2.6.3 Hlavné stratégie dekarbonizácie vo výrobe cementu a betónu	46
4.3 Oceľ	54
4.3.1 Výroba železa a ocele	55
4.3.2 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG oceľových výrobkov v hodnotených krajinách.....	58
4.3.3 Výroba ocele na Slovensku	60
4.3.4 Hlavné výzvy dekarbonizácie výroby ocele	62
4.3.4.1 Zachytávanie, využívanie a ukladanie uhlíka (CCUS)	63
4.3.4.2 Budúce výzvy dekarbonizácie v odvetví železa a ocele.....	64
4.4 Hliník	67
4.4.1 Výroba hliníka	67
4.4.2 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG hliníka a jeho výrobkov v hodnotených krajinách.....	68

4.4.3	Výroba hliníka na Slovensku	70
4.4.4	Výzvy pri dosahovaní uhlíkovej neutrality v hlinikárskom priemysle.....	72
4.4.4.1	Výzvy dekarbonizácie hlinikárskeho priemyslu v stavebníctve	73
4.4.4.2	Usmernenia na dosiahnutie cieľov odvetvia do roku 2050	73
4.5	Sklo	77
4.5.1	Výroba skla	77
4.5.2	Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG výroby skla v jednotlivých krajinách	78
4.5.3	Súčasný stav výroby stavebného skla na Slovensku	80
4.5.4	Environmentálne problémy výroby skla	80
4.5.5	Sklárske technológie pre energeticky hospodárne budovy	82
4.6	Tehly	85
4.6.1	Výroba tehál	85
4.6.2	Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG výroby tehál v hodnotených krajinách.....	86
4.6.3	Výroba tehál na Slovensku.....	88
4.6.4	Globálne emisie z výroby pálených hlinených tehál.....	90
4.6.5	Príklady nových technológií na znižovanie uhlíkovej stopy v Európe.....	92
4.6.6	Hlavné výzvy dekarbonizácie výroby tehál	93
4.7	Plasty	98
4.7.1	Výroba plastov	98
4.7.2	Používanie plastov v stavebníctve.....	99
4.7.3	Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG plastov a ich výrobkov v hodnotených krajinách.....	101
4.7.4	Výroba plastov na Slovensku	103
4.7.5	Nakladanie s plastovým odpadom.....	104
4.7.6	Environmentálne vplyvy plastov počas ich životného cyklu v stavebníctve	106
4.7.7	Kľúčové stratégie dekarbonizácie výroby plastov pre stavebníctvo	108
4.8	Drevo.....	112
4.8.1	Drevo ako konštrukčný materiál	112
4.8.2	Uhlíková stopa drevených materiálov	113
4.8.3	Spracovanie dreva na Slovensku	113
4.8.4	Dekarbonizácia drevospracujúceho priemyslu na Slovensku	114
5	Hlavné priority pre dosiahnutie nulových emisií v stavebnom sektore do roku 2050.....	116
5.1	Celkové posudzovanie uhlíkovej stopy počas životného cyklu stavby.....	116
5.2	Dekarbonizácia materiálov s vysokou uhlíkovou náročnosťou	116
5.3	Obnova existujúcich budov a elektrifikácia ako efektívne nástroje dekarbonizácie	117
5.4	Politické nástroje, partnerstvá a dlhodobé stratégie dekarbonizácie	117
5.5	Inovácie a rozvoj pracovnej sily ako predpoklad efektívnej dekarbonizácie ...	118
6	Analýza dekarbonizačných stratégií vybraných európskych krajín v oblasti stavebných materiálov	120
7	Záver	125

Zoznam obrázkov

Obrázok 2.1	Fázy životného cyklu pre posudzovanie environmentálnych vplyvov	14
Obrázok 3.1	Procesy a toky počas životného cyklu	18
Obrázok 4.1.1	Podiel jednotlivých fáz výroby na celkovej uhlíkovej stope kameniva	25
Obrázok 4.1.2	Vplyv transportu kameniva na väčšie vzdialenosti na emisie CO ₂	26
Obrázok 4.1.3	Prehľad počtu EPD pre kamenivo v hodnotených krajinách	27
Obrázok 4.2.1	Schéma výrobného procesu cementu	32
Obrázok 4.2.2	Mapa globálnej infraštruktúry výroby cementu v roku 2019	33
Obrázok 4.2.3	Emisie CO ₂ počas životného cyklu v hodnotovom reťazci cementu a betónu pre jednotlivé procesné kroky	34
Obrázok 4.2.4	GHG emisie z betónových výrobkov v rôznych geografických oblastiach	34
Obrázok 4.2.5	Prehľad počtu EPD pre cementy v hodnotených krajinách	35
Obrázok 4.2.6	Prehľad počtu EPD pre betóny v hodnotených krajinách	37
Obrázok 4.2.7	Závislosť podielu slinku na GWP-GHG v cemente	41
Obrázok 4.2.8	Emisie CO ₂ z procesov výroby cementu – kumulatívna alokácia pre produkciu v období 1930–2013	45
Obrázok 4.2.9	Porovnanie jednotlivých druhov cementov z hľadiska ročnej výroby a celkovej produkcie CO ₂	47
Obrázok 4.2.10	Prehľad kľúčových opatrení spojených s dekarbonizáciou výroby cementu a betónu	51
Obrázok 4.3.1	Výroba ocele vo vybraných krajinách a podiel na globálnej výrobe	54
Obrázok 4.3.2	Výroba železa vo vysokej peci	56
Obrázok 4.3.3	Výroba ocele - kyslíkový konvertor	57
Obrázok 4.3.4	Výroba ocele - elektrická oblúčková pec	57
Obrázok 4.3.5	Produkcia surovej ocele, spotreba energie a emisie uhlíka v svetovom oceliarskom priemysle	58
Obrázok 4.3.6	Prehľad počtu EPD pre oceľ v hodnotených krajinách	59
Obrázok 4.4.1	Jednotlivé fázy výroby hliníka	68
Obrázok 4.4.2	Príspevky k emisiám skleníkových plynov pri výrobe hliníka v roku 2023	69
Obrázok 4.4.3	Historický trend rastu a rozloženie emisií skleníkových plynov v sektore hliníka v rokoch 2010 až 2023	69
Obrázok 4.4.4	Prehľad počtu EPD pre hliník v hodnotených krajinách	70
Obrázok 4.5.1	Procesné kroky výroby skla s typickými teplotnými úrovňami a kvalitatívnou úrovňou energetickej náročnosti	78
Obrázok 4.5.2	Prehľad počtu EPD pre sklo v hodnotených krajinách	80
Obrázok 4.5.3	Opatrenia, prínosy, bariéry a politiky pre dekarbonizáciu sklárskeho priemyslu	82
Obrázok 4.6.1	Výroba pálených tehál	87
Obrázok 4.6.2	Prehľad počtu EPD pre cementy v hodnotených krajinách	88
Obrázok 4.6.3	Emisie skleníkových plynov (GHG) z globálnej výroby tehál v roku 2020	92
Obrázok 4.6.4	Odhadovaná globálna produkcia a emisie skleníkových plynov (GHG) z výroby pálených tehál, cementu a ocele	93
Obrázok 4.7.1	Schéma výroby plastov od surovín až po hotové výrobky	100
Obrázok 4.7.2	Požiadavky na plasty podľa polymérov v EÚ-27+3 v roku 2021	102
Obrázok 4.7.3	Prehľad počtu EPD pre plasty v hodnotených krajinách	103
Obrázok 4.7.4	Globálna produkcia plastov a plastového odpadu v Mt (1990-2019)	106
Obrázok 4.7.5	Recyklovateľnosť plastov v stavebníctve	106
Obrázok 4.8.1	Timber Praha - drevené viacpodlažné bytové domy	114

Zoznam tabuliek

Tabuľka 2.1	Základné oblasti a indikátory environmentálnych vplyvov	13
Tabuľka 2.2	Najbežnejšie používané softvéry na výpočet LCA	16
Tabuľka 3.1	Typy EPD	19
Tabuľka 3.2	Základné indikátory environmentálnych dopadov	20
Tabuľka 4.1.1	GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre kamenivo	27
Tabuľka 4.1.2	GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre kamenivo v SR	29
Tabuľka 4.1.3	GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre kamenivo v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050	30
Tabuľka 4.2.1	GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre cementy	36
Tabuľka 4.2.2	GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre betóny	37
Tabuľka 4.2.3	Prehľad vplyvu výroby vybraných cementov v SR na GWP-GHG	39
Tabuľka 4.2.4	Prehľad vplyvu výroby vybraných druhov betónov v SR na GWP-GHG	42
Tabuľka 4.2.5	GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre cementy v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050	48
Tabuľka 4.2.6	GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre betóny v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050	49
Tabuľka 4.3.1	Top 20 výrobcov surovej ocele na svete v rokoch 2024 a 2025	54
Tabuľka 4.3.2	GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre oceľ	60
Tabuľka 4.3.3	Prehľad vplyvu výroby vybraných oceľových výrobkov na Slovensku na GWP-GHG	61
Tabuľka 4.3.4	GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre oceľové výrobky v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050	65
Tabuľka 4.4.1	GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre hliník	71
Tabuľka 4.4.2	Prehľad vplyvu výroby vybraných hliníkových výrobkov na Slovensku na GWP-GHG	72
Tabuľka 4.4.3	GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre hliníkové výrobky v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050	75
Tabuľka 4.5.1	GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre sklo	80
Tabuľka 4.6.1	GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre tehly	88
Tabuľka 4.6.2	Prehľad vplyvu výroby pálených tehál na Slovensku na GWP	90
Tabuľka 4.6.3	GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre výrobu tehál v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050	94
Tabuľka 4.7.1	GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre plasty	103
Tabuľka 4.7.2	Prehľad vplyvu výroby vybraných plastových výrobkov na Slovensku na GWP-GHG	105
Tabuľka 4.7.3	Emisie GHG pri výrobe plastov	107
Tabuľka 4.7.4	GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre plasty v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050	108

Zoznam skratiek a značiek

BF–BOF	Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace (Integrovaný spôsob výroby ocele vo vysokej peci a kyslíkovom konvertore)
CCI	Cement and Concrete Industry (Cementársky a betónový priemysel)
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage (Zachytávanie, využitie a ukladanie oxidu uhličitého)
CER	CO ₂ Emission Reduction (Znižovanie emisií oxidu uhličitého)
CEMS	Continuous Emission Monitoring System (Kontinuálny systém monitorovania emisií)
CS	Crude Steel (surová oceľ)
EEA	European Environment Agency (Európska environmentálna agentúra)
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme (Európsky monitorovací a hodnotiaci program)
EPD	Environmental Product Declaration (environmentálne vyhlásenie o produkte)
GCED	Global Cement Emission Database (Databáza emisií cementárskeho priemyslu)
GHG	Greenhouse Gases (Skleníkové plyny)
GWP-biogenic	Global Warming Potential – biogenic (Potenciál globálneho otepľovania z biogénnych zdrojov)
GWP-fossil	Global Warming Potential – fossil (Potenciál globálneho otepľovania z fosílnych zdrojov)
GWP-GHG	Global Warming Potential- Greenhouse Gases (Potenciál globálneho otepľovania – emisie skleníkových plynov)
GWP-LULUC	Global Warming Potential – Land Use and Land Use Change (Potenciál globálneho otepľovania z využívania pôdy a jeho zmeny)
GWP-total	Global Warming Potential – total (Celkový potenciál globálneho otepľovania)
IAI	International Aluminium Institute (Medzinárodný inštitút pre hliník)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Medzivládny panel pre zmenu klímy)
LCA	Life Cycle Assessment (Analýza životného cyklu)
LCI	Life Cycle Inventory (Inventarizácia vstupov a výstupov)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Posudzovanie vplyvov životného cyklu)
PEF	Product Environmental Footprint (Environmentálna stopa produktu)

1 ÚVOD

Stavebný sektor patrí medzi najvýznamnejších spotrebiteľov surovín a energie na svete a zároveň je jedným z hlavných zdrojov emisií skleníkových plynov. Výroba základných stavebných materiálov, ako sú cement, betón, oceľ či sklo, je spojená s vysokou energetickou náročnosťou a významnou produkciou oxidu uhličitého (CO₂). Dekarbonizácia stavebného priemyslu sa stáva jednou z najdôležitejších tém environmentálnej politiky a priemyselnej transformácie. Stavebníctvo je zodpovedné za približne 38% celosvetových emisií CO₂, pričom až 11% pochádza z výroby samotných stavebných materiálov – tzv. embodied carbon. Najväčší podiel na týchto emisiách majú cement (asi 7-8%), oceľ (okolo 7%) ako aj sklo a tehly (1-2%). Z tohto dôvodu sa dekarbonizácia stavebných materiálov stala jednou z kľúčových tém súčasného výskumu a priemyselnej transformácie, najmä v kontexte globálnych klimatických cieľov a snahy o dosiahnutie uhlíkovej neutrality v priebehu nasledujúcich desaťročí.

Súčasný stav poznatkov poukazuje na to, že znižovanie emisií v stavebnom priemysle si vyžaduje komplexný prístup, ktorý zahŕňa technologické inovácie, zmeny vo výrobe materiálov, efektívnejšie využívanie zdrojov a podporu obehového hospodárstva. Jedným z hlavných smerov výskumu je vývoj nízkouhlíkových alternatív tradičných stavebných materiálov, napríklad cementov s nižším obsahom slinku, geopolymérnych spojív alebo materiálov využívajúcich priemyselné vedľajšie produkty. Tieto riešenia umožňujú znížiť emisie už vo fáze výroby, pričom zároveň zachovávajú požadované mechanické a technické vlastnosti materiálov.

Ďalším významným aspektom dekarbonizácie je zvyšovanie energetickej efektívnosti výrobných procesov a postupná náhrada fosílnych palív alternatívnymi zdrojmi energie. V praxi to zahŕňa napríklad elektrifikáciu výrobných zariadení, využívanie biomasy alebo vodíka ako paliva, ako aj zavádzanie systémov rekuperácie tepla. Dôležitú úlohu zohrávajú aj technológie zachytávania, využitia a ukladania oxidu uhličitého (CCUS), ktoré umožňujú zachytiť CO₂ priamo pri výrobe a následne ho využiť v ďalších priemyselných procesoch alebo bezpečne uložiť.

V posledných rokoch sa čoraz väčšia pozornosť venuje aj princípom obehového hospodárstva. Recyklácia stavebných materiálov, opätovné využívanie stavebných prvkov a predlžovanie životnosti budov predstavujú dôležité nástroje na znižovanie environmentálnych dopadov stavebného sektora. Zároveň sa rozvíjajú nové prístupy, ako je využívanie recyklovaného kameniva v betóne, mineralizácia CO₂ v stavebných materiáloch alebo digitálne optimalizovanie zloženia betónových zmesí.

Významnú úlohu pri transformácii stavebného sektora zohrávajú aj politické a ekonomické nástroje. Regulačné mechanizmy, ako sú systémy obchodovania s emisnými kvótami, environmentálne certifikácie stavebných materiálov či požiadavky na udržateľnosť v rámci verejného obstarávania, vytvárajú tlak na výrobcov, aby zavádzali nízkouhlíkové technológie a materiály. Súčasne podporujú výskum a vývoj inovatívnych riešení, ktoré môžu prispieť k dlhodobému znižovaniu emisií.

Dekarbonizácia stavebných materiálov je teda komplexný proces, ktorý si vyžaduje spoluprácu priemyslu, vedeckej sféry aj verejných inštitúcií. Súčasný stav poznatkov naznačuje, že existuje viacero technologických a organizačných riešení, ktoré môžu významne prispieť k znižovaniu uhlíkovej stopy stavebného sektora. Ich úspešná implementácia bude zohrávať kľúčovú úlohu pri prechode k udržateľnejšiemu a environmentálne zodpovednému stavebníctvu. Zníženie emisií skleníkových plynov (GHG) pri výrobe stavebných materiálov je preto kľúčový pre splnenie klimatických cieľov do roku 2050.

V nasledujúcich kapitolách je predstavená metodika výpočtu uhlíkovej stopy stavebných materiálov a výrobkov vrátane využitia environmentálnych produktových deklarácií (EPD) a princípov hodnotenia životného cyklu. Následne sú podrobne opísané výrobné procesy vybraných stavebných materiálov a výrobkov, ako sú kamenivo, cement, betón, oceľ, sklo,

plasty, pálené hlinené tehly a pórobetónové tvárnice. Pozornosť je venovaná použitým surovinám, technologickým postupom výroby, energetickej náročnosti procesov a ich environmentálnym vplyvom. Súčasťou práce je aj analýza možností dekarbonizácie jednotlivých výrobných procesov s cieľom identifikovať opatrenia vedúce k zníženiu emisií skleníkových plynov. Záverečná časť sa venuje inovatívnym a nízkouhlíkovým stavebným materiálom, ktoré predstavujú perspektívne riešenia na znížovanie environmentálnej záťaže stavebného sektora a podporu jeho udržateľnej transformácie.

2 HODNOTENIE ENVIRONMENTÁLNYCH VPLYVOV STAVEBNÝCH MATERIÁLOV A VÝROBKOV

Dekarbonizácia v stavebníctve predstavuje komplexný proces znižovania emisií skleníkových plynov počas celého životného cyklu budov – od výroby stavebných materiálov, cez samotnú výstavbu, až po prevádzku a koniec životnosti stavby.

Emisie skleníkových plynov v stavebníctve možno rozdeliť na dve hlavné kategórie: viazané emisie (embodied) a prevádzkové emisie (operational). Viazané emisie zahŕňajú všetko, čo súvisí s výrobou a dopravou stavebných materiálov, a aj ich nakladaním po skončení životnosti. Naopak, prevádzkové emisie pochádzajú zo spotreby energie počas životnosti budovy, napríklad z vykurovania, chladenia, osvetlenia alebo prevádzky technických zariadení.

Uhlíková stopa predstavuje súhrn všetkých emisií skleníkových plynov a ich odstránení v systéme produktu (stavebného materiálu, konštrukcie, procesu a pod.) vyjadrených v ekvivalentoch CO₂ a je založená na posudzovaní životného cyklu produktu, pričom ako jediná oblasť vplyvu sa uvažuje zmena klímy [1]. Cieľom výpočtu uhlíkovej stopy je identifikovať fázy s najvyšším príspevkom ku zmene klímy a umožniť optimalizáciu výrobných a stavebných procesov smerom k ich zníženiu.

Základným medzinárodným dokumentom pre výpočet uhlíkovej stopy je ISO 14067: 2018 – Greenhouse gases, Carbon footprint of products [1], ktorá definuje princípy, požiadavky a usmernenia pre kvantifikáciu a komunikáciu uhlíkovej stopy výrobkov.

Európska únia podporuje hodnotenie uhlíkovej stopy prostredníctvom iniciatív ako Level(s) (rámec udržateľnosti budov) a Environmentálna stopa produktu (Product Environmental Footprint, PEF). V Slovenskej republike je uplatňovanie týchto princípov zatiaľ prevažne dobrovoľné, no očakáva sa ich väčšia integrácia do legislatívy po roku 2030 v rámci klimatických cieľov EÚ.

Pre výpočet emisií skleníkových plynov existuje vo všeobecnosti v závislosti od účelu hodnotenia, dostupných dát, požadovanej presnosti a úrovne hodnotenia, viacero metodických prístupov.

2.1 Metóda emisných faktorov

Metóda emisných faktorov (Emission Factor Method) je jednoduchý a široko používaný prístup na odhad emisií skleníkových plynov alebo znečisťujúcich látok odporúčaná na základe GHG protokolu IPCC. Základom tejto metódy je použitie emisného faktora, ktorý udáva množstvo emisií vzniknutých na jednotku aktivity – napríklad kilogramy CO₂ na liter spáleného paliva alebo na kilowatthodinu spotrebovanej energie. Celkové emisie sa potom vypočítajú ako súčin aktivity a emisného faktora. Táto metóda je vhodná najmä v prípadoch, keď nie sú k dispozícii priame merania, pretože umožňuje rýchly a relatívne spoľahlivý odhad. Presnosť výsledkov však závisí od kvality a aktuálnosti použitých emisných faktorov, ktoré sa zvyčajne preberajú z databáz ako IPCC, EMEP/EEA či z národných zdrojov údajov.

2.2 Top-down metóda

Top-down metóda je prístup používaný pri výpočte alebo odhadoch emisií, pri ktorom sa vychádza z agregovaných, celkových údajov na národnej alebo odvetvovej úrovni. Emisie sa určujú zhora nadol, teda z celkových štatistík o spotrebe palív, výrobe energie alebo priemyselnej produkcii sa odvádzajú emisie pre jednotlivé sektory alebo činnosti. Táto metóda je vhodná najmä na makroúrovni (mestá, regióny, štáty), napríklad pri tvorbe národných emisných zoznamov podľa rámca IPCC. Výhodou je jej jednoduchosť a dostupnosť dát, no nevýhodou je nižšia presnosť, pretože nezohľadňuje špecifiká jednotlivých zariadení či

procesov. V praxi sa často kombinuje s bottom-up metódou, aby sa dosiahla lepšia rovnováha medzi presnosťou a úplnosťou údajov.

2.3 Bottom-up metóda

Bottom-up (procesná) metóda je prístup k výpočtu emisií, pri ktorom sa vychádza z detailných údajov o jednotlivých procesoch, zariadeniach alebo aktivitách. Emisie sa počítajú zdola nahor – teda najprv sa určia pre konkrétne zdroje a následne sa sčítajú do celkového výsledku pre organizáciu, odvetvie či produkt. Táto metóda umožňuje vyššiu presnosť a lepšiu identifikáciu hlavných zdrojov emisií, keďže vychádza z reálnych technologických parametrov, meraní a špecifických emisných faktorov. Jej nevýhodou je časová a dátová náročnosť, pretože vyžaduje podrobné informácie o všetkých procesoch. Používa sa najmä pri analýzach životného cyklu (LCA), environmentálnych hodnoteniach produktov a v podnikovej emisnej inventarizácii.

2.4 Priame meranie

Priame meranie je metóda stanovenia emisií, pri ktorej sa množstvo znečisťujúcich látok alebo skleníkových plynov zisťuje meraním priamo na mieste ich vzniku. Využívajú sa pritom senzory, analyzátory alebo kontinuálne monitorovacie systémy (CEMS), ktoré merajú koncentráciu látok v spalinách či odpadovom plyne a kombinujú ju s údajmi o prietoku. Táto metóda poskytuje najpresnejšie a najspoľahlivejšie výsledky, pretože zachytáva reálne prevádzkové podmienky zdroja. Nevýhodou sú vyššie náklady a technická náročnosť, najmä pri nepretržitom monitorovaní alebo v prípade menších zdrojov. Priame meranie sa často používa v priemyselných podnikoch, ktoré majú povinnosť monitorovať a reportovať svoje emisie podľa legislatívnych požiadaviek.

2.5 LCA prístup, procesne orientovaná LCA

LCA je komplexná, systematická a viacdimenziálna metodika, ktorá analyzuje jednotlivé výrobné procesy a často využíva kombináciu údajov z top-down, bottom-up, emisných faktorov alebo priamych meraní, aby poskytla presný obraz o environmentálnych dopadoch produktu či procesu počas celého jeho životného cyklu. LCA umožňuje identifikovať kritické fázy životného cyklu a porovnať alternatívne riešenia z hľadiska ich environmentálnej záťaže. Metóda sa využíva pri udržateľnom navrhovaní produktov, strategickom rozhodovaní a reportovaní uhlíkovej stopy.

V oblasti hodnotenia environmentálnych vplyvov stavebných materiálov a výrobkov sa uhlíková stopa často analyzuje v rámci širšieho nástroja – posudzovania životného cyklu (Life Cycle Assessment, LCA). LCA umožňuje kvantifikovať všetky relevantné vstupy (suroviny, energia, voda) a výstupy (produkty, odpady, emisie) systému počas jednotlivých fáz životného cyklu materiálu, čím poskytuje komplexný pohľad na environmentálne vplyvy počas celého životného cyklu výrobku.

Základným rámcom pre posudzovanie environmentálnych vlastností budov je norma EN 15978 [2], ktorá definuje posudzovanie emisií počas celého životného cyklu budovy (LCA – Life Cycle Assessment). Pre stavebné výrobky sa používa norma EN 15804 [3], ktorá určuje pravidlá pre vytváranie environmentálnych vyhlásení o produkte (EPD – Environmental Product Declaration). EPD poskytuje overené údaje o environmentálnych vplyvoch konkrétnych materiálov, vrátane ich uhlíkovej stopy vyjadrenej v kg CO₂e. Metodický rámec LCA je ďalej podložený normami ISO 14040 [4] a ISO 14044 [5], ktoré sa používajú vo všetkých odvetviach, nielen v stavebníctve.

2.5.1 Postup LCA

Metóda posudzovania životného cyklu (LCA) zahŕňa štyri základné kroky [4].

1. Definovanie cieľa a rozsahu

Stanovuje sa účel štúdie, systémové hranice, zdroje údajov a funkčná jednotka. Stanovuje sa, ktoré procesy budú do výpočtu zahrnuté, napr. len fáza výroby alebo celý životný cyklus.

Systémové hranice môžu byť napr.:

- „od kolísky po bránu“ (Cradle-to-gate) – od ťažby surovín po odchod z výrobného závodu,
- „od kolísky po hrob“ (Cradle-to-grave) – celý životný cyklus vrátane likvidácie,
- „od kolísky po kolísku“ (Cradle-to-cradle) – s recykláciou a opätovným použitím.

Definovanie funkčnej jednotky je v LCA kľúčové, pretože určuje, ktoré údaje z procesov a materiálových tokov je potrebné zahrnúť do štúdie, vrátane predchádzajúcich a nasledujúcich procesov. Funkčná jednotka slúži ako spoločný základ pre sčítavanie materiálových tokov a posudzovanie environmentálnych vplyvov jednotlivých fáz životného cyklu a modulov stavebných produktov a služieb. Pri jej definovaní sa vychádza z kľúčových funkčných vlastností produktu začleneného do budovy a zohľadňuje sa pritom jeho funkčný ekvivalent a referenčná prevádzková životnosť produktu alebo celej budovy za stanovených podmienok používania. Pre stavebné produkty je funkčná resp. deklarovaná jednotka špecifikovaná v norme STN EN 15804. Pre LCA hodnotenie stavebných produktov je možné vybrať rôzne typy funkčných jednotiek v závislosti od konkrétneho účelu hodnotenia, napr.:

- Jeden prvok, súbor prvkov, napr. 1 tehla, 1 okno (so špecifikovanými rozmermi);
- hmotnosť (kg), napr. 1 kg cementu;
- dĺžka (m), napr. 1 meter potrubia (rozmery musia byť špecifikované);
- plocha (m²), napr. 1 meter štvorcový steny, 1 meter štvorcový strechy (rozmery musia byť špecifikované);
- objem (m³), napr. 1 meter kubický stavebného dreva, 1 meter kubický betónu.

2. Inventarizácia vstupov a výstupov

V tomto kroku inventarizácie vstupov a výstupov (LCI – Life Cycle Inventory) sa zhromažďujú údaje o všetkých vstupoch (energie, materiály, voda) a výstupoch (emisie, odpady), dopravných vzdialenostiach, použitých palivách, odpadoch a ich zhodnocovaní. Tieto údaje sa často získavajú priamo od výrobcu alebo z odvetvových štatistík. Na základe pôvodu môžu byť údaje:

- Primárne – priamo od výrobcu (napr. spotreba plynu, elektrickej energie).
- Sekundárne – z databáz ako Ecoinvent, ILCD, ICE Database alebo GaBi Professional Database.

Na začiatku analýzy je potrebné stanoviť počiatočné požiadavky na kvalitu údajov, ktoré sú definované týmito požiadavkami:

- Časová reprezentatívnosť: požadovaný vek (napr. za posledných 5 rokov) a minimálny časový interval (napr. rok).
- Geografické pokrytie: geografická oblasť, z ktorej by sa mali zhromažďovať údaje o jednotkových procesoch s cieľom splniť cieľ štúdie (napr. miestne, regionálne, celoštátne, kontinentálne alebo globálne).
- Technologické pokrytie: reprezentatívnosť pre kombináciu technológií (napr. vážený priemer aktuálnej kombinácie procesov, najlepšia dostupná technológia alebo najhorší technologický proces)

3. Posudzovanie vplyvov životného cyklu

Cieľom fázy posudzovania vplyvov (LCIA – Life Cycle Impact Assessment) je prepojiť množstvá vstupov a výstupov z predchádzajúceho kroku s ich skutočnými environmentálnymi dôsledkami, ako sú zmena klímy, acidifikácia, eutrofizácia či spotreba zdrojov. V rámci LCIA

sa emisie a spotreby látok priradujú do tzv. oblastí vplyvov, ktoré sa následne charakterizujú pomocou vedecky stanovených faktorov (napr. GWP pre globálne otepľovanie). Príklad základných oblastí vplyvov a environmentálnych indikátorov pre stavebné výrobky uvádza Tabuľka 2.1.

Výsledkom tejto fázy je kvantitatívne vyjadrenie environmentálnych vplyvov analyzovaného systému v spoločných jednotkách. LCIA tak umožňuje porovnať rôzne alternatívy a identifikovať fázy životného cyklu s najväčším environmentálnym vplyvom.

V prípade výpočtu uhlíkovej stopy sa ako jediná oblasť vplyvu sa uvažuje zmena klímy, ako už bolo spomenuté, preto sa zozbierané údaje prevádzajú na ekvivalenty CO₂. Využívajú sa charakterizačné faktory a hodnoty potenciálov globálneho otepľovania (GWP) jednotlivých skleníkových plynov, ktoré prispievajú ku globálnemu otepľovaniu podľa IPCC. Okrem CO₂ sa uvažujú aj ďalšie plynné škodliviny, ako sú CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆ a iné. Výsledkom je celkový potenciál globálneho otepľovania (GWP total) vyjadrený v kilogramoch CO₂ ekvivalentov na funkčnú alebo deklarovanú jednotku.

Tabuľka 2.1 Základné oblasti a indikátory environmentálnych vplyvov

Oblasť vplyvu	Indikátor	Jednotka (vyjadrená na funkčnú alebo deklarovanú jednotku)
Klimatická zmena - celková	Celkový potenciál globálneho otepľovania (GWP-total)	kg CO _{2eq.}
Klimatická zmena – fosílné zdroje	Potenciál globálneho otepľovania z fosílnych zdrojov (GWP-fossil)	kg CO _{2eq.}
Klimatická zmena – biogénne zdroje	Potenciál globálneho otepľovania z biogénnych zdrojov (GWP-biogenic)	kg CO _{2eq.}
Klimatická zmena – využívanie pôdy a zmeny využívania pôdy	Potenciál globálneho otepľovania z využívania pôdy a jeho zmeny (GWP-luluc)	kg CO _{2eq.}
Klimatická zmena – GWP-celková, za predpokladu, že charakterizačný faktor pre biogénne CO ₂ je nastavený na nulu	Potenciál globálneho otepľovania – emisie skleníkových plynov (GWP – GHG)	kg CO _{2eq.}

4. Interpretácia výsledkov

V záverečnom kroku sa identifikujú hlavné zdroje emisií a navrhujú opatrenia na ich zníženie. Výsledky sa overujú z hľadiska úplnosti a konzistencie. Presnosť výpočtu je závislá od kvality vstupných dát, správneho určenia systémových hraníc a emisných faktorov. V prípade potreby sa vykonáva analýza citlivosti, ktorá hodnotí vplyv zmien vstupných parametrov na celkový výsledok.

Pri hodnotení uhlíkovej stopy stavebných materiálov je významným problémom dostupnosť spoľahlivých dát a regionálna špecifickosť výrobných procesov. Výsledky z medzinárodných databáz nemusia presne odrážať lokálne podmienky, napríklad energetický mix alebo transportné vzdialenosti. Nepresnosť je možné znížiť používaním aktuálnych a regionálne špecifických údajov, prípadne overením údajov tretími stranami.

Získané environmentálne vplyvy sa prezentujú formou grafov, environmentálneho vyhlásenia o produkte (EPD) alebo sumárnych indikátorov. Výsledky sa často publikujú v rámci EPD (Environmental Product Declaration), ktorá zabezpečuje transparentnosť a porovnateľnosť environmentálnych údajov o výrobkoch.

2.5.2 Fázy životného cyklu produktu

Pri výpočte uhlíkovej stopy stavebných materiálov sa môžu analyzovať v závislosti od cieľa LCA štúdie všetky fázy životného cyklu stavby – od získavania surovín a výroby materiálov, cez dopravu a výstavbu, prevádzku budovy, až po demoláciu a nakladanie s odpadom. Modul D navyše zahŕňa potenciálne prínosy z recyklácie a opätovného použitia materiálov alebo výroby energie.

Pri hodnotení stavebných materiálov sa uplatňujú tzv. moduly životného cyklu podľa normy EN 15804 [3], ako sú ilustrované na obrázku 2.1:

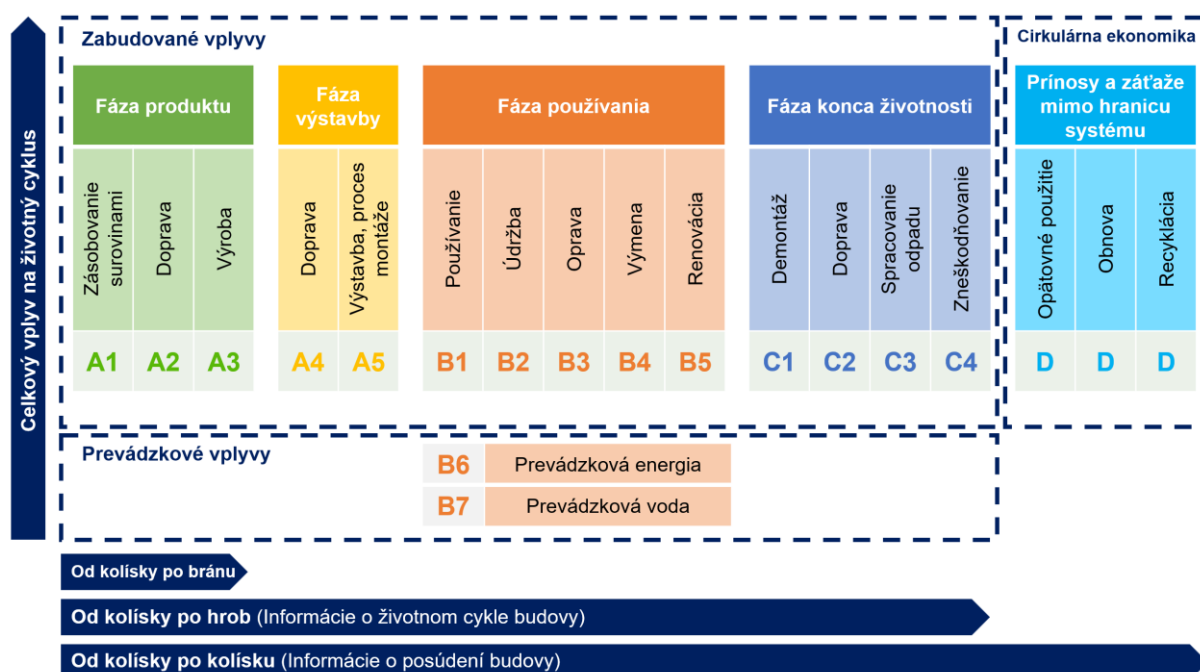
A1–A3: Fáza výroby produktu (ťažba surovín, doprava, výrobný proces),

A4–A5: Fáza výstavby (doprava na stavenisko a montáž),

B1–B7: Fáza používania (používanie, údržba, oprava, výmena, apod.),

C1–C4: Fáza konca životnosti (demontáž, spracovanie odpadov, zneškodňovanie),

D: Prínosy a záťaž mimo hranicu systému (potenciálne prínosy z recyklácie, opätovného použitia alebo energetického zhodnotenia).



Obrázok 2.1 Fázy životného cyklu pre posudzovanie environmentálnych vplyvov

2.5.3 LCIA metódy

V rámci fázy LCIA (Life Cycle Impact Assessment) sa používajú rôzne metódy, ktoré sa líšia v spôsobe hodnotenia a kategorizácie environmentálnych vplyvov. Tieto metódy umožňujú previesť inventarizačné údaje z LCI (Life Cycle Inventory) na konkrétne vplyvy na životné prostredie, ako je zmena klímy, acidifikácia či eutrofizácia. Najčastejšie používané LCIA metódy sú napríklad CML, ReCiPe, TRACI, Eco-indicator 99 a ILCD/EF metóda, pričom každá z nich má odlišné prístupy k výpočtu a interpretácii výsledkov.

CML (Centrum voor Milieukunde Leiden) je jedna z najstarších a najpoužívanejších LCIA metód, vyvinutá na Leidskej univerzite. Zameriava sa na tzv. stredné indikátory (midpoint approach), ktoré vyjadrujú environmentálne vplyvy v strede reťazca príčin (napr. množstvo CO₂ ako príspevok ku globálnemu otepľovaniu). Medzi posudzované kategórie patrí napríklad

klimatická zmena, acidifikácia, eutrofizácia, tvorba fotochemického ozónu či spotreba zdrojov. Výhodou metódy CML je jej transparentnosť, stabilita a široká akceptácia v európskej praxi.

ReCiPe je novšia metóda, ktorá nadväzuje na CML a spája midpoint aj endpoint prístup. To znamená, že dokáže vyjadriť nielen čiastkové vplyvy (napr. globálne otepľovanie), ale aj ich konečné dôsledky na ľudské zdravie, ekosystémy a zdroje. ReCiPe používa súbor charakterizačných faktorov a umožňuje výber medzi tromi úrovňami detailu – individuálnou, hierarchickou a egalitárnou perspektívou. Je to komplexná a moderná metóda, ktorá sa často používa v medzinárodných LCA štúdiách.

TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) je metóda vyvinutá americkou agentúrou EPA a používa sa najmä v Severnej Amerike. Je prispôbená regionálnym podmienkam USA a Kanady, vrátane špecifických emisných faktorov a kategórií dopadov. Hodnotí napríklad potenciál globálneho otepľovania, acidifikáciu, tvorbu ozónu, toxicitu pre ľudí či dopady na ekosystémy. TRACI je praktická pri hodnotení produktov a procesov podľa amerických environmentálnych štandardov.

Eco-indicator 99 je metóda založená na endpoint prístupe, teda na hodnotení konečných dôsledkov environmentálnych dopadov. Výsledky agreguje do troch hlavných oblastí: ľudské zdravie, kvalita ekosystémov a spotreba zdrojov. Výhodou je, že dokáže zjednodušiť interpretáciu výsledkov pre rozhodovanie – napríklad v dizajne produktov alebo environmentálnom manažmente. Nevýhodou je však vyššia miera zovšeobecnenia, ktorá môže znižovať vedeckú presnosť v porovnaní s midpoint metódami.

ILCD/EF metóda (International Reference Life Cycle Data System / Environmental Footprint) je odporúčaná metóda Európskou komisiou pre harmonizované LCA hodnotenia v rámci EÚ. Jej cieľom je zabezpečiť jednotný prístup k hodnoteniu environmentálnych dopadov produktov a služieb, najmä pre potreby politiky a reportovania (napr. PEF – Product Environmental Footprint). Zahŕňa viac ako 15 oblastí vplyvov vrátane zmeny klímy, ozónovej vrstvy, toxicity, degradácie pôdy a využívania zdrojov. ILCD/EF sa považuje za referenčnú metódu pre európske podmienky a je základom pre nové regulačné rámce v oblasti udržateľnosti a označovania produktov.

2.5.4 Softvérové nástroje pre LCA analýzu

Kľúčovými nástrojmi pre výpočet emisií sú dnes LCA softvéry, ktoré umožňujú integrovať environmentálne údaje priamo do BIM modelov. Tým sa zefektívňuje plánovanie a umožňuje vyhodnocovať uhlíkovú stopu už v návrhovej fáze. V európskom kontexte sa dekarbonizácia stavebníctva opiera aj o politiky ako EU Level(s), Taxonómiu udržateľných aktivít či smernica EPBD, ktorá zavádza povinnosť hodnotiť Whole Life Carbon (WLC) – teda celkový uhlíkový vplyv budov počas ich životného cyklu.

V praxi sa na spracovanie dát používajú špecializované softvérové nástroje, napríklad GaBi, SimaPro, OpenLCA, One Click LCA alebo Athena Impact Estimator, ktoré využívajú databázy ako Ecoinvent, ELCD či ICE Database. V súčasnosti dochádza k spojeniu SimaPro a One Click LCA v zmysle vlastníckych vzťahov, avšak základné charakteristiky oboch by mali zostať zachované. Porovnanie jednotlivých softvérových nástrojov je v tabuľke 2.2.

Tabuľka 2.2 Najbežnejšie používané softvéry na výpočet LCA

Softvér	Hlavné charakteristiky	Výhody
Sphera	rozsiahla databáza, normy EN 15804 a ISO 14044	vysoká presnosť, profesionálne použitie
SimaPro	používateľsky flexibilný, prepojenie s Ecoinvent	vhodný pre výskum a porovnania

One Click LCA	rôzne nástroje zamerané na stavebný materiál, budovy a celkovo stavebníctvo normy EN 15804, EN 15978, ISO 21930, ISO 14044	jednoduché použitie, Ecoinvent databáza EPD integrácia s BIM modelmi
OpenLCA	open-source nástroj	bezplatný, vhodný pre akademické účely
Athena Impact Estimator	špecificky pre budovy	integrácia s BIM modelmi

2.6 Input–Output analýza a hybridná LCA

Ekonomicko-environmentálna input-output analýza (EIOA) predstavuje účinný nástroj pre výpočet emisií skleníkových plynov na makroekonomickej a sektorovej úrovni. Jej cieľom je ukázať, ako sú ekonomické sektory vzájomne prepojené prostredníctvom vstupov (inputs) a výstupov (outputs) a teda ako výroba jedného odvetvia závisí od výrobkov iných odvetví. Jej hlavnou prednosťou je, že dokáže zachytiť nepriame emisie, ktoré sa v procesnej LCA často prehliadajú. V stavebníctve sa využíva najmä v kombinácii s LCA (tzv. hybridná LCA), čo umožňuje spojiť presnosť mikrodát a komplexnosť makroekonomických väzieb.

Ekonomicko-environmentálna Input–Output analýza (EIOA) je metodický prístup, ktorý spája ekonomické toky medzi odvetviami s ich environmentálnymi dopadmi, napríklad emisiami skleníkových plynov alebo spotrebou zdrojov. Vychádza z matice vstupov a výstupov (Input–Output table), ktorá ukazuje, ako produkcia jedného sektora ovplyvňuje ostatné sektory hospodárstva. Pomocou EIOA je možné kvantifikovať priamy aj nepriamy environmentálny vplyv na úrovni odvetví alebo krajín. Táto metóda sa často používa na makroúrovňové hodnotenia, napríklad celkovú uhlíkovú stopu národného hospodárstva alebo spotreby. Hlavnou výhodou je jej schopnosť zachytiť reťazové efekty v ekonomike, zatiaľ čo nevýhodou je nižšia presnosť pre jednotlivé produkty alebo procesy.

EIOA teda nehodnotí konkrétny produkt, ale celú sieť ekonomických vzťahov, ktoré k výrobe týchto produktov vedú, a tým poskytuje dôležitý doplnkový pohľad na uhlíkovú stopu v širších súvislostiach. Hybridné modely spájajú procesné dáta s EIOA, čím dosahujú lepšiu rovnováhu medzi presnosťou a komplexnosťou. Používajú sa pri hodnotení celých budov alebo rozsiahlych stavebných projektov.

V stavebníctve sa EIOA využíva najmä:

- na odhad nepriamych emisií z výroby vstupných materiálov, ktoré nie sú detailne známe (napr. transport, dodávatelia energií),
- na národné alebo sektorové hodnotenia (napr. uhlíková stopa celého stavebného sektora),
- v hybridných modeloch, kde sa spája s LCA pre presnejšie výsledky.

Literatúra

1. ISO 14067:2018 – Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification.
2. EN 15978 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method
3. EN 15804:2012+A2:2019 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products.
4. ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
5. ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.

6. European Commission (2023): Level(s) – A European framework for sustainable buildings.
7. IPCC (2021): Sixth Assessment Report – Global Warming Potentials (GWP).
8. Ecoinvent Database v3.9 – Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
9. ICE Database v3.0 (2022) – Inventory of Carbon and Energy, University of Bath.
10. One Click LCA (2024): Construction Carbon Tool – User Guide.
11. Finnveden G., Hauschild M.Z. et al. (2009): Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21.

3 ENVIRONMENTÁLNE VYHLÁSENIE O STAVEBNÝCH VÝROBKOCH

V posledných rokoch pozvoľna narastajú požiadavky na vypracovanie dokumentu Environmentálne vyhlásenie o produkte (Environmental Product Declaration, EPD) zo strany výrobcov, najmä stavebných výrobkov. V mnohých prípadoch je to z dôvodu certifikácie budov systémami LEED a BREEAM, ktoré vyžadujú zabudovanie materiálov a výrobkov s certifikátom EPD. Ako ďalšie príklady použitia EPD sú:

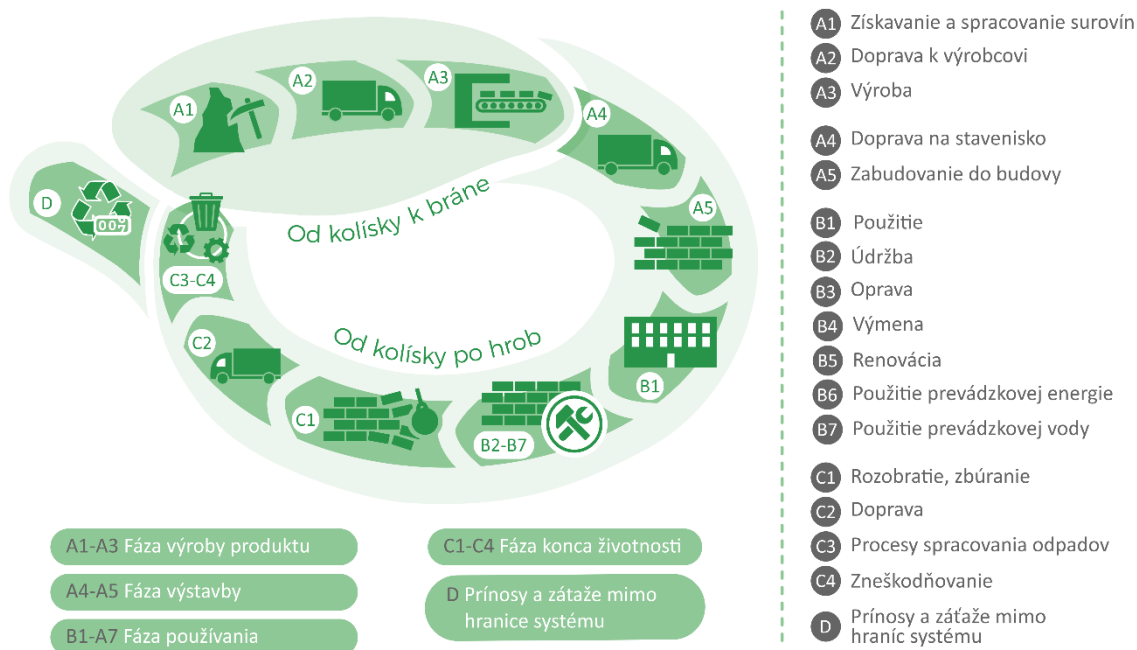
- zelené verejné obstarávanie (GPP),
- komunikácia medzi podnikmi,
- komunikácia medzi podnikmi a spotrebiteľmi.

Environmentálne vyhlásenie o produkte je definované ako nezávisle overený a registrovaný dokument, ktorého hlavným cieľom je:

- poskytnúť relevantné a overené informácie o vplyve výrobkov na životné prostredie s ohľadom na celý ich životný cyklus, a
- poskytnúť základ pre porovnanie výrobkov a služieb z hľadiska ich environmentálneho správania.

Zásady, požiadavky a pokyny s cieľom posúdiť environmentálne vlastnosti produktov sú definované v normách ISO 14040:2006 a ISO 14044:2006 [1-2]. EPD sú založené na zásadách noriem ISO 14020:2000 a ISO 14025:2006 [3-4]., ktoré stanovujú zásady a postupy pre environmentálne vyhlásenie typu III, vďaka čomu sú EPD medzinárodne akceptované.

Posúdenie životného cyklu stavebných výrobkov sa vykonáva podľa požiadaviek normy EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 [5]. Metóda hodnotenia životného cyklu (LCA) sa využíva na komplexné posúdenie vplyvu výrobku na životné prostredie počas celého jeho životného cyklu.



Obrázok 3.1 Procesy a toky počas životného cyklu [6].

3.1 Hodnotené fázy životného cyklu

Ako je uvedené v norme EN 15804+A2:2019, pre všetky stavebné výrobky sa musia uvádzať moduly A1-A3, moduly C1-C4 a modul D. Od tejto požiadavky môžu byť oslobodené iba výrobky, ktoré spĺňajú všetky tri nižšie uvedené podmienky:

- výrobok alebo materiál je počas inštalácie fyzicky spojený s inými výrobkami, takže na konci životnosti ho nemožno od nich fyzicky oddeliť,
- výrobok alebo materiál už nie je na konci životnosti identifikovateľný v dôsledku fyzikálnej alebo chemickej premeny a výrobok alebo materiál neobsahuje biogénny uhlík.

Typy EPD

Tabuľka 3.1 prezentuje typy EPD s ich základnou charakteristikou.

Tabuľka 3.1 Typy EPD

Typ EPD	Charakteristika
Špecifické	<ul style="list-style-type: none">• údaje o jednom produkte vyrobenom jedným výrobcom, ale môže zahŕňať niekoľko závodov• ak výrobca vyrába výrobok vo viacerých závodoch po celom svete, ale všetky závody používajú rovnaké procesy, môže sa na ne vzťahovať jedno EPD• v LEED v4 sa tento typ označuje ako EPD špecifické pre produkt typu III
Skupinové	<ul style="list-style-type: none">• podobné výrobky z jedného alebo viacerých výrobných závodov, na ktoré sa vzťahujú rovnaké Pravidlá pre kategóriu produktov (Product Category Rules, PCR) a ktoré vyrába rovnaká spoločnosť s rovnakými hlavnými postupmi a rovnakými hlavnými procesmi• rozdiely medzi deklarovanou hodnotou GWP-GHG* na základe priemerných výsledkov alebo reprezentatívneho výrobku pre moduly A1-A3 (A1-A5 pre služby) by sa nemali líšiť o viac ako 10 % v porovnaní s výsledkami GWP-GHG žiadneho zo zahrnutých výrobkov. V prípade, že sú rozdiely väčšie, zoskupenie výrobkov/prevádzok sa v LCA správe zdôvodní. (podľa PCR 2019:14, verzia 1.3.3)• jeden súbor výsledkov sa deklaruje v EPD, a to:<ul style="list-style-type: none">• priemerné výsledky,• pre jeden reprezentatívny výrobok alebo• pre najhorší produkt• výber reprezentatívneho produktu sa zdôvodní v EPD použitím štatistických parametrov
Sektorové	<ul style="list-style-type: none">• na základe požiadavky priemyselnej asociácie sa deklaruje priemerný produkt viacerých spoločností v jasne definovanom sektore a geografickej oblasti• výrobky sa riadia rovnakou PCR a uplatňuje sa rovnaká funkčná / deklarovaná jednotka• musí byť uvedené, že výsledky sú založené na priemeroch získaných zo sektoru

	<ul style="list-style-type: none"> • nesmie sa tvrdiť, že výsledky sú reprezentatívne pre určitého výrobcu alebo jeho výrobok, preto nemôže jedno EPD zastupovať niekoľko výrobkov a niekoľkých výrobcov • v kontexte normy EN 15804 sa označuje ako „priemerné EPD“ • označuje sa aj ako „priemyselné EPD“ alebo „generické EPD“
--	--

Obsah EPD certifikátu

- základné informácie: Prevádzkovateľ programu EPD, číslo vyhlásenia, názov a adresa vlastníka EPD, referenčné PCR, dátum zverejnenia, obdobie platnosti, rozsah EPD, overovateľ tretej strany, atď;
- informácie o produkte: opis produktu, použitie, technické parametre, zloženie výrobku/materiálu;
- informácie o fázach životného cyklu: fáza produktu, doprava, balenie, inštalácia výrobku, fáza používania, fáza konca životnosti, referenčná prevádzková životnosť (RSL);
- pravidlá výpočtu LCA: deklarovaná jednotka/funkčná jednotka, hranica systému, odhad a predpoklady, pravidlá alokovania, zdroje údajov a kvalita údajov, alokácia, scenáre LCA a ďalšie technické informácie;
- výsledky LCA: využitie zdrojov, výstupné toky a produkcia odpadu, vplyvy na životné prostredie;
- interpretácia výsledkov: analýza výsledkov LCA;
- informácie o transparentnosti: ďalšie environmentálne informácie, ktoré nie sú odvodené z výsledkov LCA, výpočty;
- referencie.

Tabuľka 3.2 prezentuje základné indikátory environmentálnych dopadov podľa EN 15804+A2.

Tabuľka 3.2 Základné indikátory environmentálnych dopadov

Kategória	Indikátor	Jednotka
Klimatická zmena – celkom	Potenciál globálneho otepľovania - celkový (GWP-celkový)	kg CO _{2eq.}
Klimatická zmena – fosílna	Potenciál globálneho otepľovania - fosílna palivá (GWP-fosílny)	kg CO _{2eq.}
Klimatická zmena – biogénna	Potenciál globálneho otepľovania - biogénny (GWP-biogénny)	kg CO _{2eq.}
Klimatická zmena – využívanie krajiny a zmena vo využívaní krajiny	Potenciál globálneho otepľovania - využívanie krajiny a zmena vo využívaní krajiny (GWP- LULUC)	kg CO _{2eq.}
Narušovanie ozónu	Potenciál narušovania ozónovej vrstvy (ODP)	kg CFC11 ekv.
Acidifikácia	Potenciál acidifikácie, Nadmerné nahromadenie (AP)	mol H ⁺ ekv.

Eutrofizácia sladkovodná	Potenciál eutrofizácie, časť živín, ktoré sa dostanú do sladkých vôd (EP - sladkovodná)	kg PO ₄ ekv.
Eutrofizácia morská	Potenciál eutrofizácie, časť živín, ktoré sa dostanú do morských vôd (EP - morská)	kg N ekv.
Eutrofizácia suchozemská	Potenciál eutrofizácie, Nadmerné nahromadenie (EP - suchozemská)	mol N ekv.
Tvorba fotochemických oxidantov	Potenciál tvorby fotochemických oxidantov (POCP)	kg NMVOC ekv.
Abiotické vyčerpávanie zdrojov - minerály a kovy	Potenciál vyčerpávania abiotických zdrojov - nefosílné zdroje (ADP - minerály a kovy)	kg Sb ekv.
Abiotické vyčerpávanie zdrojov - fosílna palivá	Potenciál vyčerpávania abiotických zdrojov - fosílna zdroje (ADP – fosílna palivá)	MJ
Využívanie vody	Potenciál nedostatku vody, deprivačne vážená spotreba vody	m ³ ekv. ned.

EPD overené nezávislou treťou stranou a spracované podľa Všeobecných pravidiel programu (General Programme Instructions, GPI) a základných pravidiel pre skupiny výrobkov, sa môžu registrovať a publikovať v medzinárodných databázach. Medzi známe databázy patria napr.:

- International EPD System, www.environdec.com
- IBU <https://ibu-epd.com/>
- EPD-Norway, www.epd-norge.no
- EPD Hub, www.epdhub.com
- EPD Italy, www.epditaly.it
- CENIA, www.cenia.cz
- EPD Ireland, www.igbc.ie/epd-home
- epddanmark, www.epddanmark.dk
- epdsquare, www.epdsquare.com

Platnosť EPD je po dobu piatich rokov. Počas tejto doby je možné vykonať revíziu, a to v prípade zmien napr. vo výrobnom procese, ktoré spôsobia väčšie rozdiely vo výsledkoch environmentálnych dopadov. Presné požiadavky týkajúce sa revidovania EPD sú uvedené vo Všeobecných pravidlách prevádzkovateľov programov.

Cieľom environmentálneho vyhlásenia o produkte je prispieť k väčšej transparentnosti výrobkov, umožniť porovnávanie výrobkov s rovnakou funkciou a tým poskytnúť zákazníkovi možnosť výberu výrobkov s nižšími kvantifikovanými environmentálnymi indikátormi počas ich celého životného cyklu. Zároveň nútia výrobcov prehodnocovať ich činnosť a znižovať vplyv výroby a dodávateľských reťazcov na životné prostredie.

Literatúra:

1. STN EN ISO 14040:2007 Environmentálne manažérstvo. Posudzovanie životného cyklu. Princípy a štruktúra.
2. STN EN ISO 14044:2007 Environmentálne manažérstvo. Posudzovanie životného cyklu. Požiadavky a pokyny.
3. STN EN ISO 14020:2023 Environmentálne výroky a programy pre produkty. Zásady a všeobecné požiadavky (ISO 14020: 2022)
4. STN EN ISO 14025:2008 Environmentálne značky a vyhlásenia. Environmentálne vyhlásenia typu III. Zásady a postupy (ISO 14025: 2006)
5. STN EN 15804:2012+A2:2019+AC:2021 Trvalá udržateľnosť výstavby. Environmentálne vyhlásenia o produktoch. Základné pravidlá skupiny stavebných produktov.
6. Blichová, Z. Výskum a analýza životného cyklu budov. Dizertačná práca. Stavebná fakulta, TUKE, 2023, 145 s.

4 KLÚČOVÉ STAVEBNÉ MATERIÁLY

Stavebné materiály predstavujú základný prvok každej stavby a významne ovplyvňujú jej technické, ekonomické a environmentálne parametre počas celého životného cyklu. Výber vhodných materiálov determinuje nielen únosnosť, trvanlivosť a bezpečnosť konštrukcie, ale aj jej energetickú efektívnosť, náročnosť údržby a celkovú uhlíkovú stopu. V súčasnosti sa pri hodnotení stavebných materiálov čoraz viac uplatňuje princíp udržateľnej výstavby, ktorý zohľadňuje environmentálne dopady spojené s ťažbou surovín, výrobou, dopravou,

Cement a betón patria medzi najpoužívanejšie stavebné materiály na svete. Betón sa vyznačuje vysokou pevnosťou v tlaku, dobrou trvanlivosťou, požiarnou odolnosťou a širokými možnosťami využitia v pozemnom aj inžinierskom staviteľstve. Jeho hlavnou zložkou je cement, ktorého výroba predstavuje významný zdroj emisií skleníkových plynov.

Oceľ predstavuje kľúčový konštrukčný materiál využívaný najmä pri výstavbe výškových budov, priemyselných objektov, mostov a dopravnej infraštruktúry. Medzi jej hlavné výhody patrí vysoká pevnosť, tvárnosť, presnosť prefabrikácie a možnosť opätovného použitia.

Murovacie materiály, ako sú pálené tehly, pórobetónové tvárnice alebo vápenno-pieskové bloky, sa využívajú predovšetkým pri výstavbe obvodových a vnútorných stien. Ich výber závisí od požadovaných mechanických vlastností, tepelnoizolačných parametrov a akustických požiadaviek.

Tepelnoizolačné materiály zohrávajú zásadnú úlohu pri znižovaní spotreby energie počas prevádzky budov. Medzi najčastejšie používané patria minerálna vlna, expandovaný polystyrén (EPS), extrudovaný polystyrén (XPS), drevovláknité dosky a celulózová izolácia.

Drevo sa v súčasnosti považuje za jeden z najperspektívnejších stavebných materiálov z hľadiska udržateľnosti. Ide o obnoviteľný materiál, ktorý počas svojho rastu viaže oxid uhličitý z atmosféry a umožňuje dlhodobé ukladanie uhlíka v stavebných konštrukciách.

Výber vhodných stavebných materiálov si vyžaduje komplexné posúdenie ich technických, ekonomických a environmentálnych charakteristík počas celého životného cyklu. Uplatňovanie princípov obehového hospodárstva, využívanie recyklovaných surovín a preferovanie materiálov s nižšou uhlíkovou stopou predstavujú dôležité nástroje na dosiahnutie cieľov udržateľnej výstavby.

Nasledujúce kapitoly poskytujú prehľad výrobných procesov vybraných stavebných materiálov, analyzujú ich vplyv na uhlíkovú stopu počas životného cyklu a predstavujú technológie a opatrenia podporujúce dekarbonizáciu stavebného sektora.

4.1 Kamenivo

Stavebný sektor patrí medzi najvýznamnejších spotrebiteľov prírodných zdrojov na svete. Výstavba infraštruktúry, budov a dopravných systémov vyžaduje veľké množstvo materiálov, medzi ktoré patrí najmä betón, oceľ, asfalt a kamenivo. Kamenivo predstavuje základnú surovinu stavebného priemyslu a používa sa najmä pri výrobe betónu, asfaltových zmesí, cestných konštrukcií a železničných násypov.

4.1.1 Definícia a druhy kameniva

Kamenivo je sypký materiál pozostávajúci z prírodných alebo umelo drvených minerálnych častíc rôznej veľkosti. Prírodné kamenivo, ako sú drvené kamene, štrk a piesok, predstavuje základné nerastné suroviny získavané zo Zeme. Tieto materiály sa upravujú drvením hornín alebo spracovaním prirodzene sa vyskytujúcich nespevnených štrkových a pieskových sedimentov [1,2]. V stavebníctve sa používa najmä ako základná zložka betónu a asfaltových zmesí. V prípade betónu môže kamenivo tvoriť až 60 – 80 % jeho objemu, čím významne ovplyvňuje jeho vlastnosti aj environmentálny profil [3].

Medzi hlavné druhy kameniva patria:

- prírodné kamenivo (štrk, piesok, riečne alebo morské sedimenty),
- drvené kamenivo (drvený vápenec, drvená žula, čadičové kamenivo),
- recyklované kamenivo (drvený stavebný odpad, recyklovaný betón, recyklovaný asfalt).

Používanie recyklovaného kameniva je považované za dôležitý krok smerom k obehovému hospodárstvu v stavebníctve [4].

Ťažba, spracovanie, manipulácia a využívanie kameniva je však spojené s významnou spotrebou energie. Odhaduje sa, že tieto procesy predstavujú približne 7 % globálnej spotreby energie súvisiacej so stavebným sektorom [5]. Celosvetová spotreba kameniva sa každoročne odhaduje približne na 50 miliárd ton, čo z neho robí jeden z najviac využívaných materiálov na svete [6]. Rastúci dopyt po stavebných materiáloch je úzko spojený s urbanizáciou, rozvojom infraštruktúry a ekonomickým rastom. Stavebný sektor spotrebúva takmer 40 % celosvetovej produkcie kameňa, štrku a piesku, čo poukazuje na jeho dominantné postavenie v dopyte po týchto surovinách [7, 8].

Predpokladá sa, že globálna ťažba kameniva pre potreby stavebníctva bude v budúcnosti naďalej rásť. Odhady naznačujú, že objem ťažby sa môže zvýšiť zo súčasných približne 30 miliárd ton na približne 55 miliárd ton ročne do roku 2060 [9]. Takýto výrazný nárast spotreby má významné environmentálne dôsledky. Ťažba, spracovanie a transport veľkých objemov kameniva totiž výrazne ovplyvňujú prírodné prostredie a krajinu [10,11].

Závislosť stavebného sektora od primárnych prírodných agregátov je z dlhodobého hľadiska problematická, keďže ide o neobnoviteľné zdroje [6]. Napriek tomu, že kamenivo patrí medzi najviac využívané materiály na svete a jeho spotreba neustále rastie, poznatky o jeho environmentálnych dopadoch počas celého životného cyklu sú stále obmedzené a do určitej miery neisté [12,13]. Z tohto dôvodu je identifikácia environmentálne udržateľných zdrojov a spôsobov využívania kameniva dôležitá pre rozhodovanie v stavebnom a ťažobnom priemysle. Hodnotenie environmentálnych dopadov ťažby a spracovania kameniva tak predstavuje významný nástroj pri smerovaní stavebného sektora k udržateľnejšiemu využívaniu prírodných zdrojov.

4.1.2 Uhlíková stopa kameniva

Aj keď má kamenivo relatívne nízku uhlíkovú stopu v porovnaní s materiálmi ako cement alebo oceľ, jeho environmentálny dopad je významný vzhľadom na obrovské množstvo spotreby. Podľa databázy Inventory of Carbon and Energy (ICE) je typická uhlíková stopa prírodného

kameniva približne 6 – 8 kg CO₂ na tonu materiálu, pričom ide o hodnotu vyjadrenú v rámci tzv. „cradle-to-gate“ životného cyklu.

Pri kamenive zahŕňa uhlíková stopa najmä tieto fázy: ťažbu v lome alebo štrkovisku, drvenie a triedenie materiálu, dopravu na stavenisko, manipuláciu a spracovanie.

Ťažba kameniva prebieha v lomoch alebo štrkoviskách pomocou ťažkej mechanizácie. Hlavným zdrojom emisií je spotreba fosílnych palív, najmä nafty, v stavebných strojoch ako sú rýpadlá, nakladače alebo vrtné zariadenia. Podľa analýz environmentálneho profilu ťažby predstavuje fáza ťažby približne 20 – 40 % celkových emisií CO₂ spojených s výrobou kameniva [14].

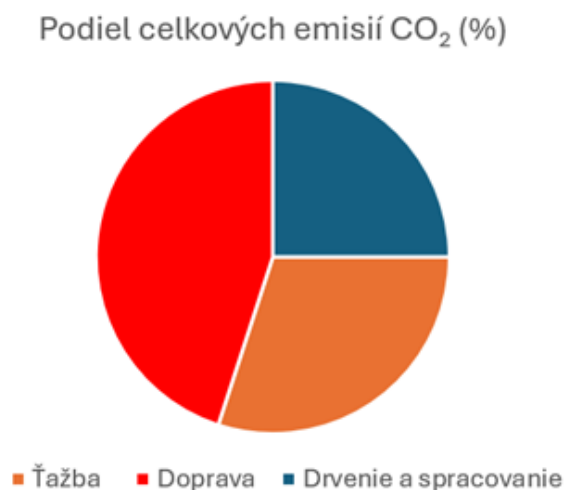
Po vyťažení sa hornina spracováva drvením a triedením na požadované frakcie. Tento proces je energeticky náročný najmä kvôli elektrickým drvičom a triediacim zariadeniam. Spotreba energie závisí od viacerých faktorov: tvrdosť horniny, požadovaná veľkosť frakcie a použitá technológia. Výskum analyzujúci uhlíkovú stopu kameniva ukazuje, že medzi hlavné zdroje emisií patria: spotreba elektrickej energie pri drvení, spotreba nafty pri Transporte a manipulácia so surovinou. Štúdia z oblasti stavebných materiálov uvádza, že uhlíková stopa hrubého kameniva môže dosahovať približne 1,5 kg CO₂ na tonu materiálu, pričom významnú časť emisií spôsobuje spotreba elektrickej energie počas drvenia [15]. Podľa databázy Inventory of Carbon and Energy (ICE) predstavuje spotreba energie pri spracovaní významnú časť uhlíkovej stopy kameniva [16].

Doprava patrí medzi najvýznamnejšie zdroje emisií pri kamenive. Ide o materiál s relatívne nízkou hodnotou, ale vysokou hmotnosťou, čo znamená, že transport na väčšie vzdialenosti výrazne zvyšuje jeho uhlíkovú stopu. Emisie z dopravy závisia najmä od: vzdialenosti medzi lomom a stavbou, typu dopravného prostriedku a množstva prepravovaného materiálu

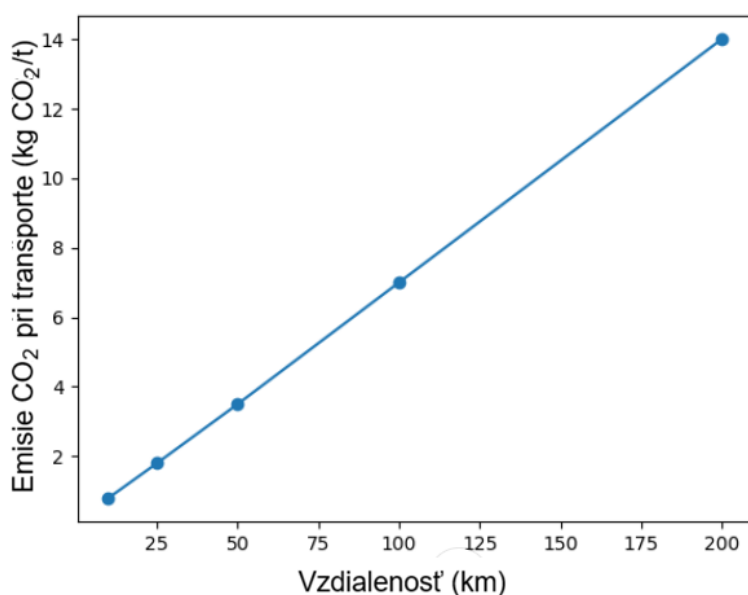
Pri cestnej doprave môžu emisie dosahovať približne 3 – 5 kg CO_{2eq} na tonu materiálu pri Transporte na vzdialenosť okolo 50 km [16].

Keďže kamenivo nevyžaduje chemickú výrobu ani vysoké teploty, jeho uhlíková stopa je relatívne nízka. Napriek tomu sa kvôli veľkým objemom spotreby kumulatívne emisie stávajú významnými [17].

Na obrázku 4.1.1 je znázornený podiel jednotlivých fáz výroby na celkovej uhlíkovej stope kameniva. Z grafu je zrejmé, že doprava predstavuje najväčší zdroj emisií, najmä pri preprave kameniva na veľké vzdialenosti (Obrázok 4.1.2).



Obrázok 4.1.1 Podiel jednotlivých fáz výroby na celkovej uhlíkovej stope kameniva



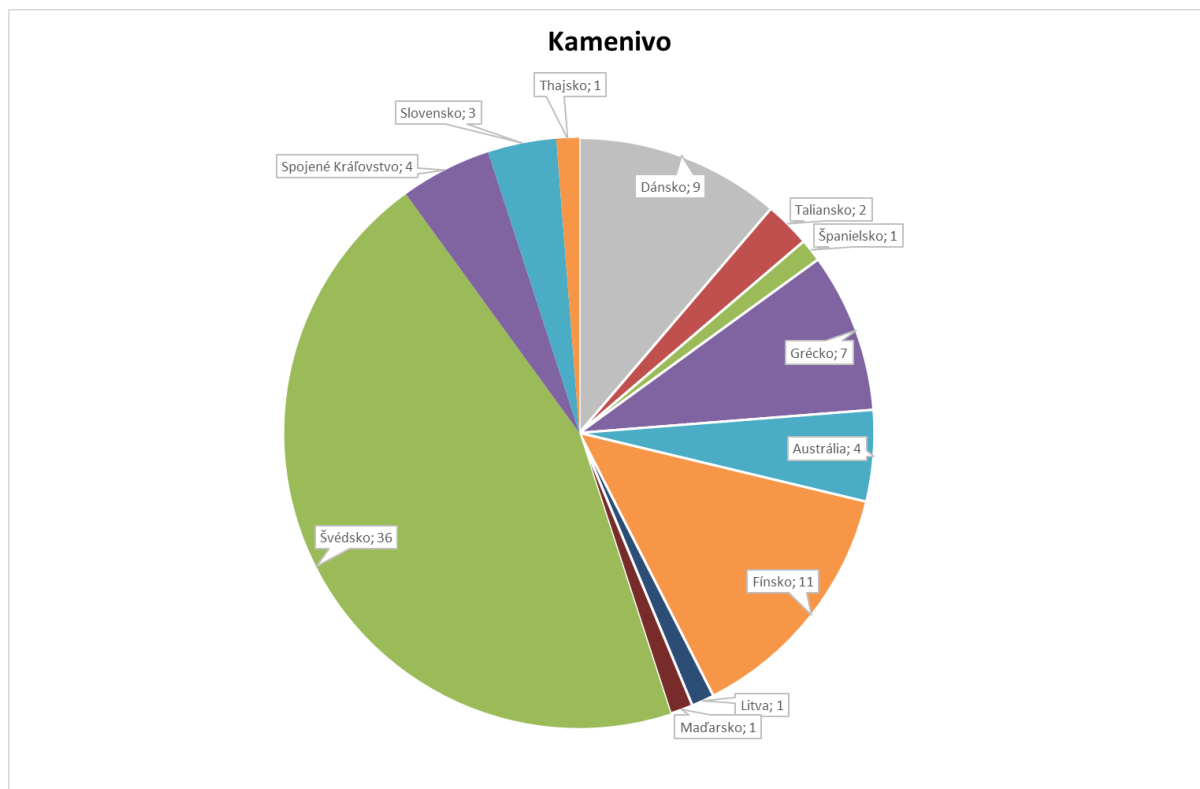
Obrázok 4.1.2 Vplyv transportu kameniva na väčšie vzdialenosti na emisie CO₂

4.1.3 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG kameniva v hodnotených krajinách

Pri spracovaní analýzy boli využité rôzne databázy environmentálnych vyhlásení o produktoch (EPD), ktoré obsahujú environmentálne údaje o kamenivách od viacerých výrobcov a z rôznych krajín. Na základe získaných údajov bola vykonaná analýza 80-tich dostupných EPD pre kamenivá v jednotlivých krajinách (Obrázok 4.1.3), čo umožnilo posúdiť rozsah a úroveň dostupnosti environmentálnych informácií v oblasti výroby kameniva. Následne boli z analyzovaných EPD vyhodnotené hodnoty indikátora GWP-GHG pre fázy životného cyklu A1–A3, ktoré reprezentujú emisie skleníkových plynov vznikajúce pri ťažbe, spracovaní a doprave kameniva v rámci výrobného procesu. Porovnaním údajov medzi jednotlivými krajinami bolo možné určiť úroveň uhlíkovej stopy kamenív a identifikovať rozdiely vyplývajúce najmä z použitých technológií ťažby a spracovania, energetického mixu, dopravných vzdialeností a typu kameniva. Výsledná analýza poskytuje prehľad o environmentálnych parametroch kamenív v medzinárodnom kontexte a vytvára podklad pre hodnotenie možností znižovania emisií CO₂ v oblasti výroby stavebných materiálov a udržateľnej výstavby.

Tabuľka 4.1.1 prezentuje základné štatistické vyhodnotenie environmentálnych indikátorov GWP pre analyzované kamenivá. Priemerná hodnota ukazovateľa GWP-GHG dosahuje 2,88 kg CO_{2eq}/t, pričom medián má rovnakú hodnotu. Táto zhoda naznačuje veľmi rovnomerné rozdelenie údajov bez výrazného vplyvu extrémnych hodnôt. Rozsah hodnôt GWP-GHG sa pohybuje od 0,402 do 7,16 kg CO_{2eq}/t, čo poukazuje na relatívne nízku variabilitu environmentálnych parametrov kamenív. Rozdiely medzi hodnotami môžu byť spôsobené najmä energetickou náročnosťou ťažby, spracovania, triedenia a dopravy kameniva. Hodnoty GWP-fosílny sú takmer identické s celkovým GWP, čo potvrdzuje, že dominantný podiel emisií pochádza zo spotreby fosílnych palív a elektrickej energie pri technologických procesoch výroby kameniva. Priemerná hodnota GWP-fosílny dosahuje 2,85 kg CO_{2eq}/t. Biogénna zložka GWP vykazuje zanedbateľné hodnoty. Priemerná hodnota predstavuje len 0,00113 kg CO_{2eq}/t a medián je nulový, čo znamená, že biogénne procesy prakticky nemajú vplyv na environmentálnu stopu kameniva. Priemerná hodnota predstavuje len 0,00113 kg CO_{2eq}/t a medián je nulový, čo znamená, že biogénne procesy prakticky nemajú vplyv na

environmentálnu stopu kameniva. Ukazovateľ GWP-LULUC, ktorý zahŕňa emisie súvisiace so zmenou využívania pôdy, dosahuje veľmi nízke hodnoty. Priemerná hodnota je 0,0116 kg CO_{2eq}/t a maximálna hodnota 0,138 kg CO_{2eq}/t, čo naznačuje minimálny význam tejto zložky pri hodnotení celkových environmentálnych dopadov kamenív. Celkovo výsledky potvrdzujú, že kamenivá patria medzi stavebné materiály s veľmi nízkou uhlíkovou stopou. Environmentálna záťaž je tvorená predovšetkým fosílnymi emisiami spojenými s ťažbou a spracovaním materiálu, zatiaľ čo ostatné zložky GWP majú len zanedbateľný význam.



Obrázok 4.1.3 Prehľad počtu EPD pre kamenivo v hodnotených krajinách (Zdroj: autori)

Tabuľka 4.1.1 GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre kamenivo

	GWP-celkový (kgCO _{2eq} /t)	GWP-fosílny (kgCO _{2eq} /t)	GWP-biogénny (kgCO _{2eq} /t)	GWP-LULUC (kgCO _{2eq} /t)	GWP-GHG (kgCO _{2eq} /t)
Priemer	2,86	2,85	0,00113	0,0116	2,88
Min	0,376	0,355	0,000	-0,00009	0,402
Max	7,14	7,04	0,0195	0,138	7,16
Medián	2,84	2,81	0	0,001605	2,88

4.1.4 Ťažba kameniva na Slovensku

Ťažba kameniva patrí medzi významné odvetvia slovenského nerastného hospodárstva a predstavuje dôležitý zdroj surovín pre stavebný priemysel, dopravnú infraštruktúru a výrobu betónov. Kamenivo je základnou zložkou betónových zmesí a jeho kvalita významne ovplyvňuje mechanické vlastnosti, trvanlivosť aj environmentálne parametre stavebných

materiálov. Na Slovensku sa ťažia najmä prírodné ťažené kamenivá (štrky a piesky) a drvené kamenivá získavané v lomoch [18].

Z geologického hľadiska disponuje Slovensko priaznivými podmienkami pre ťažbu rôznych druhov kameniva. Štrkopiesky sa získavajú najmä z riečnych sedimentov veľkých vodných tokov, predovšetkým v oblasti Dunaja, Váhu, Moravy a Bodrogu. Významné ložiská sa nachádzajú najmä na juhozápadnom Slovensku, kde sú prevádzkované viaceré štrkovne zamerané na produkciu prírodného kameniva pre výrobu betónov a dopravné stavby. Významnú úlohu zohrávajú najmä lokality v Podunajskej nížine, kde sa nachádzajú rozsiahle zásoby kvalitných štrkopieskov vhodných pre stavebné využitie [19].

Okrem prírodného kameniva je významná aj ťažba drveného kameniva, ktoré sa získava odstreľom a mechanickým spracovaním hornín v kameňolomoch. Najčastejšie sa využívajú horniny ako vápenec, dolomit, andezit, granodiorit, čadič alebo žula, pričom výber závisí od geologických podmienok konkrétneho regiónu a požadovaných technických vlastností materiálu. Drvené kamenivo sa používa predovšetkým v cestnom staviteľstve, železničnom spodku, pri výrobe asfaltových zmesí a vysokopevnostných betónov. Napríklad granodiorit a andezit sa vyznačujú vysokou pevnosťou a odolnosťou voči mechanickému opotrebeniu, čo ich predurčuje na náročné dopravné stavby [20].

Proces ťažby kameniva zahŕňa niekoľko technologických krokov. Pri štrkopieskoch ide najmä o bagrovanie alebo mokrú ťažbu, po ktorej nasleduje triedenie, pranie a úprava frakcií podľa požiadaviek trhu. Pri lomovom kamenive sa využíva trhacia technika, drvenie, triedenie a separácia jednotlivých frakcií. Výsledné kamenivo musí spĺňať technické normy kvality podľa európskych a slovenských technických predpisov pre použitie v betónoch a stavebných konštrukciách [19].

Ťažba kameniva však prináša aj environmentálne výzvy. Medzi hlavné negatívne vplyvy patrí záber krajiny, prašnosť, hluk, zásahy do vodného režimu a lokálne zmeny biodiverzity. Z tohto dôvodu sú súčasťou ťažobnej činnosti rekultivačné opatrenia, ktorých cieľom je obnova územia po ukončení ťažby. V prípade štrkovísk často vznikajú vodné plochy využiteľné na rekreáciu alebo ekologické účely. Moderné spoločnosti pôsobiace v sektore kameniva zároveň čoraz viac implementujú princípy environmentálne zodpovednej ťažby a optimalizácie dopravy surovín s cieľom znižovať uhlíkovú stopu výroby stavebných materiálov [18].

Z hľadiska stavebníctva zostáva kamenivo strategickou surovinou, keďže tvorí približne 60–80 % objemu betónu a jeho dostupnosť významne ovplyvňuje ekonomiku aj environmentálne dopady stavebných projektov. Regionálna dostupnosť kvalitných zdrojov kameniva na Slovensku preto predstavuje dôležitý faktor pri optimalizácii výroby betónov a znižovaní emisií spojených s dopravou materiálov [20].

Analýza uhlíkovej stopy pálených tehál firmy Wienerberger s.r.o. bola spracovaná riešiteľským kolektívom a je uvedená v Tabuľke 7.1.

Environmentálne vyhlásenia o produkte (Environmental Product Declaration EPD) slovenských producentov kameniva, ktoré boli spracované riešiteľským kolektívom, uvádzajú hodnoty indikátora GWP-GHG v module A1–A3 pre rôzne druhy kameniva používaného v stavebníctve (Tabuľka 4.1.2). Ukazovateľ GWP-GHG vyjadruje potenciál globálneho otepľovania spôsobený emisiami skleníkových plynov počas fázy získavania surovín, dopravy a výroby materiálu, pričom hodnoty sú vyjadrené v kg CO_{2eq}/t.

Z porovnávaných druhov kameniva dosahujú prírodné kamenivá hodnotu 2,35 kg CO_{2eq}/t, pričom rovnaká hodnota bola zaznamenaná v oboch prípadoch uvedených v tabuľke. Táto úroveň predstavuje strednú environmentálnu záťaž v rámci analyzovaných materiálov.

Najnižšia hodnota bola zaznamenaná pri piesku a štrku, konkrétne 2,07 kg CO_{2eq}/t. Nižšie emisie možno vysvetliť tým, že tento druh kameniva často vyžaduje menej energeticky náročné spracovanie. Ťažba piesku a štrku zvyčajne zahŕňa mechanickú alebo mokrú ťažbu, po ktorej nasleduje triedenie a minimálna úprava materiálu, bez potreby intenzívneho drvenia hornín.

Naopak, drvené kamenivo vykazuje najvyššiu hodnotu 2,84 kg CO_{2eq}/t, čo predstavuje približne o 37 % vyššiu hodnotu v porovnaní s pieskom a štrkom. Vyššia uhlíková stopa je pravdepodobne dôsledkom energeticky náročnejšieho výrobného procesu, ktorý zahŕňa odstrel hornín, viacstupňové drvenie, triedenie a úpravu frakcií. Tieto technologické operácie si vyžadujú vyššiu spotrebu energie a mechanizácie, čo vedie k vyšším emisiám CO_{2eq}.

Tabuľka 4.1.2 GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre kamenivo v SR

Výrobca	EPD registračné číslo	Kamenivo	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /t)
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-061	Prírodné kamenivo (Bratislava - Petržalka)	2,35
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-062	Prírodné kamenivo (Puste Úľany, Vysoká pri Morave)	2,35
Danucem Slovensko a.s.	SQ 00-058	Piesok a štrk	2,07
Danucem Slovensko a.s.	SQ 00-057	Drvené kamenivo	2,84
PREFA invest, a.s.	SQ 00-041	Kamenivo a nestmelené zmesi	3,30
Priemer			2,58
Min			2,07
Max			3,30
Medián			2,35

Hodnoty potenciálu globálneho otepľovania GWP-GHG pre fázy A1–A3 v rozmedzí 2,07 až 3,30 kg CO_{2eq}/t poukazujú na relatívne nízku uhlíkovú náročnosť výroby kameniva v porovnaní s ostatnými stavebnými materiálmi, ako sú cement, betón, oceľ alebo hliník.

Vypočítaný priemer 2,58 kg CO_{2eq}/t a medián 2,35 kg CO_{2eq}/t naznačujú nízku variabilitu sledovaných údajov. Rozdiel medzi minimálnou a maximálnou hodnotou predstavuje 1,23 kg CO_{2eq}/t, čo môže byť spôsobené odlišnými technologickými postupmi pri ťažbe a spracovaní kameniva, rozdielnou energetickou náročnosťou drvenia, triedenia a dopravy v rámci výrobných procesov, ako aj odlišným energetickým mixom použitým v jednotlivých prevádzkach.

V porovnaní s ostatnými zložkami betónu, najmä cementom, predstavuje kamenivo významne nižší podiel na celkovej uhlíkovej stope betónu, napriek tomu však môže vhodný výber lokálne dostupného a menej energeticky náročného kameniva prispieť k čiastočnej optimalizácii environmentálnych dopadov stavebných materiálov.

4.1.5 Opatrenia na dekarbonizáciu kameniva

Kamenivo predstavuje základnú surovinu stavebného priemyslu a tvorí významnú časť materiálovej spotreby pri výstavbe. Hoci jeho uhlíková stopa je v porovnaní s materiálmi, ako sú cement alebo oceľ, relatívne nízka, jeho celkový environmentálny dopad je značný vzhľadom na obrovské objemy spotreby, ktoré presahujú 40 miliárd ton ročne.

Tabuľka 4.1.3 GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre kamenivo v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050

Kamenivo	EPD registračné číslo	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /t)	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /t) 2030	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /t) 2050
Prírodné kamenivo (Bratislava - Petržalka)	SQ 00-061	2,35	0,99	0,49
Prírodné kamenivo (Puste Úľany, Vysoká pri Morave)	SQ 00-062	2,35	0,99	0,49
Piesok a štrk	SQ 00-058	2,07	0,39	0,19
Drvené kamenivo	SQ 00-057	2,84	0,53	0,26
Kamenivo a nestmelené zmesi	SQ 00-041	3,30	1,06	0,53

Tabuľka 4.1.3 prezentuje hodnoty GWP-GHG pre roky 2030 a 2050 podľa predpokladaných emisných faktorov pre elektrinu s hodnotou 0,08 kg CO_{2eq}/kWh v roku 2030 a 0,04 kg CO_{2eq}/kWh v roku 2050 [21]. Predpokladané percentuálne zníženie emisií v roku 2030 je v rozsahu od 58% do 81% a v roku 2050 je od 79% do 91% v porovnaní s emisným faktorom pre „elektrina, vysoké napätie, mix, Slovenská republika“ s hodnotou 0,19 kg CO_{2eq}/kWh, „elektrina, stredné napätie, mix, Slovenská republika“ s hodnotou 0,25 kg CO_{2eq}/kWh a pre „elektrina, Slovensko, reziduálny mix“ s hodnotou 0,43 kg CO_{2eq}/kWh podľa Ecoinvent 3.11.

Najväčší podiel emisií je spojený najmä s ťažbou, spracovaním a predovšetkým dopravou kameniva. Znižovanie jeho uhlíkovej stopy je preto možné dosiahnuť optimalizáciou logistických procesov, využívaním recyklovaných materiálov a zavádzaním efektívnejších a modernejších výrobných technológií.

Efektívne riadenie týchto procesov môže významne prispieť k redukcii emisií skleníkových plynov v stavebníctve a podporiť prechod k udržateľnejšiemu a environmentálne zodpovednému stavebnému sektoru.

Literatúra

1. Langer, W. Sustainability of aggregates in construction. In Sustainability of Construction Materials; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 181–207.
2. Linares, R.; López-Uceda, A.; Piccinali, A.; Martínez-Ruedas, C.; Galvín, A.P. LCA applied to comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2024, 31, 44023–44035.
3. Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement & Concrete Composites* 51 (2014) 38–48

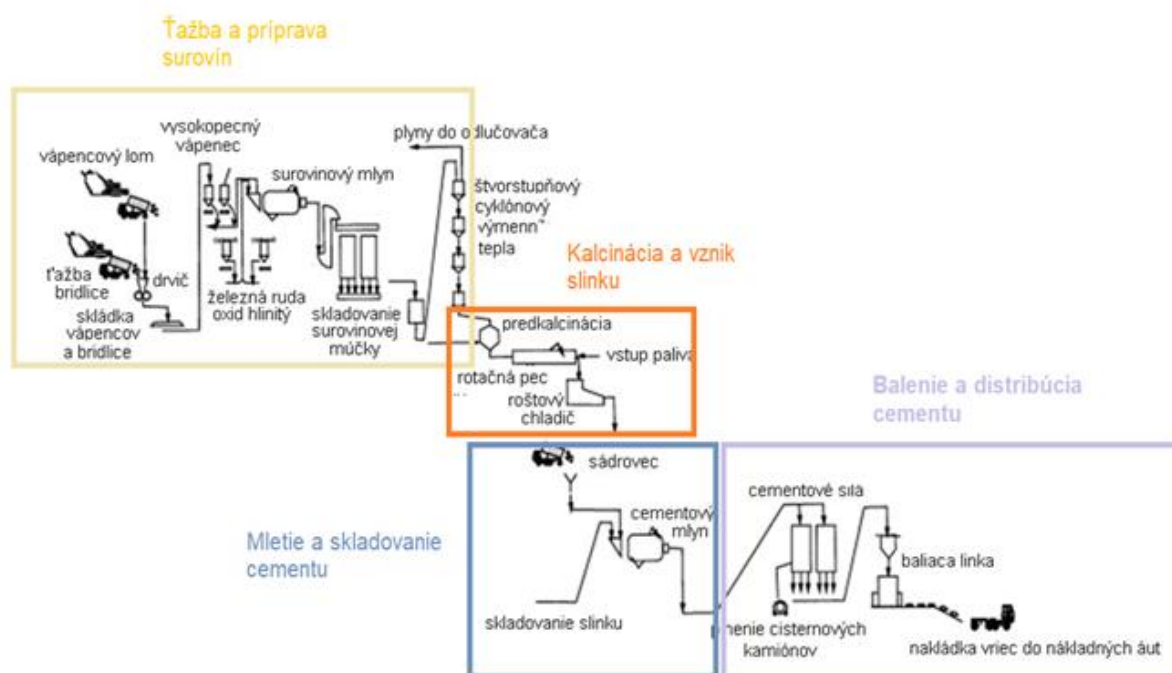
4. Blengini, G., & Garbarino, E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 1021–1030
5. Hossain, M.U.; Poon, C.S.; Lo, I.M.C.; Cheng, J.C.P. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resour. Conserv. Recycl.* 2016, 109, 67–77.
6. Perkins, L.; Royal, A.C.D.; Jefferson, I.; Hills, C.D. The Use of Recycled and Secondary Aggregates to Achieve a Circular Economy within Geotechnical Engineering. *Geotechnics* 2021, 1, 416–438.
7. Leonard. The Future of Sustainable Construction: Innovative Materials; Vinci SA: Nanterre, France, 2023; pp. 1–26. Available online: https://leonard.vinci.com/wp-content/uploads/2023/10/HT-Leonard_Report-ShortV4-3.pdf
8. Dixit, M.K.; Fernández-Solís, J.L.; Lavy, S.; Culp, C.H. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy Build.* 2010, 42, 1238–1247.
9. OECD Global. Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences; OECD: Paris, France, 2019; ISBN 978-92-64-30744-5.
10. Abbas, A.; Fathifazl, G.; Isgor, O.; Razaqpur, A.; Fournier, B.; Foo, S. Environmental Benefits of Green Concrete. In Proceedings of the IEEE EIC Climate Change Technology Conference, EICCCC 2006, Ottawa, ON, Canada, 10–12 May 2006; IEEE: Ottawa, ON, Canada, 2006; pp. 1–8.
11. Gan, V.J.L.; Cheng, J.C.P.; Lo, I.M.C. Integrating life cycle assessment and multi-objective optimization for economical and environmentally sustainable supply of aggregate. *J. Clean. Prod.* 2016, 113, 76–85.
12. Miatto, A.; Schandl, H.; Fishman, T.; Tanikawa, H. Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals used for Construction. *J. Ind. Ecol.* 2017, 21, 924–937.
13. De Bortoli, A. Understanding the environmental impacts of virgin aggregates: Critical literature review and primary comprehensive life cycle assessments. *J. Clean. Prod.* 2023, 415, 137629.
14. European Aggregates Association (UEPG). (2022). *Environmental Profile of the European Aggregates Industry*.
15. Rossi, E.; Sales, A. Carbon footprint of coarse aggregate in Brazilian construction. *Construction and Building Materials*. 72 (2014) 333–339
16. Hammond, G., & Jones, C. (2011). *The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. University of Bath. ISBN-978 0 86022 703 8
17. World Resources Institute. (2020). *Global material use in the construction sector*.
18. <https://www.slovenske-strkopiesky.sk>
19. <https://betonserver.sk/>
20. <https://lomymtd.com>
21. https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en

4.2 Cement a betón

Cementársky a betónový priemysel (CCI) patrí vzhľadom na svoju veľkosť medzi odvetvia s najvyššími energetickými a klimatickými dopadmi. Betón je najpoužívanejší stavebný materiál na svete, najmä vďaka svojej odolnosti, univerzálnosti a možnosti výroby z relatívne lacných a ľahko dostupných surovín. Napriek tomu, že je nevyhnutným a všadeprítomným materiálom modernej spoločnosti, jeho výroba a používanie majú významný vplyv na životné prostredie. V roku 2020 dosiahli emisie CO_2 z výroby cementu a betónu približne 3,4 Gt CO_2 [1], čo predstavuje asi 10 % antropogénnych emisií CO_2 v danom roku. Väčšina týchto emisií pochádza z výroby cementu, ktorý slúži ako spojivo v betóne a predstavuje približne 77 % emisií CO_2 počas životného cyklu cementu a betónu. Samotný cement sa navyše v roku 2010 podieľal na približne 36 % všetkých emisií CO_2 súvisiacich so stavebným sektorom [2].

4.2.1 Výroba cementu

Podstata procesu výroby cementu je založená na rozklade uhličitanu vápenatého (CaCO_3) pri teplote nad 900°C , pričom vzniká oxid vápenatý (CaO – pálené vápno) a plyný oxid uhličitý (CO_2); tento proces je známy ako kalcinácia. Potom nasleduje proces tvorby slinku, pri ktorom vzniknutý oxid vápenatý reaguje pri vysokej teplote (zvyčajne $1\,400 - 1\,500^\circ\text{C}$) s oxidom kremičitým, oxidom hlinitým a oxidom železitým za vzniku kremičitanov a hlinitanov vápnika a železa, ktoré tvoria slinok. Slinok sa potom melie spolu so sadrou a inými prísadami za vzniku cementu (Obrázok 4.2.1).



Obrázok 4.2.1 Schéma výrobného procesu cementu [3]

Pri výrobe cementu sa môžu využívať štyri hlavné spôsoby: suchý, polosuchý, polomokrý a mokrý proces. Výber postupu je do značnej miery určený stavom surovín (suché alebo mokré). Veľká časť svetovej produkcie slinku je stále založená na mokrých procesoch. Mokré procesy sú energeticky náročnejšie, a tým aj drahšie. Avšak v Európe je viac ako 90 % výroby založených na suchých procesoch vďaka dostupnosti suchých surovín. Pri suchom procese sa suroviny melú a sušia na surovinovú múčku vo forme prášku. Suchá surovinová múčka sa pred procesom kalcinácie privádza do predhrievacej alebo predkalcinačnej pece. Polomokrý proces vyžaduje najskôr odvodnenie surovinového kalu vo filtračných lisoch. Výsledný filtračný

koláč sa extruduje na pelety a potom sa privádza buď do roštového predhrievača alebo priamo do sušiča filtračného koláča na výrobu surovej múčky. Pri mokrom procese sa suroviny (často s vysokým obsahom vlhkosti) melú vo vode, aby sa vytvorila čerpatelná kaša. Kal sa potom buď privádza priamo do pece alebo najskôr do sušiarne kalu.

Výrobný proces cementu pozostáva z niekoľkých krokov, ktoré zahŕňajú:

- ťažbu surovín,
- mletie surovín a homogenizácia surovín,
- kalcinácia uhličitanu vápenatého a vznik slinky,
- mletie a skladovanie cementu,
- balenie a distribúciu.

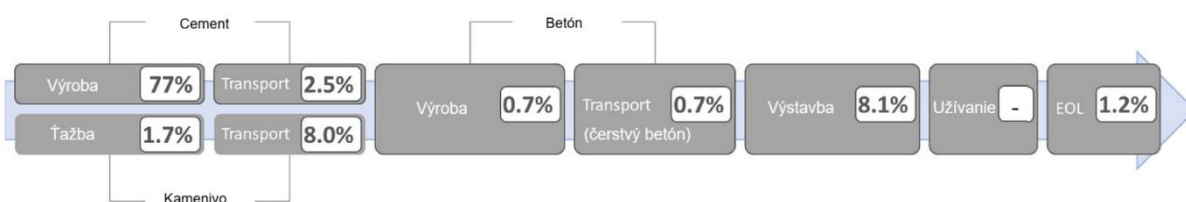
4.2.2 Výroba cementu vo svete

Podľa databázy GID Cement Emission Database (GCED) a ako je znázornené na obrázku 4.2.2, v roku 2019 existovalo vo svete 3620 závodov na výrobu cementu, ktoré spolu dosahovali celkovú výrobnú kapacitu približne 6230 Mt cementu ročne [4]. Cementársky a betónový priemysel, ktorý je neoddeliteľnou súčasťou globálneho rozvoja infraštruktúry, preto čelí rastúcej potrebe dekarbonizovať svoje prevádzky a produkty, ako aj podporovať dekarbonizáciu súvisiacich sektorov konečných používateľov [5].



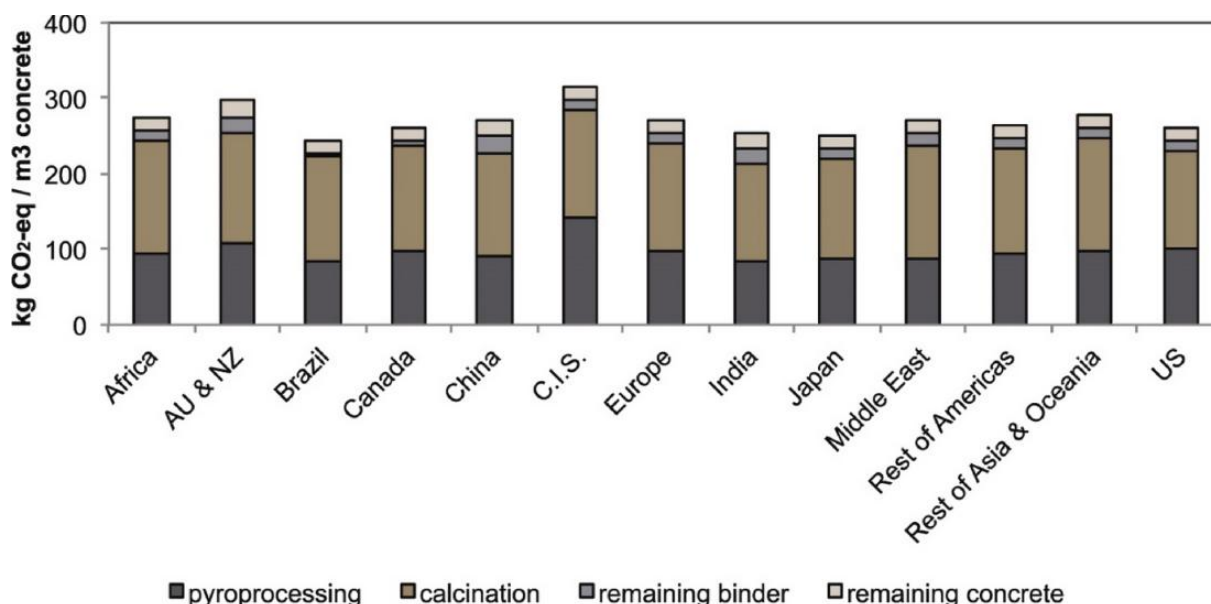
Obrázok 4.2.2 Mapa globálnej infraštruktúry výroby cementu v roku 2019, prevádzky kategorizované podľa veku (farba) a produkcie (veľkosť kruhu). Zdroj: [4]

Cement je najväčším zdrojom emisií CO₂, pričom jeho výroba generuje 800 - 900 kg CO₂ na tonu cementu. Ako je znázornené na obrázku 4.2.3, väčšina emisií v rámci hodnotového reťazca technológie výroby cementu a betónu pochádza z činností spojených s cementom (zahrňujúcich priame aj nepriame emisie súvisiace so spotrebou energie) [5].



Obrázok 4.2.3 Emisie CO₂ počas životného cyklu v hodnotovom reťazci cementu a betónu pre jednotlivé procesné kroky. EOL: koniec životnosti. Zdroj: [6].

Slinok tvorí približne 65-85% celkovej hmotnosti cementu, ale len asi 10 - 15 % hmotnosti betónu. Napriek tomu je 90-98% emisií skleníkových plynov počas životného cyklu výroby betónu [5,7], ako je znázornené na obrázku 4.2.4, spojených s výrobou cementového slinku (pyrospracovanie a kalcinácia). V USA bolo v roku 2003 zistené, že emisie špecifické pre betón predstavovali až 12% celkových emisií CO₂ v rámci cementového a betónového priemyslu [8], a novšia analýza životného cyklu z roku 2022 naznačuje, že tieto emisie môžu tvoriť menej ako 8 % celkových emisií [9]. Tento údaj je v súlade s odhadmi Svetového ekonomického fóra (WEF) [1] pre Scope 1, 2 a 3 emisií v rámci hodnotového reťazca cementu, ktoré udávajú 0,7-0,8 Gt CO₂ pre emisie Scope 3 (a približne 3,4 Gt CO₂ pre všetky tri Scope), z čoho asi 10-15 % pripadá na dopravu po výrobe a približne 35% na spracovanie predaných produktov (vrátane betónových výrobkov). Podľa Čínskej asociácie pre betón a výrobky na báze cementu bola výroba 5,51 Gt betónu v roku 2017 zodpovedná za emisie 0,83 Gt CO₂ v tom istom roku [10]. Výsledné hodnoty GHG betónu predstavujú približne 0,08-0,12 t CO₂/t betónu [11]. Preto sa väčšina diskusií o emisiách spojených s betónom zameriava na časť hodnotového reťazca súvisiacu s výrobou cementu [12].

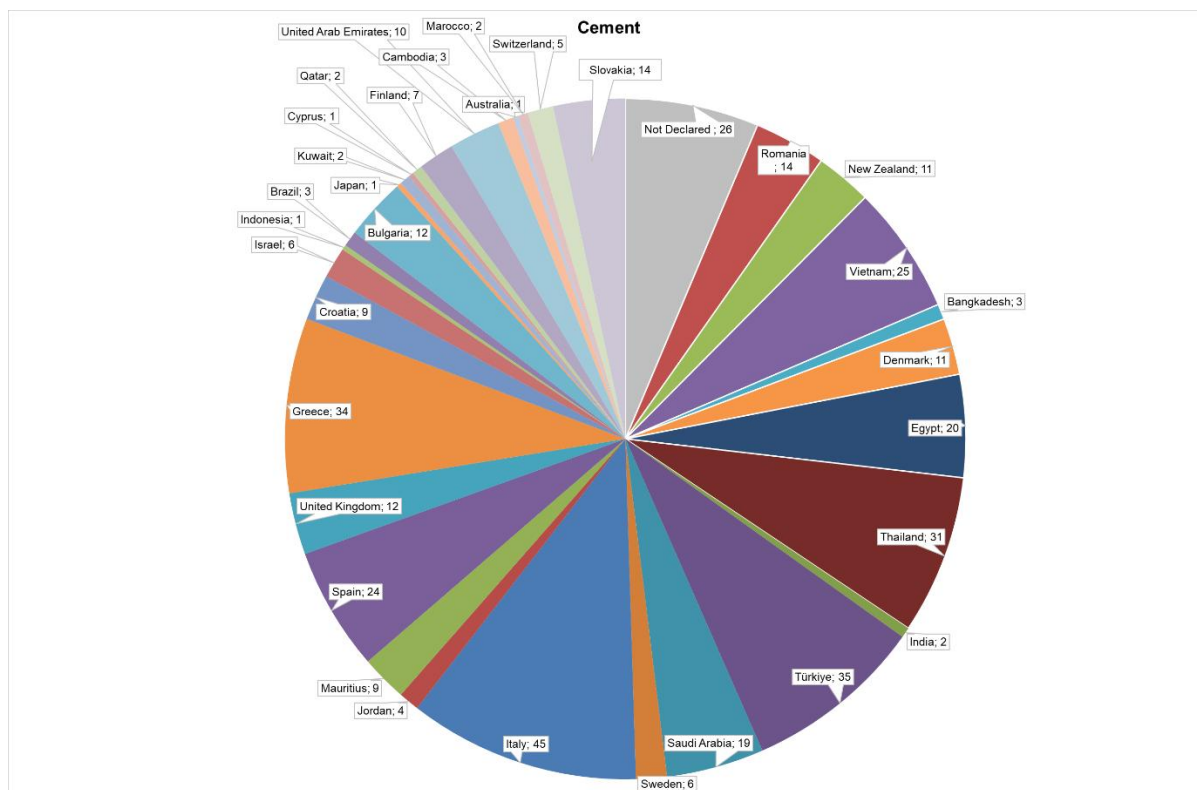


Obrázok 4.2.4 GHG emisie z betónových výrobkov v rôznych geografických oblastiach, odhad z roku 2016. Poznámka: C.I.S. – Spoločenstvo nezávislých štátov. Zdroj: [7].

4.2.3 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG cementov v hodnotených krajinách

Pri spracovaní analýzy boli využité rôzne databázy prevádzkovateľov programov (International EPD System, EPD Global, EPDSQUARE), v ktorých sú registrované a publikované Environmentálne vyhlásenia o produktoch (EPD) s kvantifikovanými údajmi o environmentálnych parametroch cementov od viacerých výrobcov a z rôznych krajín. Na základe získaných údajov bola vykonaná analýza počtu dostupných EPD pre cementy v jednotlivých krajinách, čím bolo možné identifikovať rozsah a úroveň dostupnosti environmentálnych informácií v rámci európskeho a celosvetového trhu. Následne boli z počtu 365 analyzovaných EPD (Obrázok 4.2.5) vyhodnotené hodnoty indikátora GWP-GHG pre fázu produktu (A1–A3), ktoré reprezentujú emisie skleníkových plynov vznikajúce počas výroby

cementu. Porovnaním údajov medzi jednotlivými krajinami bolo možné určiť úroveň uhlíkovej stopy cementov a identifikovať rozdiely vyplývajúce z výrobných technológií, energetického mixu, podielu slinku a využívania cementových prímiesí. Výsledná analýza poskytuje prehľad o environmentálnych parametroch cementov v medzinárodnom kontexte a vytvára podklad pre hodnotenie možností znižovania emisií CO_{2eq} v cementárskom priemysle.



Obrázok 4.2.5 Prehľad počtu EPD pre cementy v hodnotených krajinách (Zdroj: autori)

Tabuľka 4.2.1 prezentuje štatistické vyhodnotenie environmentálnych indikátorov GWP pre analyzovaný súbor cementov (365 EPD). Najdôležitejším ukazovateľom je hodnota GWP-GHG, ktorá predstavuje emisie skleníkových plynov vznikajúce počas výrobných procesov. Priemerná hodnota GWP-GHG dosahuje 693 kg CO_{2eq}/t cementu, pričom medián je veľmi podobný (681 kg CO_{2eq}/t). Táto podobnosť naznačuje relatívne rovnomerné rozloženie hodnôt bez výrazného skreslenia extrémnymi údajmi. Rozdiel medzi minimálnou a maximálnou hodnotou GWP-GHG je však veľmi výrazný – od približne 290 až po 1363 kg CO_{2eq}/t. Takáto variabilita poukazuje na rozdiely medzi jednotlivými druhmi cementov a výrobnými technológiami. Významnú úlohu zohráva najmä podiel slinku, energetický mix výroby, druh používaného paliva a využitie cementových prímiesí.

Tabuľka 4.2.1 GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre cementy

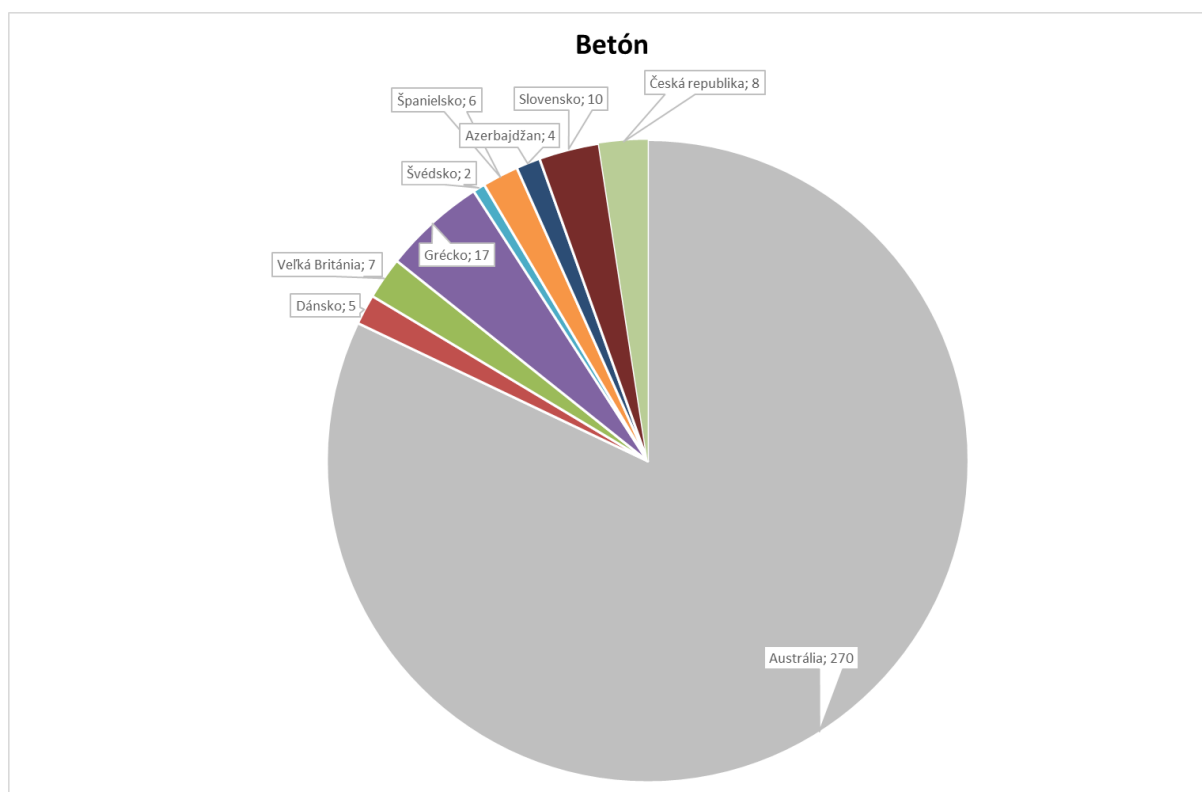
	GWP-celkový (kg CO _{2eq} /t)	GWP-fosílny (kg CO _{2eq} /t)	GWP-biogénny (kg CO _{2eq} /t)	GWP-LULUC (kg CO _{2eq} /t)	GWP-GHG (kg CO _{2eq} /t)
Priemer	693	692	22,8	0,049	693
Min	267,06	38,53	-18,7	-4,52	289,97

Max	1372	1374	799	0,93	1363
Medián	682,65	685	0,127	0,074	681

Hodnoty GWP-fosílny sú takmer identické s celkovým GWP, čo potvrdzuje, že hlavný podiel environmentálnej záťaže cementov pochádza z fosílnych zdrojov energie a procesných emisií pri výrobe slinku. Priemerná hodnota GWP-fosílny dosahuje 692 kg CO_{2eq}/t. Biogénna zložka GWP vykazuje vyššiu variabilitu, pričom hodnoty sa pohybujú od záporných až po veľmi vysoké kladné hodnoty. Záporné hodnoty môžu súvisieť so započítaním viazaného biogénneho uhlíka (balené cementy) alebo využitím alternatívnych materiálov. Napriek tomu medián biogénneho GWP dosahuje iba 0,127 kg CO_{2eq}/t, čo naznačuje, že vo väčšine prípadov má biogénna zložka len minimálny vplyv na celkové emisie cementu. Ukazovateľ GWP-LULUC, ktorý predstavuje emisie spojené so zmenou využívania pôdy, dosahuje veľmi nízke hodnoty. Priemerná hodnota je len 0,049 kg CO_{2eq}/t a medián 0,074 kg CO_{2eq}/t, čo znamená, že tento faktor má pri cementoch zanedbateľný vplyv na celkovú uhlíkovú stopu. Celkovo výsledky potvrdzujú, že dominantným zdrojom emisií cementov sú fosílny zdroje a emisie spojené s výrobou slinku, pričom ostatné zložky GWP majú v priemere podstatne menší význam.

4.2.4 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG betónov v hodnotených krajinách

Pri spracovaní analýzy boli využité rôzne databázy environmentálnych vyhlásení o produktoch (International EPD System, EPD Global, EPDSQUAR)), ktoré poskytujú environmentálne údaje o betónoch z viacerých krajín a od rôznych výrobcov. Na základe získaných údajov bola vykonaná analýza počtu dostupných EPD pre betóny v jednotlivých krajinách, čo umožnilo posúdiť rozsah dostupnosti environmentálnych informácií v rámci stavebného sektora. Následne boli z analyzovaných 329 environmentálnych vyhlásení o produkte (Obrázok 4.2.6) vyhodnotené hodnoty indikátora GWP-GHG pre fázu produktu (A1–A3), ktoré reprezentujú emisie skleníkových plynov vznikajúce pri výrobe betónu. Porovnaním údajov medzi jednotlivými krajinami bolo možné určiť úroveň uhlíkovej stopy betónov a identifikovať rozdiely vyplývajúce najmä zo zloženia betónových zmesí, typu použitého cementu, podielu prímiesí, technologických postupov výroby a energetického mixu. Výsledná analýza poskytuje prehľad o environmentálnych parametroch betónov v medzinárodnom kontexte a vytvára podklad pre hodnotenie možností znižovania emisií CO_{2eq} v oblasti výroby betónu a udržateľnej výstavby.



Obrázok 4.2.6 Prehľad počtu EPD pre betóny v hodnotených krajinách (Zdroj: autori)

Tabuľka 4.2.2 GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre betóny

	GWP-celkový (kg CO _{2eq} /t)	GWP-fosílny (kg CO _{2eq} /t)	GWP-biogénny (kg CO _{2eq} /t)	GWP-LULUC (kg CO _{2eq} /t)	GWP-GHG (kg CO _{2eq} /t)
Priemer	232	232	0,480	0,0265	232
Min	116,74	116,56	-0,785	0,00629	131
Max	468	468	6,27	0,244	468
Medián	222	221	0,254	0,0191	221

Tabuľka 4.2.2 prezentuje základné štatistické vyhodnotenie environmentálnych indikátorov GWP pre analyzované betóny. Priemerná hodnota ukazovateľa GWP-GHG dosahuje 232 kg CO_{2eq}/t, pričom medián je veľmi podobný (221 kg CO_{2eq}/t). Táto podobnosť naznačuje relatívne rovnomerné rozloženie hodnôt bez výrazného ovplyvnenia extrémnymi údajmi. Rozsah hodnôt GWP-GHG sa pohybuje od 131 do 468 kg CO_{2eq}/t, čo poukazuje na rozdiely medzi jednotlivými druhmi betónov a ich zložením. Variabilita emisií je ovplyvnená najmä typom a množstvom použitého cementu, podielom prímiesí, pevnostnou triedou betónu, ako aj technologickými a výrobnými podmienkami. Hodnoty GWP-fosílny sú prakticky identické s celkovým GWP, čo potvrdzuje, že dominantnú časť environmentálnej záťaže betónov tvoria emisie pochádzajúce z fosílnych zdrojov energie a z výroby cementu ako hlavnej zložky betónu. Priemerná hodnota GWP-fosílny dosahuje 232 kg CO_{2eq}/t. Biogénna zložka GWP vykazuje veľmi nízke hodnoty. Priemer predstavuje 0,480 kg CO_{2eq}/t a medián 0,254 kg CO_{2eq}/t, čo znamená, že biogénne procesy majú pri betónoch len zanedbateľný vplyv na

celkovú uhlíkovú stopu. Záporné minimálne hodnoty môžu súvisieť s využitím materiálov schopných viazať uhlík alebo so špecifickým spôsobom započítania biogénnych emisií v EPD dokumentoch. Ukazovateľ GWP-LULUC, ktorý zahŕňa emisie spojené so zmenou využívania pôdy, dosahuje veľmi nízke hodnoty vo všetkých sledovaných prípadoch. Priemerná hodnota je len 0,0265 kg CO_{2eq}/t, čo potvrdzuje minimálny význam tejto zložky pri hodnotení environmentálnych dopadov betónov. Celkovo výsledky ukazujú, že environmentálna stopa betónov je výrazne ovplyvnená najmä obsahom cementu a jeho výrobnými emisiami, zatiaľ čo ostatné zložky GWP majú v priemere iba okrajový význam.

4.2.5 Súčasné trendy vo výrobe cementu a betónu na Slovensku

4.2.5.1 Výroba cementu na Slovensku

Na Slovensku má cementársky priemysel dlhoročnú tradíciu a patrí medzi technologicky vyspelé odvetvia s dôrazom na efektívnosť výroby a znižovanie environmentálnych dopadov.

Na Slovensku zabezpečujú výrobu cementu tri hlavné spoločnosti: Danucem Slovensko, Považská cementáreň a CEMMAC. Cementárne patria do systému emisných kvót EÚ, čo znamená, že musia monitorovať a postupne znižovať svoje emisie CO_{2eq}.

Slovenské cementárne v posledných rokoch investujú do modernizácie výroby a využívania alternatívnych palív, napríklad spracovaného odpadu alebo biomasy. Cieľom je znížiť závislosť od uhlia a zemného plynu. Zároveň sa znižuje podiel slinku v niektorých typoch cementu pomocou prímiesí, ako sú vápenec alebo priemyselné vedľajšie produkty, čo vedie k nižšej uhlíkovej stope výsledného produktu.

Konkrétne opatrenia zavádzajú jednotlivé spoločnosti rôznym spôsobom. Danucem Slovensko sa zameriava na vysoký podiel alternatívnych palív vo výrobe cementu, čím postupne obmedzuje využívanie fosílnych zdrojov energie. Firma zároveň investuje do digitalizácie výrobných procesov a optimalizácie energetickej efektívnosti pecí. Dôležitým opatrením je aj rozširovanie portfólia cementov s nižším obsahom slinku a vývoj betónových zmesí s nižšou uhlíkovou stopou.

Považská cementáreň realizuje opatrenia zamerané na energetickú efektívnosť výroby a zvyšovanie podielu alternatívnych palív vrátane tuhých alternatívnych palív vyrobených z odpadu. Spoločnosť investovala do modernizácie technológií spaľovania a podporuje výrobu cementov s nižším obsahom slinku, čo prispieva k znižovaniu emisií CO₂ na tonu vyrobeného cementu.

CEMMAC sa sústreďuje na modernizáciu výrobných zariadení, znižovanie energetickej náročnosti a širšie využitie alternatívnych surovín a palív. Spoločnosť zároveň rozvíja výrobu cementov s nižšou uhlíkovou stopou a podporuje princípy obehového hospodárstva využívaním druhotných materiálov vo výrobe.

Tieto opatrenia sú súčasťou širšieho úsilia cementárskeho priemyslu o dekarbonizáciu, ktorá zahŕňa znižovanie emisií vo výrobe cementu aj betónu pri zachovaní požadovaných technických vlastností stavebných materiálov.

Výrobcovia betónu zároveň čoraz viac využívajú technologické inovácie, ako sú digitálne systémy riadenia výroby, presnejšie dávkovanie vstupných materiálov či recyklácia technologickej vody z betonární. Významným opatrením je aj výroba nízkouhlíkových betónov, pri ktorých sa znižuje obsah cementu alebo sa používajú alternatívne spojivá, čím sa celková uhlíková stopa stavebných materiálov postupne znižuje.

Environmentálne vyhlásenia o produkte (Environmental Product Declaration EPD) slovenských výrobcov cementu spracované riešiteľmi projektu potvrdzujú trend postupného znižovania uhlíkovej stopy prostredníctvom technologických a materiálových opatrení. Z EPD dokumentov vyplýva (Tabuľka 4.2.3), že rozhodujúci vplyv na environmentálny profil cementu má najmä podiel portlandského slinku, využitie minerálnych prímiesí a energetická náročnosť výrobného procesu. Cementy s nižším obsahom slinku dosahujú spravidla nižšie hodnoty

emisií CO₂ v porovnaní s tradičnými portlandskými cementmi, pričom si zachovávajú požadované technické parametre pevnosti a trvanlivosti.

Tabuľka 4.2.3 Prehľad vplyvu výroby vybraných cementov v SR na GWP-GHG

Výrobca	EPD registračné číslo	Typ cementu	Podiel slinku (%)	GWP- GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /t)	Druh cementu podľa STN EN 197-5
Danucem Slovensko	SQ 00-023	CEM I 52,5 N, CEM I 52,5 R, CEM I 42,5 R, CEM I 42,5 N - SR0, CEM I 42,5 R - SR0, CPC 7.0, CEM I 42,5 R (cc)	95-100	690	Portlandský cement
Danucem Slovensko	SQ 00-029	CEM II/A-LL 42,5 N, CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/A-LL 52,5 N	80-94	534	Portlandský cement s vápencom
Danucem Slovensko	SQ 00-024	CEM II/A-S 52,5 N CEM II/A-S 52,5 R CEM II/A-S 42,5 N	80-94	523	Portlandský troskový cement
Danucem Slovensko	SQ 00-025	CEM II/B-M (V-LL) 42,5 N CEM II/B-M (V-LL) 32,5 N CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R	65-79	518	Portlandský zmesový cement
Danucem Slovensko	SQ 00-030	CEM II/B-S 42,5 N	65-79	430	Portlandský troskový cement
Danucem Slovensko	SQ 00-027	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 N CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	65-79	431	Portlandský zmesový cement
Danucem Slovensko	SQ 00-031	CEM II/CM (S-LL) 32,5 N, CEM II/CM (S-LL) 32,5 R CEM II/CM (S-LL) 42,5 N	50-64	367	Portlandský kompozitný cement
Danucem Slovensko	SQ 00-026	CEM II/CM (S-LL) 42,5 N CEM II/CM (S-LL) 42,5 R	50-64	335	Portlandský kompozitný cement
Danucem Slovensko	SQ 00-032	CEM III A 32,5 N – LH CEM III A 32,5 R CEM III A 42,5 N	35–64	331	Vysokopečný cement
Považská cementáreň	SQ 00-005	CEM I 42,5 R	90	700	Portlandský cement
Považská cementáreň	SQ 00-004	CEM II/A-LL 42,5 R	75,5	630	Portlandský cement s vápencom
Považská cementáreň	SQ 00-005	CEM II/A-S 42,5 R	75,5	620	Portlandský troskový cement

Považská cementáreň	SQ 00-006	CEM II/B-M (S-L) 42,5 N CEM II/B-M (S-L) 32,5 R	62	540	portlandský zmesový cement
Považská cementáreň	SQ 00-007	CEM II/B-S 42,5 N	60	440	Portlandský troskový cement
CEMMAC	SQ 00-060	CEM II/B-S 42,5 N	75,7	460	Portlandský troskový cement
CEMMAC	SQ 00-059	CEM II/A-S 42,5 R	85,5	440	Portlandský troskový cement
Priemer				499	
Min				331	
Max				700	
Medián				489	

Hodnoty ukazovateľa GWP-GHG pre etapu A1–A3, vyjadrené v kg CO₂ ekvivalentu na tonu cementu, sa v analyzovanom súbore pohybujú v rozmedzí od 331 do 700 kg CO_{2eq}/t. Rozpätie 369 kg CO_{2eq}/t poukazuje na výrazné rozdiely v environmentálnych dopadoch jednotlivých cementov. Priemerná hodnota dosahuje 499,3 kg CO_{2eq}/t, pričom medián predstavuje 489 kg CO_{2eq}/t. Skutočnosť, že priemer je mierne vyšší ako medián, naznačuje prítomnosť niekoľkých cementov s nadpriemerne vysokými emisiami, ktoré zvyšujú celkový priemer súboru.

Väčšina hodnôt sa sústreďuje v intervale približne od 430 do 540 kg CO_{2eq}/t, čo možno považovať za typické rozpätie pre analyzované cementy. Najvyššie hodnoty, dosahujúce 620 až 700 kg CO_{2eq}/t, pravdepodobne zodpovedajú cementom s vyšším obsahom slinku, ktorého výroba je energeticky náročná a spojená s významnými emisiami oxidu uhličitého. Naopak, najnižšie hodnoty v rozmedzí 331 až 367 kg CO_{2eq}/t naznačujú využitie nízkouhlíkových cementov s vyšším podielom prídavných materiálov, ako sú vysokopecná troska, popolček alebo vápenec.

Rozdiely medzi jednotlivými hodnotami môžu byť ovplyvnené nielen zložením cementu, ale aj technologickou úrovňou výrobných procesov, použitými energetickými zdrojmi či efektívnosťou výrobných zariadení. Výsledky potvrdzujú, že výber typu cementu má významný vplyv na celkovú uhlíkovú stopu stavebných projektov. Zohľadnenie ukazovateľa GWP-GHG v etape A1–A3 pri výbere stavebných materiálov preto predstavuje dôležitý krok smerom k znižovaniu emisií skleníkových plynov a podpore udržateľnej výstavby.

V prípade Danucem Slovensko EPD dokumenty pre cementy typu CEM III/A poukazujú na využívanie vysokopecnej trosky ako významnej náhrady slinku. Takéto cementy predstavujú nízkouhlíkovú alternatívu k tradičným cementom, pretože časť energeticky náročného portlandského slinku je substituovaná druhotnými materiálmi. EPD spoločnosti zároveň dokumentujú orientáciu na cementy s nižšou environmentálnou záťažou a podporujú stratégiu dekarbonizácie výroby.

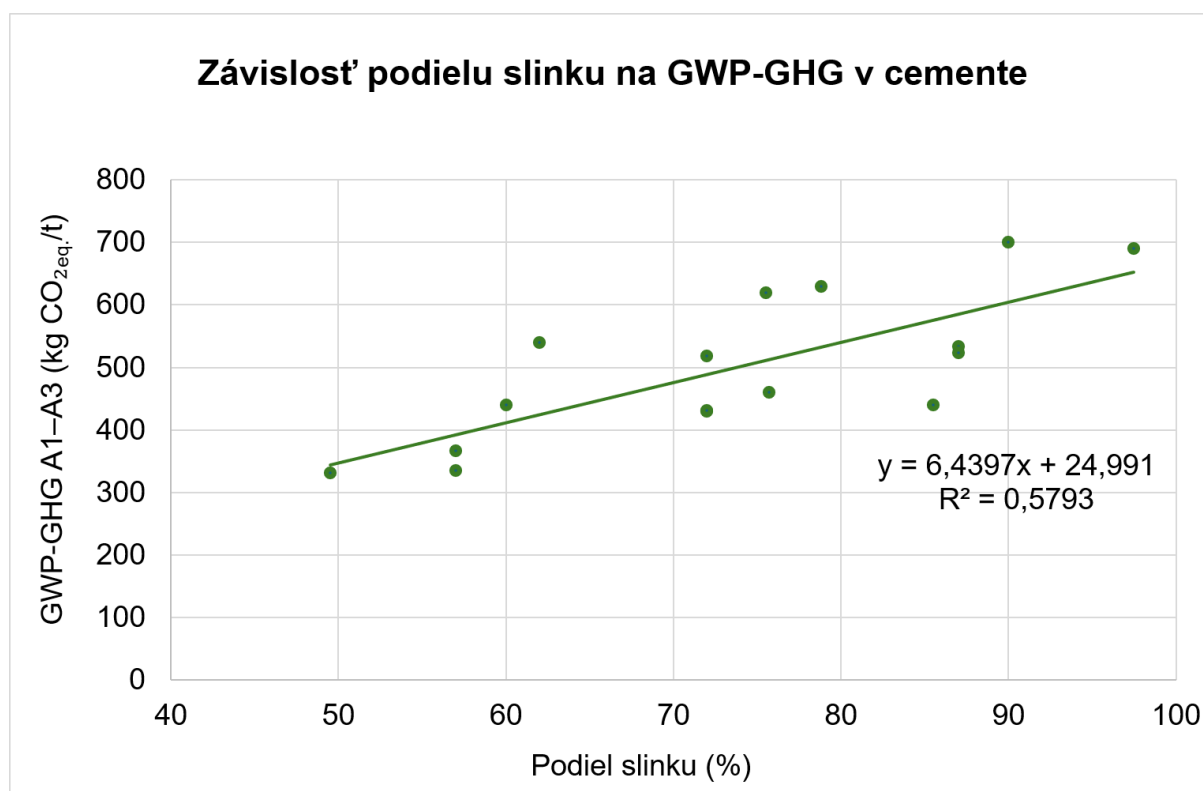
EPD výrobkov spoločnosti Považská cementáreň dokumentujú výrobu cementov pri ktorých je časť slinku nahradená vysokopecnou troskou alebo vápencom. Tento prístup vedie k zníženiu uhlíkovej stopy na tonu vyrobeného cementu pri zachovaní požadovaných pevnostných parametrov. Environmentálne deklarácie tak potvrdzujú systematickú orientáciu spoločnosti na znižovanie emisií prostredníctvom optimalizácie materiálového zloženia cementov.

Aj produkcia spoločnosti CEMMAC naznačuje výrobu cementov s vyšším podielom vysokopecnej trosky a vápenca. Takéto produkty sú vhodné najmä pre výrobu transportbetónu a masívnych betónových konštrukcií, pričom nižší podiel slinku prispieva k znižovaniu

environmentálnej záťaže výroby. Súčasťou stratégie podniku je aj environmentálny manažment podľa normy ISO 14001 a modernizácia technologických procesov.

Obrázok 4.2.7 znázorňuje vzťah medzi podielom slinku v cemente a hodnotou GWP-GHG vo fáze produktu. Z dát je zrejmý trend, a to že so znižujúcim sa podielom slinku klesajú aj emisie CO₂eq. Najvyššie hodnoty emisií dosahujú cementy s veľmi vysokým obsahom slinku (okolo 90–97,5 %), kde sa GWP-GHG pohybuje okolo 600 až 700 kg CO₂ eq./t. Naopak cementy s nižším podielom slinku (okolo 50–60 %) vykazujú výrazne nižšie emisie, približne 330 až 440 kg CO₂ eq./t. Graf ukazuje stredne silnú pozitívnu závislosť medzi podielom slinku a hodnotou GWP-GHG. Trendová priamka potvrdzuje, že s rastúcim obsahom slinku rastú aj emisie CO₂eq. na tonu cementu. Hodnota koeficientu determinácie $R^2 = 0,5793$ znamená, že približne 50 % variability emisií možno vysvetliť práve podielom slinku. Ide teda o významný faktor, avšak nie jediný. Zvyšná časť variability je pravdepodobne ovplyvnená ďalšími parametrami výroby, napríklad:

- typom použitých prísad,
- energetickým mixom výroby,
- účinnosťou technológie,
- druhom paliva alebo
- rozdielmi medzi výrobcami cementu.



Obrázok 4.2.7 Závislosť podielu slinku na GWP-GHG v cemente

Z obrázka 4.2.7 teda jednoznačne vyplýva, že podiel slinku je jedným z hlavných faktorov ovplyvňujúcich environmentálnu stopu cementu. Náhrada slinku prísadami alebo alternatívnymi materiálmi predstavuje účinný spôsob znižovania uhlíkovej stopy pri výrobe cementu.

4.2.5.2 Výroba betónu na Slovensku

Na Slovensku funguje rozsiahla sieť betonární, ktoré zásobujú stavebné projekty od rodinných domov až po diaľnice a priemyselné komplexy. Výroba betónu zahŕňa presné dávkovanie surovín, miešanie v technologických zariadeniach a kontrolu kvality výslednej zmesi.

Moderné trendy smerujú k výrobe ekologickejších druhov betónu s nižšou uhlíkovou stopou, využívaniu recyklovaných materiálov a znižovaniu spotreby cementu pri zachovaní požadovaných pevnostných vlastností.

Environmentálne vyhlásenia o produkte (Environmental Product Declaration EPD) slovenských producentov kameniva, ktoré boli spracované riešiteľským kolektívom, uvádzajú hodnoty indikátora GWP-GHG v module A1–A3 pre rôzne druhy betónov používaných v stavebníctve (Tabuľka 4.2.4). Keďže cement predstavuje dominantný zdroj emisií CO₂ pri výrobe betónu, využívanie nízko-slinkových cementov, recyklovaných materiálov, presnejšie dávkovanie vstupov a recyklácia technologickej vody umožňujú znižovať environmentálnu záťaž bez zásadného zníženia kvalitatívnych vlastností výsledného betónu.

Tabuľka 4.2.4 Prehľad vplyvu výroby vybraných druhov betónov v SR na GWP-GHG

Výrobca	EPD registračné číslo	Druh betónu	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /m ³)
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 8/10 - X0 (SK) -CI 0,40 - Dmax16 - S4	103
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 12/15 - X0 (SK) -CI 0,40 - Dmax16 - S4	113
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 16/20 - X0 (SK) -CI 0,40 - Dmax16 - S4	131
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 16/20 - XC1 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 20/25 - XC1 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 25/30 - XC1 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4	136
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 20/25 - XC2 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 25/30 - XC2 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4	144
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 25/30 - XC3 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 30/37 - XC3 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4	157
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 25/30 - XC3 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8 C 30/37 - XC3, XD1 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 – max. penetration 50 mm according to STN EN12390-8	153
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 30/37 - XC4, XD2 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 30/37 - XC4, XD2 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	158
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 35/45 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 35/45 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	169

Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 40/50 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 40/50 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	189
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 45/55 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 45/55 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	200
Alas Slovakia, s.r.o.	SQ 00-063	C 50/60 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 50/60 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	212
PREFA invest, a.s.	SQ 00-048	Transportconcrete C25/30, C25/30 ash, C30/37	304
PREFA invest, a.s.	SQ 00-047	Transportconcrete C20/25, C20/25 ash	262
Vedos, s.r.o.	S-P-03382	C30/37 – XC4, XD2(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4 C30/37 – XC4, XD2, XA2(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	252
Vedos, s.r.o.	S-P-03007	C8/10 – X0(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4, C12/15 – X0(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	173
Vedos, s.r.o.	S-P-03322	C25/30 – XC3(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	227
Vedos, s.r.o.	S-P-03133	C16/20 – XC1(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	183
Vedos, s.r.o.	S-P-03699	C35/45 – XC4, XD3, XA3(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	280
Priemer			183,21
Min			103
Max			304
Medián			173

Na základe analyzovaného súboru 19 betónových zmesí boli hodnotené environmentálne dopady indikátora GWP-GHG v module A1–A3, ktorý predstavuje potenciál globálneho otepľovania vyjadrený ako emisie skleníkových plynov počas fázy výroby materiálu (ťažba surovín, doprava a výrobný proces). Hodnoty sa pohybovali v rozmedzí 103 až 304 kg CO_{2,eq}/m³, pričom priemerná hodnota dosiahla 183,2 kg CO_{2,eq}/m³ a medián bol 173 kg CO_{2,eq}/m³. Rozdiel medzi priemerom a mediánom naznačuje mierne pravostranné rozdelenie dát, čo znamená, že niekoľko betónov s výrazne vyššími hodnotami GWP-GHG zvyšuje priemernú hodnotu celého súboru. Túto skutočnosť potvrdzuje aj maximálna hodnota 304 kg CO_{2,eq}/m³, ktorá sa javí ako potenciálne odľahlá hodnota. Väčšina analyzovaných betónov sa pritom sústreďuje v intervale približne 144 až 227 kg CO_{2,eq}/m³, čo predstavuje medzikvartilové rozpätie.

Výberová smerodajná odchýlka 55,6 kg CO_{2,eq}/m³ a koeficient variability približne 30 % poukazujú na stredne vysokú variabilitu environmentálnych dopadov medzi jednotlivými betónmi. To znamená, že analyzované betóny nie sú z environmentálneho hľadiska homogénne a medzi jednotlivými receptúrami existujú významné rozdiely v uhlíkovej stope.

Rozdiely v hodnotách GWP-GHG medzi jednotlivými betónmi možno vysvetliť najmä rozdielnym zložením betónových zmesí, predovšetkým typom a množstvom spojiva.

Najvýznamnejším faktorom je spravidla obsah cementu, keďže výroba cementového slinku patrí z hľadiska emisií medzi najnáročnejšie procesy v stavebníctve. Betóny s vyšším obsahom cementu alebo s použitím cementov s vyšším podielom slinku dosahujú spravidla vyššie hodnoty GWP-GHG.

Naopak, nižšie environmentálne dopady bývajú dosahované pri použití prímiesových alebo nízkouhlíkových cementov (napr. s obsahom vysokopecnej trosky, popolčeka alebo pucolánových materiálov), prípadne pri čiastočnej náhrade cementu sekundárnymi materiálmi. Tieto riešenia znižujú potrebu energeticky náročnej výroby slinku a vedú k nižším emisiám CO₂.

Ďalším faktorom môže byť pevnostná trieda betónu. Betóny vyšších pevnostných tried zvyčajne vyžadujú väčší obsah spojiva, jemnejšie zloženie alebo chemické prísady, čo môže viesť k zvýšeniu environmentálnej záťaže. Významnú úlohu zohráva aj typ kameniva a dopravné vzdialenosti surovín, keďže doprava vstupných materiálov vstupuje do modulu A1–A3.

Rozdiely môžu vzniknúť aj v dôsledku použitia recyklovaných materiálov, optimalizácie receptúry alebo technologickej efektívnosti výrobného procesu konkrétneho výrobcu. Betóny s nižšími hodnotami GWP-GHG tak pravdepodobne reprezentujú zmesi optimalizované z hľadiska environmentálnej efektívnosti, zatiaľ čo vyššie hodnoty môžu súvisieť s vysokým obsahom cementu, špeciálnymi požiadavkami na mechanické vlastnosti alebo menej priaznivým materiálovým zložením.

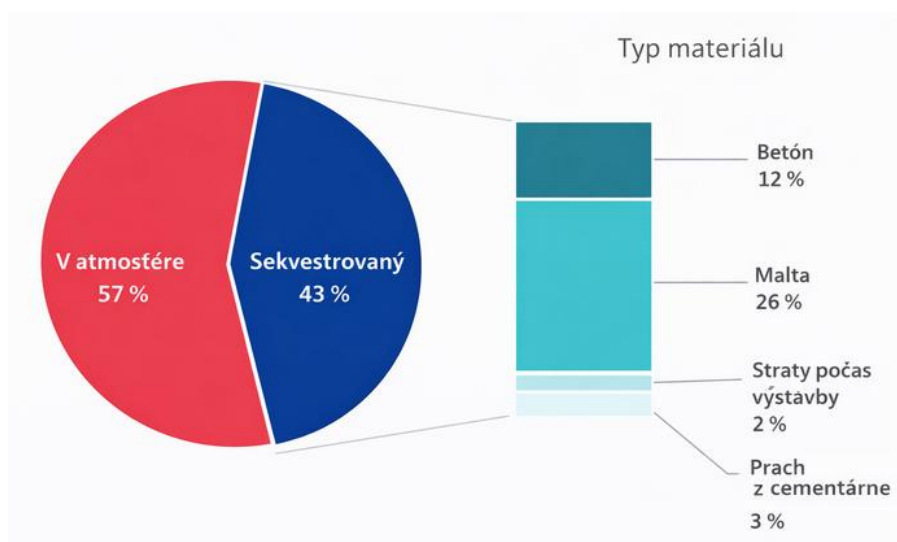
Z environmentálneho hľadiska výsledky poukazujú na značný potenciál znižovania uhlíkovej stopy betónu prostredníctvom optimalizácie receptúr, najmä redukciou množstva cementového slinku a využívaním alternatívnych cementových materiálov bez zásadného zníženia požadovaných technických vlastností betónu.

4.2.6 Opatrenia na znižovanie uhlíkovej stopy

Cementársky a betónový priemysel (CCI) patrí vzhľadom na svoju veľkosť a zásadnú úlohu pri rozvoji infraštruktúry medzi kľúčové odvetvia, ktoré je potrebné dekarbonizovať. Znižovanie emisií v tomto sektore je však mimoriadne náročné, najmä preto, že emisie sú veľmi vysoké a stále rastú a zároveň veľká časť z nich vzniká priamo počas výrobného procesu cementu, nie iba v dôsledku spotreby energie. Preto nestačí sústrediť sa len na náhradu cementu a betónu alternatívnymi materiálmi, ale je nevyhnutné riešiť aj samotnú uhlíkovú náročnosť ich výroby. Jednou z perspektívnych technologických možností je najmä zachytávanie a ukladanie CO₂ (CCS) priamo v miestach jeho vzniku počas výroby cementu.

4.2.6.1 Sekvestrácia uhlíka v betónových konštrukciách počas ich životného cyklu

Na rozdiel od procesu výroby slinku pri výrobe cementu, kde chemické reakcie uvoľňujú CO₂ do atmosféry, tuhnutie a tvrdnutie betónových zmesí vedie k zachytávaniu CO₂ z atmosféry, pričom tento proces pokračuje po dlhú dobu [13]. Ako je zrejmé z obrázku 4.2.8, významná časť emisií CO₂ počas životného cyklu sa môže skončiť vo forme trvalo viazaného uhlíka, teda uloženého CO₂ v dôsledku karbonatácie cementu v betónových výrobkoch počas tuhnutia a zrenia [14]. Podľa Xi a kol. sa odhaduje, že viac než 43% emisií vzniknutých počas výroby cementu od roku 1930 sa môže nakoniec uložiť vo forme karbonatovaného cementu v betónových produktoch [14]. Preto je potenciál betónu ako formy zachytávania uhlíka relevantný v diskusii o technológiách CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage).



Obrázok 4.2.8 Emisie CO₂ z procesov výroby cementu – kumulatívna alokácia pre produkciu v období 1930–2013. Zdroj: [14].

Používanie betónu, na ktoré sa viaže významné množstvo emisií CO₂ v dôsledku emisií spojených s výrobou cementu, predstavuje účinný mechanizmus sekvestrácie uhlíka. Hoci sa karbonatácia cementu v betónových zmesiach historicky považovala za negatívnu z hľadiska pevnosti konštrukcie [15], potreba rozvíjať technológie na dodatočné odstraňovanie CO₂ viedla k prehodnoteniu karbonatácie betónu ako prospešného nástroja. Porozumenie skutočnému rozsahu sekvestrácie uhlíka prostredníctvom karbonatácie betónu je pomerne nový trend vo výskume, keďže táto téma zatiaľ získala len malú pozornosť medzi odborníkmi, ktorí sa zaoberajú štúdiami uhlíkového cyklu [14].

Hoci výroba a spotreba cementu a betónu sú spojené s vysokou spotrebou energie a významnými emisiami skleníkových plynov, v posledných rokoch bolo vyvinutých množstvo technológií a postupov zameraných na znižovanie uhlíkovej stopy cementárskeho a betónového priemyslu (CCI). Potenciál jednotlivých opatrení sa však líši, najmä vzhľadom na technologickú vyspelosť tohto odvetvia. Napríklad modernizácia existujúcich cementární prináša len obmedzené zlepšenia energetickej efektívnosti – najefektívnejšie závody dosahujú pri technologických modernizáciách zlepšenie energetickej účinnosti približne o 0,04 % ročne [16]. Z tohto dôvodu je na dosiahnutie hlbokšej dekarbonizácie potrebné zavádzanie inovatívnejších riešení, ako sú technológie zachytávania a ukladania uhlíka (CCS), náhrady slinku alebo nové typy cementov.

Pri očakávanom pokračujúcom raste dopytu po cementových a betónových výrobkoch sa hlavné stratégie znižovania emisií v tomto odvetví zameriavajú najmä na dve oblasti: znižovanie alebo elimináciu emisií vznikajúcich pri výrobe cementu a zvyšovanie schopnosti betónu viazať CO₂ počas svojho životného cyklu, čím môže pôsobiť ako dlhodobý uhlíkový „zásobník“ [17]. Na rozdiel od mnohých iných priemyselných odvetví, kde je hlavným zdrojom emisií spaľovanie fosílnych palív, značná časť emisií v CCI vzniká priamo pri chemických reakciách počas výroby cementu, najmä pri kalcinácii vápenca. Preto sú kľúčové technologické inovácie zamerané na zmenu zloženia cementu, úpravu výrobných procesov alebo využívanie nových druhov kameniva v betóne.

Ako uvádzajú Habert a kol. [2], dekarbonizačné opatrenia v tomto sektore úzko súvisia s materiálovými tokmi v celom hodnotovom reťazci. Dôležitú úlohu zohráva zvyšovanie materiálnej efektívnosti, zmeny v dopyte po stavebných materiáloch, princípy cirkulárnej ekonomiky či automatizácia výroby. Významné sú aj prepojenia s inými priemyselnými odvetviami, napríklad využívanie odpadových materiálov z výroby železa a ocele, rafinácie ropy alebo spracovania pneumatík ako vstupov do cementárskeho procesu. Medzi perspektívne prístupy patrí aj podpora karbonatácie betónu, napríklad prostredníctvom

priameho vstrekovania CO₂ počas miešania a tuhnutia betónu, čo môže prispieť k znižovaniu celkových emisií bez zásadných zmien v súčasných stavebných postupoch [18-21].

4.2.6.2 Opatrenia na zvyšovanie energetickej efektívnosti

Krátkodobé znižovanie emisií v cementárskom a betónovom priemysle (CCI) sa vo veľkej miere spája s opatreniami na zvyšovanie energetickej efektívnosti. Ich teoretický potenciál dekarbonizácie je však relatívne obmedzený a predstavuje približne 4–8 % emisií CO₂ z výroby cementu [22], pričom zahŕňa aj technológie využívania odpadového tepla. Cement, najmä portlandský cement (OPC), je pritom výrazne uhlíkovo náročný materiál, keďže značná časť emisií vzniká priamo pri chemických reakciách počas výroby slinku.

Výrobný proces cementu je zároveň spojený so značnými tepelnými stratami. Odhaduje sa, že približne 35–40 % dodanej energie sa stráca vo forme tepla [23], najmä pri chladení slinku a vo vysokoteplotných spaliniach, ktoré nie sú využité [24,25]. Z tohto dôvodu patrí zvyšovanie tepelnej efektívnosti medzi hlavné priority v cementárskej výrobe. Perspektívne riešenia zahŕňajú napríklad využívanie priemyselných tepelných čerpadiel na získavanie nízokoteplotného odpadového tepla alebo systémy kombinovanej výroby tepla a elektriny (CHP), ktoré dokážu využiť energiu zo spalín pecí [26-28].

Dôležitú úlohu zohráva aj digitalizácia výrobných procesov. Moderné nástroje, ako je technológia digitálneho dvojčaťa (digital twin) a inteligentné senzory, umožňujú monitorovať prevádzku zariadení v reálnom čase, optimalizovať výrobné procesy a predchádzať poruchám [29-31]. Tieto prístupy prispievajú k vyššej prevádzkovej efektívnosti, znižovaniu energetických strát a lepšiemu riadeniu výroby v závislosti od dopytu po cementových a betónových výrobkoch [32,33].

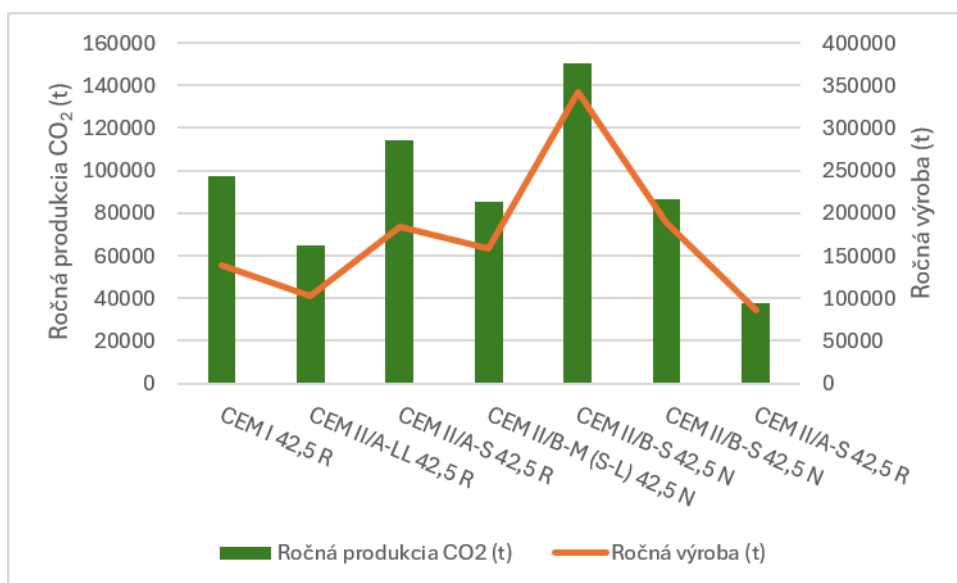
4.2.6.3 Hlavné stratégie dekarbonizácie vo výrobe cementu a betónu

Dekarbonizácia výroby stavebných materiálov, najmä cementu a betónu, patrí medzi dôležité výzvy súčasného priemyslu. Znižovanie uhlíkovej stopy vyžaduje kombináciu technologických inovácií, efektívnejšieho využívania zdrojov a podpory zo strany regulačných politík.

Hlavné stratégie dekarbonizácie vo výrobe cementu a betónu zahŕňajú viacero prístupov. Jedným z nich je nahrádzanie tradičných surovín nízkouhlíkovými alternatívami, ako sú LC cement, geopolyméry či iné typy spojív s nižšou energetickou náročnosťou výroby.

Obrázok 4.2.9 porovnáva jednotlivé druhy cementov z hľadiska ročnej výroby a celkovej produkcie CO₂. Najvyššiu ročnú výrobu dosahuje cement CEM II/B-S 42,5 N s objemom 342 200 ton, ktorý zároveň produkuje najväčšie množstvo emisií CO₂, približne 150 568 ton. Cement CEM I 42,5 R vykazuje pri výrobe 139 300 ton produkciu 97 510 ton CO₂, čo je relatívne vysoká hodnota vzhľadom na objem výroby a poukazuje na vyššiu emisnú náročnosť tohto typu cementu.

Cementy s vyšším podielom prídavných zložiek, ako sú CEM II/B-M (S-L) 42,5 N a druhý variant CEM II/B-S 42,5 N, dosahujú pri porovnateľných objemoch výroby nižšiu produkciu CO₂. Cement CEM II/B-M (S-L) 42,5 N vyrobí ročne 158 100 ton a produkuje 85 374 ton CO₂, zatiaľ čo druhý variant CEM II/B-S 42,5 N pri výrobe 188 176 ton produkuje 86 561 ton CO₂. Ešte nižšiu produkciu emisií vykazuje cement CEM II/A-LL 42,5 R, ktorý pri výrobe 102 800 ton dosahuje produkciu CO₂ len 64 764 ton. Najnižšie hodnoty boli zaznamenané pri druhom variante cementu CEM II/A-S 42,5 R, kde výroba predstavuje 85 492 ton a produkcia CO₂ iba 37 616 ton.



Obrázok 4.2.9 Porovnanie jednotlivých druhov cementov z hľadiska ročnej výroby a celkovej produkcie CO₂

Významnú úlohu zohráva aj zvyšovanie energetickej efektívnosti procesov, napríklad prostredníctvom elektrifikácie výroby, rekuperácie tepla alebo optimalizácie technologických postupov.

Ďalšou stratégiou je náhrada fosílnych palív alternatívnymi zdrojmi energie, ako sú biomasa, bioplyn alebo vodík, pričom v praxi sa čoraz viac využívajú aj odpadové palivá. Veľký potenciál má aj zachytávanie, využitie a ukladanie oxidu uhličitého (CCUS), ktoré umožňuje znížiť emisie priamo v mieste výroby a CO₂ následne využiť napríklad pri výrobe betónu alebo chemických produktov.

Dôležitou súčasťou transformácie odvetvia je aj obehové hospodárstvo, ktoré podporuje recykláciu stavebných materiálov, opätovné využívanie surovín a predlžovanie životného cyklu stavieb. Dekarbonizačné opatrenia zároveň podporujú technologické inovácie, napríklad vstrekovanie CO₂ do betónu, cementy s veľmi nízkymi emisiami alebo elektrifikované výrobné procesy.

Rozvoj týchto riešení je podporovaný aj regulačnými nástrojmi a trhovým tlakom, najmä systémom obchodovania s emisnými kvótami v Európskej únii a pripravovaným mechanizmom uhlíkového cla. Napriek pokroku však pretrvávajú viaceré výzvy, ako sú vysoké investičné náklady, nedostatok obnoviteľnej energie alebo regulačné obmedzenia pri zavádzaní nových materiálov.

Tabuľka 4.2.5 prezentuje hodnoty GWP-GHG pre cementy na roky 2030 a 2050 podľa predpokladaných emisných faktorov pre elektrinu s hodnotou 0,08 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2030 a 0,04 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2050 [34]. Predpokladané percentuálne zníženie emisií v roku 2030 je 65,22% a v roku 2050 je 82,61 % v porovnaní s emisným faktorom pre „elektrina, vysoké napätie, mix, Slovenská republika“ podľa databázy Ecoinvent 3.11 s hodnotou 0,23 kg CO_{2eq}./kWh.

Tabuľka 4.2.5 GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre cementy v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050

EPD registračné číslo	Typ cementu	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./t)	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./t)	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./t)
-----------------------------	-------------	--	--	--

			2030	2050
SQ 00-023	CEM I 52,5 N, CEM I 52,5 R, CEM I 42,5 R, CEM I 42,5 N - SR0, CEM I 42,5 R - SR0, CPC 7.0, CEM I 42,5 R (cc)	690	240	120
SQ 00-029	CEM II/A-LL 42,5 N, CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/A-LL 52,5 N	534	186	93
SQ 00-024	CEM II/A-S 52,5 N CEM II/A-S 52,5 R CEM II/A-S 42,5 N	523	182	91
SQ 00-025	CEM II/B-M (V-LL) 42,5 N CEM II/B-M (V-LL) 32,5 N CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R	518	180	90
SQ 00-030	CEM II/B-S 42,5 N	430	150	75
SQ 00-027	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 N CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	431	150	75
SQ 00-031	CEM II/CM (S-LL) 32,5 N, CEM II/CM (S-LL) 32,5 R CEM II/CM (S-LL) 42,5 N	367	128	64
SQ 00-026	CEM II/CM (S-LL) 42,5 N CEM II/CM (S-LL) 42,5 R	335	117	58
SQ 00-032	CEM III A 32,5 N – LH CEM III A 32,5 R CEM III A 42,5 N	331	115	58
SQ 00-005	CEM I 42,5 R	700	243	122
SQ 00-004	CEM II/A-LL 42,5 R	630	219	110
SQ 00-005	CEM II/A-S 42,5 R	620	216	108
SQ 00-006	CEM II/B-M (S-L) 42,5 N CEM II/B-M (S-L) 32,5 R	540	188	94
SQ 00-007	CEM II/B-S 42,5 N	440	153	77
SQ 00-060	CEM II/B-S 42,5 N	460	160	80
SQ 00-059	CEM II/A-S 42,5 R	440	153	77

Tabuľka 4.2.6 prezentuje hodnoty GWP-GHG pre betóny na roky 2030 a 2050 podľa predpokladaných emisných faktorov pre elektrinu s hodnotou 0,08 kg CO_{2eq}/kWh v roku 2030 a 0,04 kg CO_{2eq}/kWh v roku 2050 [34]. Predpokladané percentuálne zníženie emisií v roku 2030 je 68 až 70 % a v roku 2050 je 84 až 85 % až v porovnaní s emisným faktorom pre „elektrina, vysoké napätie, mix, Slovenská republika“ podľa databázy Ecoinvent 3.11 s hodnotami 0,25 kg CO_{2eq}/kWh a 0,27 kg CO_{2eq}/kWh.

Tabuľka 4.2.6 GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre betóny v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050

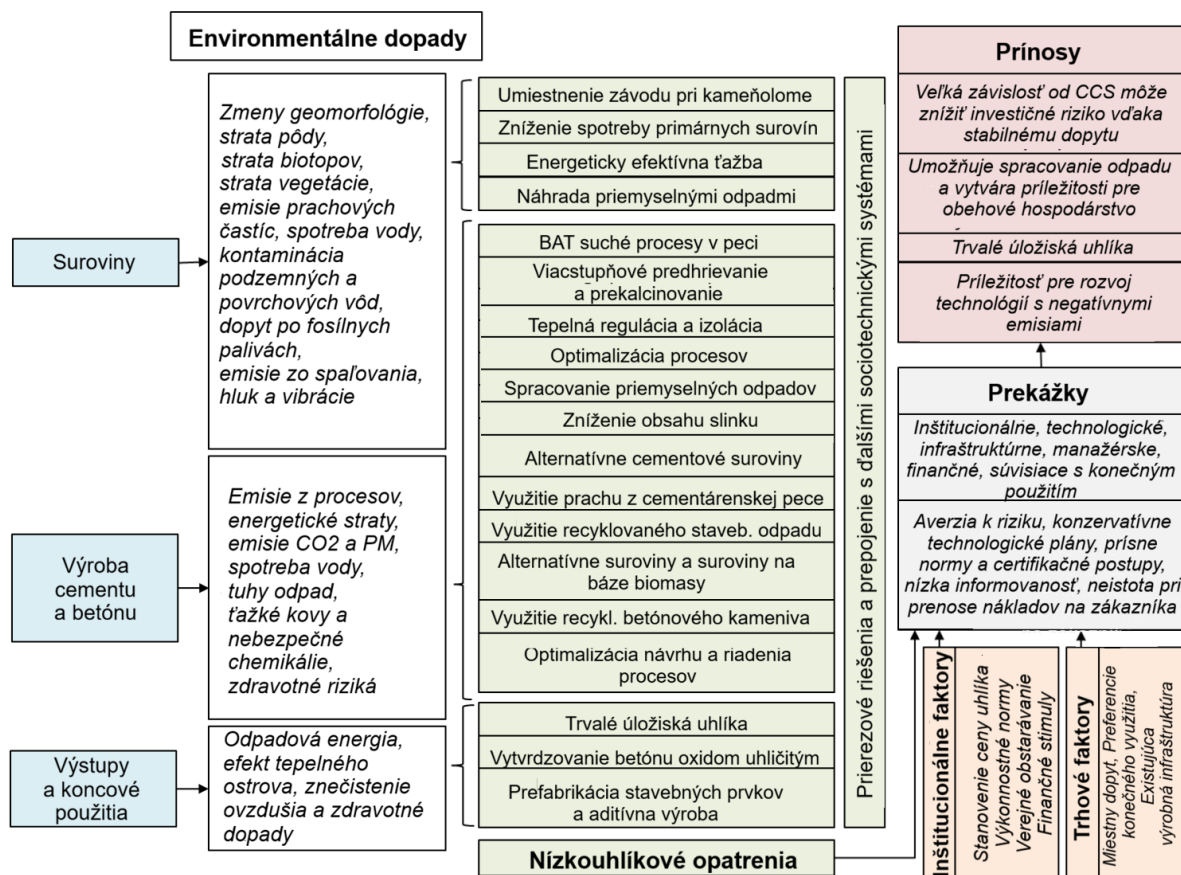
EPD registračné číslo	Druh betónu	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /m ³)	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /m ³) 2030	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /m ³) 2050
SQ 00-063	C 8/10 - X0 (SK) -CI 0,40 - Dmax16 - S4	103	32	16

SQ 00-063	C 12/15 - X0 (SK) -CI 0,40 - Dmax16 - S4	113	35	17
SQ 00-063	C 16/20 - X0 (SK) -CI 0,40 - Dmax16 - S4	131	40	20
SQ 00-063	C 16/20 - XC1 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 20/25 - XC1 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 25/30 - XC1 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4	136	42	21
SQ 00-063	C 20/25 - XC2 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 25/30 - XC2 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4	144	44	22
SQ 00-063	C 25/30 - XC3 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 30/37 - XC3 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4	157	48	24
SQ 00-063	C 25/30 - XC3 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8 C 30/37 - XC3, XD1 (SK) -CI 0,20 - Dmax16 - S4 – max. penetration 50 mm according to STN EN12390-8	153	47	24
SQ 00-063	C 30/37 - XC4, XD2 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 30/37 - XC4, XD2 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	158	49	24
SQ 00-063	C 35/45 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 35/45 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	169	52	26
SQ 00-063	C 40/50 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 40/50 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	189	58	29
SQ 00-063	C 45/55 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 45/55 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm	200	62	31

	according to STN EN 12390-8			
SQ 00-063	C 50/60 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 C 50/60 - XC4, XD3 -CI 0,20 - Dmax16 - S4 - max. penetration 50 mm according to STN EN 12390-8	212	65	33
SQ 00-048	Transportconcrete C25/30, C25/30 ash, C30/37	304	97	49
SQ 00-047	Transportconcrete C20/25, C20/25 ash	262	84	42
S-P-03382	C30/37 – XC4, XD2(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4 C30/37 – XC4, XD2, XA2(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	252	75	37
S-P-03007	C8/10 – X0(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4, C12/15 – X0(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	173	51	26
S-P-03322	C25/30 – XC3(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	227	67	34
S-P-03133	C16/20 – XC1(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	183	54	27
S-P-03699	C35/45 – XC4, XD3, XA3(SK) – CI 0,2 – Dmax16 – S4	280	83	41

Do budúcnosti sa očakáva kombinovanie viacerých riešení naraz – napríklad využívanie nízkouhlíkových cementov spolu s technológiami zachytávania CO₂, alternatívnymi palivami a recyklovanými materiálmi. Tieto opatrenia môžu významne prispieť k znižovaniu emisií a k udržateľnejšiemu rozvoju stavebného sektora.

Pochopenie sociálno-technického systému cementárskeho a betónového priemyslu umožňuje identifikovať opatrenia, ktoré môžu tieto bariéry prekonať a priniesť významné environmentálne prínosy. Na obrázku 4.2.10 je zosumarizovaný prehľad kľúčových opatrení spojených s dekarbonizáciou výroby cementu a betónu.



Obrázok 4.2.10 Prehľad kľúčových opatrení spojených s dekarbonizáciou výroby cementu a betónu

Proces dekarbonizácie však naráža na viaceré bariéry, medzi ktoré patrí najmä nedostatočné povedomie, odpor k zavádzaniu nových technológií či pomalé prispôbovanie sa stavebných noriem. Ďalším špecifikom sú silne lokalizované trhy so surovinami a výrobkami, ktoré síce zjednodušujú kontrolu emisií, no zároveň môžu obmedzovať širšie využívanie alternatívnych materiálov a technológií.

Literatúra

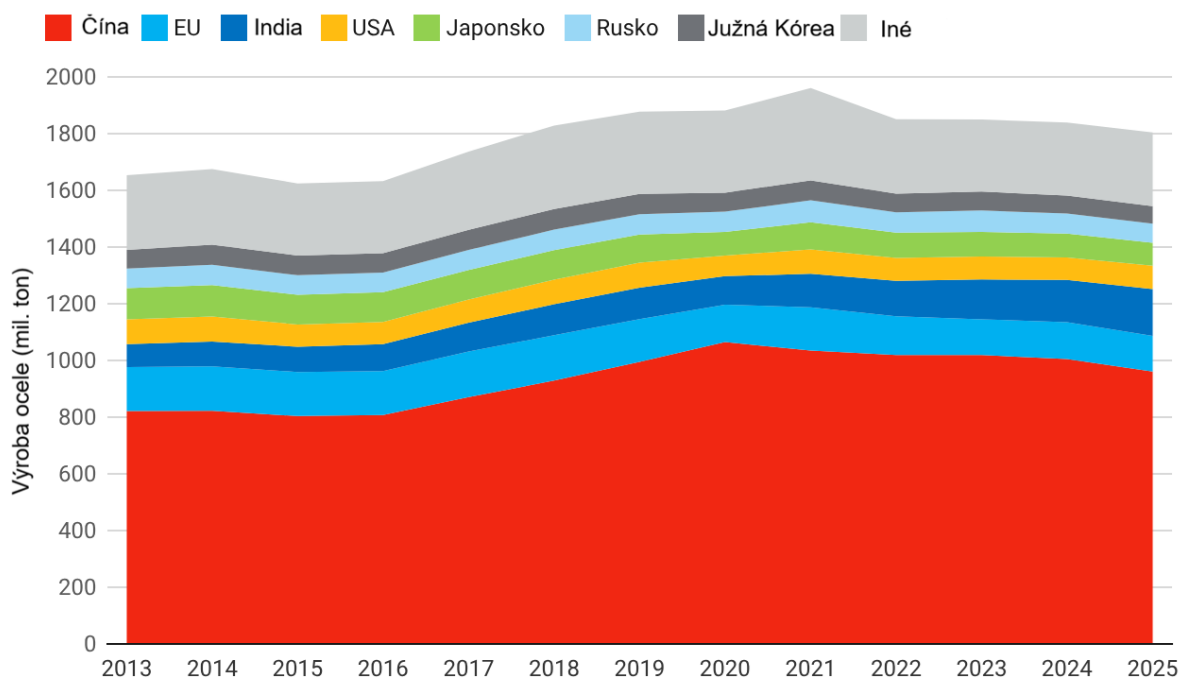
1. World Economic Forum. Net-Zero Industry Tracker - 2022 Edition. Geneva: World Economic Forum, 2022
2. Habert G, Miller SA, John VM, Provis JL, Favier A, Horvath A, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nat Rev Earth Environ 2020;1:559–73. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.
3. Eštoková, A.: Technológie výroby stavebných materiálov. Technická univerzita v Košiciach: 2022. ISBN 978-80-553-4127-9.
4. International Energy Agency. Aligning investment and innovation in heavy industries to accelerate the transition to net-zero emissions – analysis. IEA; 2020. <https://www.iea.org/commentaries/aligning-investment-and-innovation-in-heavy-industries-to-accelerate-the-transition-to-net-zero-emissions>. [Accessed 3 May 2022]. accessed.
5. Griffiths, S., Sovacool, B. K., Furszyfer Del Rio, D. D., Foley, A. M., Bazilian, M. D., Kim, J., & Uratani, J. M. (2023). Decarbonizing the cement and concrete industry: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, 180, 113291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113291>
6. Cao Z, Masanet E, Tiwari A, Akolawala S. Decarbonizing Concrete: deep decarbonization pathways for the cement and concrete cycle in the United States, India, and China. Evanston: Industrial Sustainability Analysis Laboratory, Northwestern University; 2021.
 7. Miller SA, Horvath A, Monteiro PJM (2016). Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. *Environ Res Lett*, 11, 074029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074029>
 8. Choate WT. Energy and Emission Reduction Opportunities for the Cement Industry. Columbia: US Department of Energy; 2003. <https://doi.org/10.2172/1218753>
 9. Hottle T, Hawkins TR, Chiquelin C, Lange B, Young B, Sun P, et al. (2022). Environmental life-cycle assessment of concrete produced in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 363, 131834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131834>
 10. Guo Z, Jiang T, Zhang J, Kong X, Chen C, Lehman DE (2020). Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume. *Construction and Building Materials*, 231, 117115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117115>
 11. Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements (2004). *Cement and Concrete Research*, 34, 1489–98. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
 12. Concrete needs to lose its colossal carbon footprint (2021). *Nature*, 597, 593–4. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02612-5>
 13. Newell P. An ancient battle between environment and concrete (2021). *Nat Rev Chem*, 5, 513–4. <https://doi.org/10.1038/s41570-021-00315-z>
 14. Xi F, Davis SJ, Ciais P, Crawford-Brown D, Guan D, Pade C, et al. (2016). Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geosci*, 9, 880–3. <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>
 15. Mohareb E, Kennedy C. Gross Direct and Embodied Carbon Sinks for Urban Inventories (2012). *Journal of Industrial Ecology*, 16, 302–16. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00445.x>
 16. Fennell P, Driver J, Bataille C, Davis SJ. Cement and steel — nine steps to net zero. *Nature* 2022;603:574–7. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00758-4>.
 17. Saputra R, Khalid M, Walvekar R, Pariatamby A. Chapter 15 - circular carbon economy. In: Khalid M, Dharaskar SA, Sillanpää M, Siddiqui H, editors. *Emerging carbon capture technologies*. Elsevier; 2022. p. 427–62. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89782-2.00010-7>.
 18. How concrete can become a carbon sink. RISE. n.d. <https://www.ri.se/en/our-stories/how-concrete-can-become-a-carbon-sink>. [Accessed 7 May 2022]. accessed
 19. Churkina G, Organschi A, Reyer CPO, Ruff A, Vinke K, Liu Z, et al. Buildings as a global carbon sink. *Nat Sustain* 2020;3:269–76. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>.
 20. Wagner J, Monkman S. Making an impact: sustainable success stories: CarbonCure. How to commercialize chemical technologies for a sustainable future. 14. John Wiley & Sons, Ltd; 2021. p. 255–62. <https://doi.org/10.1002/9781119604860.ch14a>.
 21. Carbon removal with CarbonCure concrete: a permanent storage solution. CarbonCure Technologies Inc; 2021. <https://www.carboncure.com/carbon-removal/carbon-removal-with-carboncure-concrete-a-permanent-solution/>. [Accessed 7 May 2022]. accessed.
 22. Lehne J, Preston F. Making concrete change: innovation in low-carbon cement and concrete. London: The Royal Institute of International Affairs; 2018.
 23. Ali MB, Saidur R, Hossain MS. A review on emission analysis in cement industries. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:2252–61. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>.
 24. Laribi S, Dubois L, De Weireld G, Thomas D. Study of the post-combustion CO₂ capture process by absorption-regeneration using amine solvents applied to cement plant flue gases with high CO₂ contents. *Int J Greenh Gas Control* 2019; 90:102799. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102799>.

25. Habert G, Billard C, Rossi P, Chen C, Roussel N. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement Concr Res* 2010;40:820–6. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.031>.
26. Benhelal E, Shamsaei E, Rashid MI. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: a review. *J Environ Sci* 2021;104:84–101. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.020>.
27. Madloul NA, Saidur R, Rahim NA, Kamalisarvestani M. An overview of energy savings measures for cement industries. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;19: 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.046>.
28. García-Gusano D, Garraín D, Herrera I, Cabal H, Lechón Y. Life Cycle Assessment of applying CO₂ post-combustion capture to the Spanish cement production. *J Clean Prod* 2015;104:328–38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.056>.
29. Industry 4.0 for cement production: LafargeHolcim launches the “plants of tomorrow.” sustainable construction & building company | holcim. n.d. <https://www.holcim.com/media/media-releases/launch-plants-tomorrow>. [Accessed 26 August 2022]. accessed
30. Chatterjee AK. Digital twin and its variants for advancing digitalization in cement manufacturing. Intelligent and sustainable cement production. CRC Press; 2021.
31. Zhang H, Zhou Y, Zhu H, Sumarac D, Cao M. Digital twin-driven intelligent construction: features and trends. *Struct Durab Health Monit* 2021;15:183–206. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2021.018247>.
32. Máder PM, Bakai N, Horkai A, Etlinger J, Zagor'acz MB, Rák O. Defining focus areas for digitization to reduce construction industry generated CO₂ emissions. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2021;1203:032053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/3/032053>.
33. Guillin-Estrada WD, Albuja R, D'ávila IB, Rueda BS, Corredor L, Gonzalez- Quiroga A, et al. Transient operation effects on the thermal and mechanical response of a large-scale rotary kiln. *Result Eng* 2022;14:100396. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100396>.
34. https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en

4.3 Oceľ

Výroba ocele patrí medzi najdôležitejšie odvetvia ťažkého priemyslu na svete. Oceľ je základným materiálom pre stavebníctvo, automobilový priemysel, strojárstvo aj výrobu infraštruktúry. V súčasnosti sa oceľ vyrába vo veľkých množstvách najmä v priemyselne rozvinutých krajinách, pričom najväčším producentom je Čína. Významnými výrobcami sú aj India, Japonsko, USA a Rusko (obrázok 4.3.1, Tabuľka 4.3.1). Výroba ocele je úzko spojená s dostupnosťou surovín, najmä železnej rudy a uhlia, ako aj s technologickou vyspelosťou krajín. Význam ocele v modernom svete neustále rastie, pretože je kľúčová pre rozvoj hospodárstva a infraštruktúry.



Obrázok 4.3.1 Výroba ocele vo vybraných krajinách a podiel na globálnej výrobe (Zdroj: Worldsteel)

Tabuľka 4.3.1 Top 20 výrobcov surovej ocele na svete v rokoch 2024 a 2025

Poradie	Krajina	Rok 2024 (mil. ton)	Rok 2024 (mil. ton)	Rozdiel (%)
1	Čína	1005,1	960,8	-4,4%
2	India	149,6	164,9	10,4%
3	USA	79,5	82,0	3,1%
4	Japonsko	84,0	80,7	-4,0%
5	Rusko*	71,0	67,8	-4,5%
6	Južná Kórea	63,5	61,9	-2,8%
7	Turecko	36,9	38,1	3,3%
8	Nemecko	37,3	34,1	-8,6%
9	Brazília	33,9	33,3	-1,6%

10	Irán*	31,4	31,8	0,8%
11	Vietnam	22,1	24,7	14,9%
12	Taliani	20,0	20,7	3,6%
13	Indonézia*	18,6	19,0	1,9%
14	Taiwan*	19,2	17,1	-10,8%
15	Mexiko*	14,3	13,5	-5,9%
16	Španielsko*	11,9	12,0	0,7%
17	Kanada*	12,3	11,5	-7,2%
18	Saudská Arábia	9,6	10,8	12,3%
19	Egypt	10,7	10,6	-0,8%
20	Francúzsko*	10,8	9,8	-8,7%

	Slovensko	3,9	3,7	-5,6%

	Česká republika	2,5	2,5	-1,7%

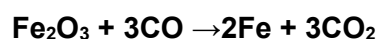
*Odhad Worldsteel

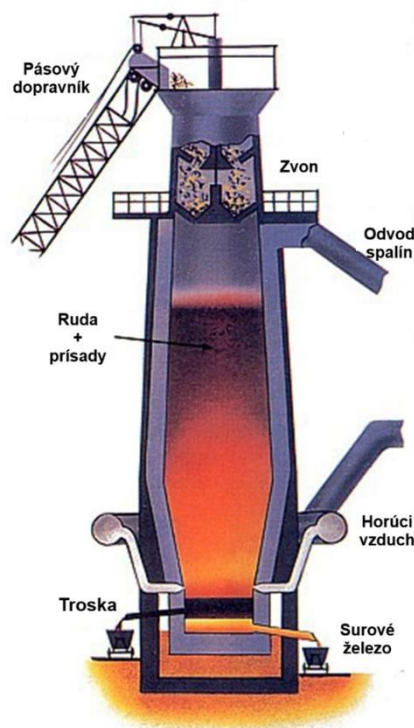
4.3.1 Výroba železa a ocele

Výroba železa vo vysokej peci predstavuje základný hutnícky proces, prostredníctvom ktorého sa zo železnej rudy získava surové železo určené na ďalšie spracovanie pri výrobe ocele. Ide o technologicky náročný a energeticky intenzívny proces, ktorý sa využíva predovšetkým v integrovaných hutníckych závodoch. Vysoká pec (Obrázok 4.3.2) je zvislá technologická stavba s výškou približne 30 až 50 metrov, pričom jej vnútorné steny sú vystlané žiaruvzdorným materiálom, schopným odolávať extrémne vysokým teplotám presahujúcim 2000 °C. Úlohou vysokej pece je zabezpečiť redukciu železných oxidov obsiahnutých v rude a transformovať ich na kovové železo.

Základnými vstupnými surovinami procesu sú železná ruda, koks a troskotvorné prísady, najmä vápenec. Obsahuje však rôzne oxidy železa spolu s množstvom nežiaducich prímiesí, ako sú kremičitany, zlúčeniny síry a fosforu. Ďalšou dôležitou surovinou je koks, ktorý vzniká karbonizáciou čierneho uhlia a slúži nielen ako zdroj tepla, ale aj ako chemické redukčné činidlo. Vápenec sa do procesu pridáva za účelom viazania nečistôt a tvorby trosky.

Proces výroby začína vsádzaním jednotlivých surovín do hornej časti vysokej pece. Materiály postupne klesajú smerom nadol, zatiaľ čo z dolnej časti pece prúdi horúci vzduch o teplote približne 1000 až 1200 °C, ktorý podporuje spaľovanie koksu. Pri spaľovaní vzniká vysoké množstvo tepelnej energie a zároveň sa tvorí oxid uhoľnatý (CO), ktorý zohráva kľúčovú úlohu v procese redukcie železnej rudy. Oxid uhoľnatý reaguje s oxidmi železa a postupne z nich odstraňuje kyslík, čím dochádza k vzniku kovového železa. Tento chemický proces možno zjednodušene vyjadriť reakciou:



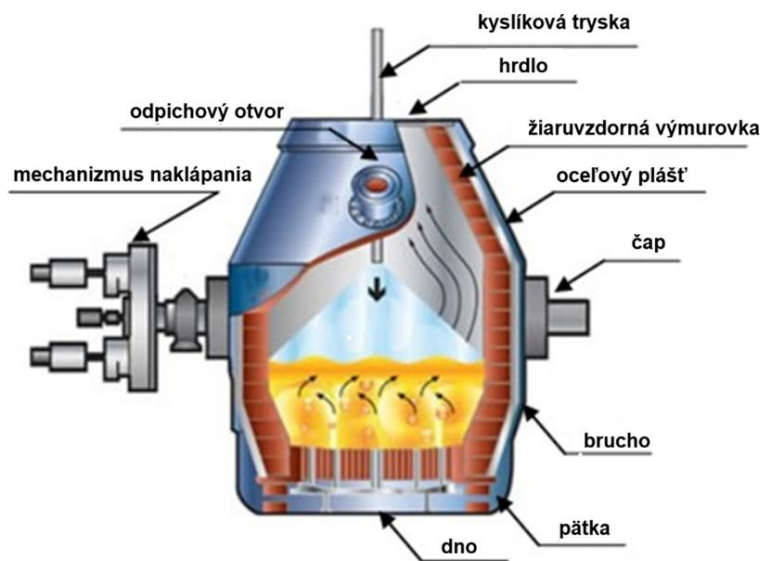


Obrázok 4.3.2 Výroba železa vo vysokej peci

Súčasne s redukciou železa dochádza aj k odstraňovaniu nežiaducich prímiesí. Vápenec sa pri vysokých teplotách rozkladá a reaguje s nečistotami prítomnými v rude, pričom vzniká troska – ľahšia tavenina plávajúca na povrchu roztaveného železa. Troska plní významnú ochrannú funkciu, pretože zabráňuje kontaktu kovového železa so vzduchom a jeho opätovnej oxidácii. Okrem toho sa môže následne využívať ako druhotná surovina napríklad pri výrobe cementu alebo stavebných materiálov.

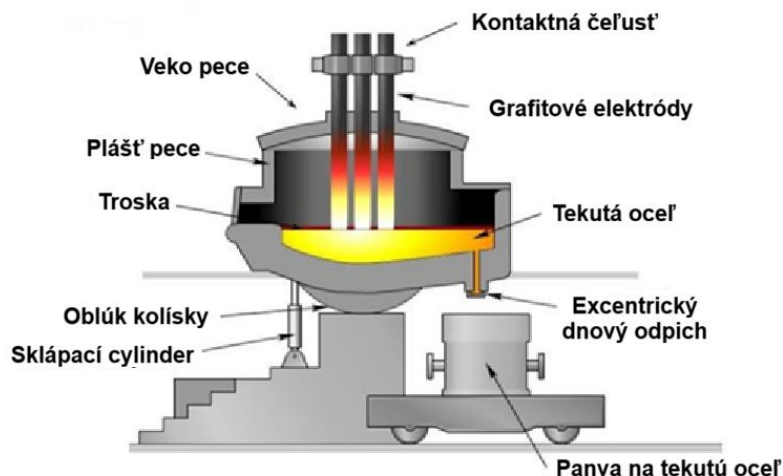
V spodnej časti vysokej pece sa zhromažďuje roztavené železo, ktoré sa v pravidelných intervaloch, približne každé dve až tri hodiny, vypúšťa procesom označovaným ako odpich pece. Súčasne sa oddeľuje aj troska. Výsledným produktom je surové železo, označované ako liatina, ktoré obsahuje vysoký podiel uhlíka (približne 3–5 %) a ďalšie prímеси, napríklad síru, fosfor, mangán alebo kremík. V dôsledku tohto chemického zloženia je liatina veľmi tvrdá, avšak zároveň krehká, čo obmedzuje jej priame využitie v konštrukčných aplikáciách.

Získané surové železo spravidla podlieha ďalšiemu spracovaniu v kyslíkových konvertoroch alebo elektrických oblúkových peciach, kde dochádza k odstráneniu nadbytočného uhlíka a nežiaducich prvkov s cieľom vyrobiť oceľ s požadovanými mechanickými vlastnosťami. Oceľ sa vyrába zo surového železa znižovaním obsahu uhlíka z približne 4 % na menej než 1,7 % prostredníctvom oxidačného procesu v konvertoroch (Obrázok 4.3.3). Výrobný proces zahŕňa predúpravu horúceho železa, oxidáciu v zásaditej kyslíkovej peci – konvertore, sekundárnu metalurgickú úpravu a následné odlievanie ocele. Do konvertora sa privádza surové železo spolu s oceľovým odpadom, pričom sa vháňa kyslík, ktorý reaguje s uhlíkom a ďalšími nečistotami za vzniku oxidov, čím dochádza k ich odstráneniu. Tekutá oceľ sa odlieva buď do ingotov alebo kontinuálne odteká. Odliate výrobky, ingoty, bramy, sochory alebo bloky sa následne spracovávajú vo valcovniach a dokončovacích výrobných linkách.



Obrázok 4.3.3 Výroba ocele - kyslíkový konvertor

Priame tavenie materiálov s obsahom železa, sa uskutočňuje v elektrických oblúkových peciach (Obrázok 4.3.4), pričom hlavný materiál je železný šrot, do ktorého sa pridávajú pelety zo železnej rudy. Ostatné suroviny sú tavidlá, práškové vápno (troskotvorná prísada) a uhlie. Zdrojom tepla je elektrický oblúk medzi elektródami a vsádzkou.



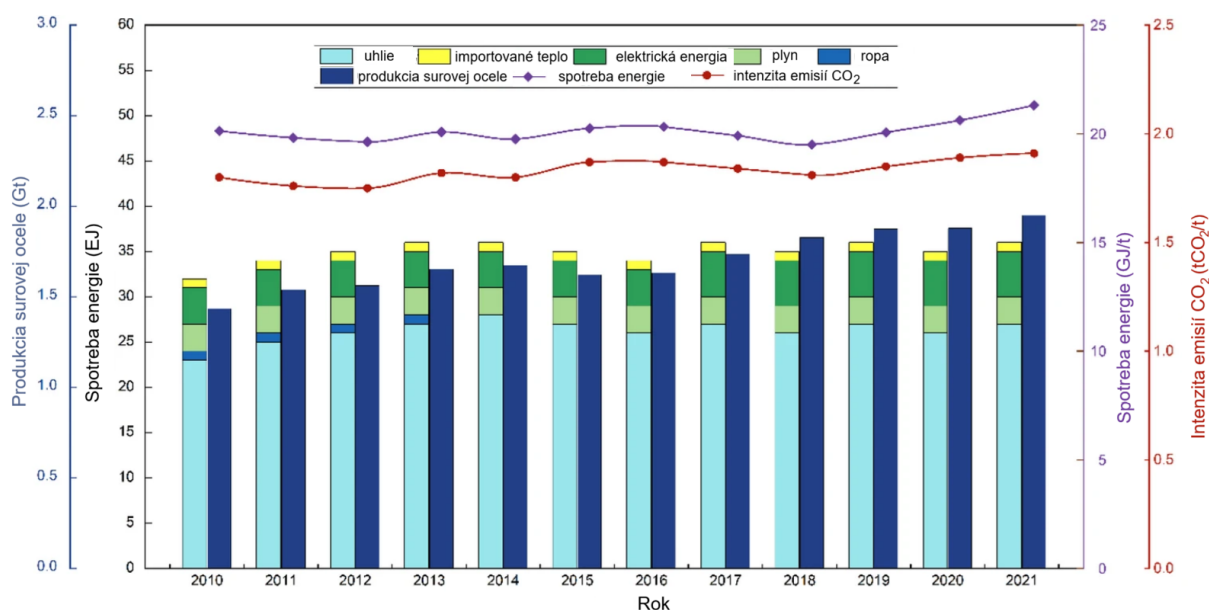
Obrázok 4.3.4 Výroba ocele - elektrická oblúčová pec

Výroba ocele je energeticky aj uhlíkovo náročná, čo z nej robí významného prispievateľa ku globálnym emisiám skleníkových plynov [1]. Oceľ vyrábaná vo vysokej peci produkuje približne 1,8 až 2,0 t CO₂ na tonu ocele. V roku 2021 dosiahla celosvetová produkcia surovej ocele 1878 miliónov ton, pričom priame emisie CO₂ z integrovaných oceliarní boli približne 2,7 Gt, čo predstavuje asi 7% celosvetových emisií CO₂. Ak sa však zohľadnia aj nepriame emisie, celkové emisie CO₂ z integrovaného oceliarskeho priemyslu (ISI – Iron and Steel Industry) dosahujú približne 3,58 Gt, teda asi 10% celosvetových emisií CO₂, čím sa oceliarsky priemysel radí medzi najväčších priemyselných producentov CO₂ [2, 3].

Oceliarsky priemysel je komplexné odvetvie so štyrmi hlavnými charakteristikami:

- úzke prepojenie s rôznymi inými priemyselnými odvetviami,
- vysoká miera recyklácie na konci životnosti výrobkov,
- potreba vysokoteplotného prostredia na tavenie ocele,
- zložitá sieť materiálových a energetických tokov v procese výroby [4].

ISI sa považuje za jedno z najnáročnejších odvetví na dekarbonizáciu. Preto je kľúčovou úlohou podporovať dekarbonizáciu oceliarskeho priemyslu v súlade s Parížskou dohodou, ktorá stanovila cieľ dosiahnuť uhlíkovú neutralitu do roku 2050 [5]. Keďže energetické náklady na výrobu ocele tvoria 20-40% celkových nákladov, tak šetrenie energiou znamená aj znižovanie nákladov [6]. Globálny ISI sa preto aktívne zapojil do projektov transformácie s cieľom zlepšiť energetickú efektívnosť. V súčasnosti sa v oceliarstve prechádza od úspor energie na úrovni jednotlivých zariadení k úsporám na systémovej úrovni, čo účinne znižuje spotrebu fosílnych palív [7]. Ako vyplýva z obrázka 4.3.5, zmena energetickej štruktúry je zatiaľ mierna – v roku 2021 uhlie stále predstavovalo približne 75% celkovej spotreby energie [8]. Okrem toho 72% svetovej produkcie surovej ocele (CS) pochádza z vysokopečno-konvertorovej trasy (BF–BOF), pričom jej emisie CO₂ tvoria asi 86% všetkých emisií ocelového priemyslu [9, 10, 11]. Avšak, množstvo emisií CO₂ pri výrobe surovej ocele sa zvýšilo z 1,80 t CO₂/t-CS v roku 2010 na 1,91 t CO₂/t-CS v roku 2021, najmä v dôsledku priemyselnej štruktúry [2]. Celkové emisie CO₂ sa teda zvyšujú spolu s rastúcou produkciou ocele [2, 3]. Z tohto dôvodu sa mnohí vedci zameriavajú na skúmanie potenciálu znižovania emisií CO₂ (CER) pri BF–BOF procese. Výskumy ukazujú, že vzhľadom na charakter výrobných procesov a energetickej štruktúry tejto trasy je potenciál úspor energie obmedzený na 25-40% celkových emisií CO₂ na tonu ocele, čo nie je postačujúce dosiahnutie uhlíkovej neutrality [12, 13].

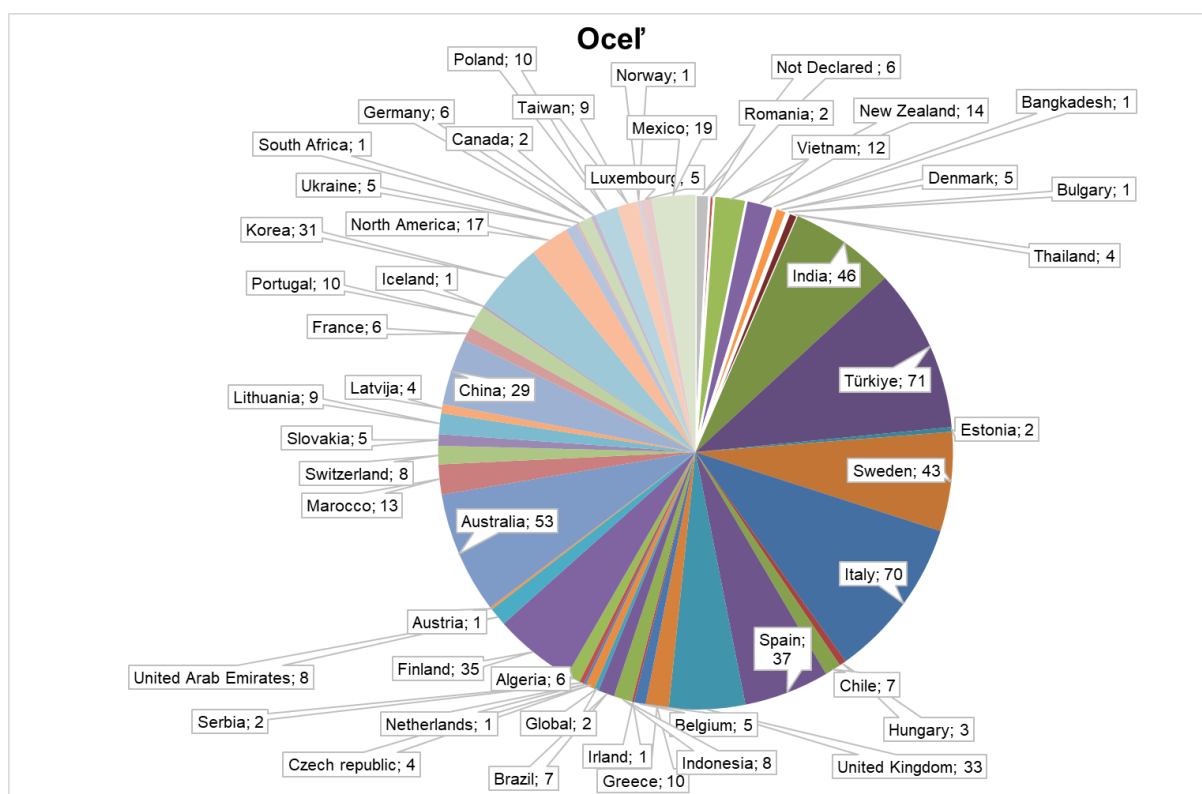


Obrázok 4.3.5 Produktivita surovej ocele, spotreba energie a emisie uhlíka v svetovom oceliarskom priemysle. Zdroj [2]

4.3.2 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG ocelových výrobkov v hodnotených krajinách

Pri spracovaní analýzy boli využité rôzne databázy environmentálnych vyhlásení o produktoch (International EPD System, EPD Global, epdsquare), ktoré obsahujú environmentálne údaje o oceli a ocelových výrobkoch od viacerých výrobcov a z rôznych krajín (Obrázok 4.3.6). Na

základe získaných údajov bola vykonaná analýza 678 EPD pre oceľ a oceľové výrobky v jednotlivých krajinách, čo umožnilo posúdiť rozsah dostupnosti environmentálnych informácií v oblasti hutníckeho a stavebného priemyslu. Následne boli z analyzovaných EPD vyhodnotené hodnoty indikátora GWP-GHG pre fázy životného cyklu A1–A3, ktoré reprezentujú emisie skleníkových plynov vznikajúce pri výrobe ocele a oceľových výrobkov. Porovnaním údajov medzi jednotlivými krajinami bolo možné určiť úroveň uhlíkovej stopy oceľových materiálov a identifikovať rozdiely vyplývajúce najmä z použitých výrobných technológií, podielu recyklovaného materiálu, energetického mixu, typu výroby ocele a efektívnosti výrobných procesov. Výsledná analýza poskytuje prehľad o environmentálnych parametroch ocele a oceľových výrobkov v medzinárodnom kontexte a vytvára podklad pre hodnotenie možností znižovania emisií CO₂ v oblasti výroby stavebných a priemyselných materiálov.



Obrázok 4.3.6 Prehľad počtu EPD pre oceľ v hodnotených krajinách (Zdroj: autori)

Tabuľka 4.3.2 prezentuje základné štatistické vyhodnotenie environmentálnych indikátorov GWP pre analyzované oceľové výrobky. Výsledky potvrdzujú, že oceľ patrí medzi materiály s vysokou uhlíkovou stopou, pričom dominantnú časť environmentálnych dopadov tvoria emisie vznikajúce počas energeticky náročnej výroby. Priemerná hodnota ukazovateľa GWP-GHG dosahuje 2061 kg CO_{2eq}/t, zatiaľ čo medián predstavuje 1930 kg CO_{2eq}/t. Vyššia priemerná hodnota oproti mediánu naznačuje prítomnosť extrémne vysokých hodnôt, ktoré ovplyvňujú výsledný priemer analyzovaného súboru. Rozsah hodnôt GWP-GHG je veľmi široký – od 1 až po 7670 kg CO_{2eq}/t. Veľké rozdiely vo výsledných hodnotách GWP-GHG pri oceľových výrobkoch sú spôsobené najmä rozdielnym charakterom výrobkov, spôsobom výroby a podielom recyklovaného materiálu.

Tabuľka 4.3.2 GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre oceľ

	GWP- celkový (kg CO _{2eq} /t)	GWP-fosílny (kg CO _{2eq} /t)	GWP- biogénny (kg CO _{2eq} /t)	GWP- LULUC (kg CO _{2eq} /t)	GWP-GHG (kg CO _{2eq} /t)
Priemer	2029	2022	4	6	2061
Min	19	15	-211	0	1
Max	7680	7706	320	2620	7670
Medián	2160	2150	1	1	1930

Výrobky obsahujúce vysoký podiel recyklovanej ocele alebo opätovne použité oceľové prvky dosahujú výrazne nižšie hodnoty uhlíkovej stopy, pretože pri ich výrobe nie je potrebné realizovať energeticky náročnú primárnu výrobu ocele z rudy. Recyklácia ocele v elektrických oblúkových peciach vyžaduje podstatne menej energie a produkuje nižšie emisie CO₂ v porovnaní s výrobou ocele vo vysokých peciach. Naopak výrobky ako skrutky, spojovací materiál alebo špeciálne oceľové komponenty môžu vykazovať veľmi vysoké hodnoty GWP-GHG na jednu tonu výrobku. Dôvodom je najmä ich technologická náročnosť výroby. Pri výrobe skrutiek sa okrem samotnej výroby ocele realizujú aj ďalšie procesy, ako sú tvárnenie a obrábanie, tepelné spracovanie, povrchové úpravy (napr. galvanizácia alebo antikoročná ochrana), presné mechanické opracovanie, vysoká spotreba energie na jednotku hmotnosti výrobku. Pri malých výrobkoch s vysokou pridanou hodnotou sa environmentálne dopady výrobných procesov rozpočítavajú na relatívne nízku hmotnosť produktu, čo spôsobuje vysoké hodnoty emisií v prepočte na jednu tonu. Navyše sa pri špeciálnych oceľových výrobkoch často používajú kvalitnejšie zliatiny a energeticky náročnejšie výrobné technológie. Výsledky preto ukazujú, že samotný materiál ešte neurčuje výslednú uhlíkovú stopu výrobku. Významný vplyv má aj miera recyklácie, technologická náročnosť spracovania, typ výrobného procesu a úroveň finálneho opracovania výrobku. Hodnoty GWP-fosílny sú veľmi podobné celkovému GWP, čo potvrdzuje, že hlavný podiel emisií pochádza z fosílnych zdrojov energie a hutníckych procesov. Priemerná hodnota GWP-fosílny dosahuje 2019 kg CO_{2eq}/t. Biogénna zložka GWP vykazuje veľmi nízke hodnoty. Priemerná hodnota predstavuje 4 kg CO_{2eq}/t, pričom minimálna hodnota dosahuje -211 kg CO_{2eq}/t. Záporné hodnoty ukazovateľa GWP-biogénny sú spôsobené najmä započítaním biogénneho uhlíka viazaného v drevených materiáloch používaných počas balenia a manipulácie s výrobkami, napríklad pri ukladaní výrobkov na drevené palety, hranoly alebo iné drevené fixačné prvky. V rámci metodiky EPD sa preto môže tento viazaný biogénny uhlík prejavovať ako záporná hodnota GWP-biogénny. Ide však o dočasné viazanie uhlíka, ktoré nesúvisí priamo s výrobným procesom ocele, ale s použitím drevených pomocných materiálov v logistike, balení a transporte výrobkov. Tento jav je častejší najmä pri výrobkoch skladovaných alebo prepravovaných na drevených paletách a podkladových hranoloch. Medián biogénnej zložky je však veľmi nízky, čo znamená, že vo väčšine prípadov má GWP-biogénny zanedbateľný význam. Ukazovateľ GWP-LULUC dosahuje v priemere nízke hodnoty (6 kg CO_{2eq}/t), avšak maximálna hodnota 2620 kg CO_{2eq}/t naznačuje, že pri niektorých výrobkoch môže mať zmena využívania pôdy výraznejší environmentálny dopad. Celkovo výsledky poukazujú na významné rozdiely v environmentálnych parametroch oceľových výrobkov. Zároveň potvrdzujú, že znižovanie uhlíkovej stopy ocele je úzko spojené s využívaním recyklovaných surovín, nízkoemisných technológií a dekarbonizáciou energetických zdrojov v hutníckom priemysle.

4.3.3 Výroba ocele na Slovensku

Na Slovensku má výroba ocele dlhodobú tradíciu a predstavuje významný priemyselný sektor s významným hospodárskym aj regionálnym prínosom.

Medzi najvýznamnejších producentov ocele na Slovensku patrí U. S. Steel Košice, ktorý zabezpečuje výrobu širokého spektra oceľových produktov, najmä plochých valcovaných výrobkov využívaných v automobilovom, stavebnom a energetickom priemysle. Výrobný proces je založený prevažne na integrovanej výrobe ocele vo vysokých peciach, pri ktorej sa ako základné suroviny používajú železná ruda, koks a vápenec. Tento spôsob výroby je

technologicky efektívny pre veľkoobjemovú produkciu, avšak zároveň patrí medzi emisne najnáročnejšie priemyselné procesy.

Významné postavenie v slovenskom hutníckom priemysle majú aj Železiarne Podbrezová. Na rozdiel od veľkokapacitnej výroby v Košiciach sa podnik orientuje predovšetkým na výrobu bezšvíkových ocelových rúr a rúrových výrobkov, ktoré nachádzajú uplatnenie najmä v energetike, automobilovom priemysle, strojárstve a tlakových systémoch. Významným aspektom výroby v Podbrezovej je vyšší dôraz na spracovanie ocelových polotovarov a efektívnejšie technologické procesy, pričom podnik dlhodobo investuje do modernizácie zariadení, energetickej efektívnosti a environmentálnych opatrení.

Výroba ocele však patrí medzi emisne náročnejšie priemyselné odvetvia, keďže pri redukcii železnej rudy vznikajú značné emisie oxidu uhličitého. Najväčší podiel emisií pochádza zo spaľovania fosílnych palív a využitia uhlíka vo forme koksu pri výrobe surového železa vo vysokých peciach. Z environmentálneho hľadiska tak oceľ patrí medzi materiály s relatívne vysokou hodnotou indikátora GWP-GHG, čo významne ovplyvňuje uhlíkovú stopu stavebných a priemyselných projektov. Prehľad vplyvu výroby vybraných ocelových výrobkov na Slovensku na GWP-GHG je uvedený v Tabuľke 4.3.3.

Tabuľka 4.3.3 Prehľad vplyvu výroby vybraných ocelových výrobkov na Slovensku na GWP-GHG

Výrobca	EPD registračné číslo	Kovový šrot (%)	Druh ocele	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /t)
Železiarne Podbrezová a. s.	S-P-05745	100	Plynulo odlievane ocelové bloky (Continuously cast steel blooms)	178
Železiarne Podbrezová a. s.	S-P-05539	100	Presné bezšvíkové ocelové rúry ťahané za studena (Precision seamless cold drawn steel tubes)	1080
Železiarne Podbrezová a. s.	S-P-05359	100	Bezšvíkové ocelové rúry valcované za tepla (Seamless hot rolled steel tubes)	538
Železiarne Podbrezová a. s.	SQ 00-044	100	Bezšvíkové ocelové rúry PE60 valcované za tepla (Seamless hot rolled steel tubes PE60)	710
Priemer				626,5
Min				178
Max				1080
Medián				624

Hodnoty indikátora GWP-GHG v module A1–A3 pre oceľ (Tabuľka 4.3) vykazujú výraznú variabilitu, pričom sa pohybujú v širokom intervale od 178 do 1080 kg CO_{2eq}/t. Priemerná hodnota dosiahla 626,5 kg CO_{2eq}/t, zatiaľ čo medián predstavuje 624,0 kg CO_{2eq}/t. Veľmi malý rozdiel medzi priemerom a mediánom naznačuje, že súbor nie je výrazne asymetrický, hoci obsahuje jednu veľmi vysokú hodnotu (1080 kg CO_{2eq}/t), ktorá poukazuje na významné rozdiely medzi jednotlivými typmi alebo spôsobmi výroby ocele.

Vzhľadom k tomu, že uvedené výrobky z ocele sú vyrábané z 100 % recyklovaného šrotu, rozdiely medzi jednotlivými hodnotami možno vysvetliť najmä typom konečného výrobku. Výroba špeciálnych ocelových profilov, vysokopevnostných výrobkov, galvanizovaných alebo povrchovo upravených ocelí si vyžaduje dodatočné technologické procesy, ako sú: tepelné spracovanie, viacnásobné valcovanie, žĺhanie, galvanizácia (zinkovanie), povrchové úpravy. Tieto procesy zvyšujú energetickú náročnosť výroby a následne aj hodnotu GWP-GHG.

Optimalizácia návrhu ocelových prvkov, využívanie recyklovanej ocele a efektívnejších výrobných technológií preto predstavujú dôležité opatrenia na znižovanie emisií skleníkových plynov v stavebnom sektore.

Verejne dostupné EPD pre všetky výrobky U. S. Steel Košice neboli v čase spracovania správy dostupné. Podnik deklaruje prípravu produktových EPD pre jednotlivé kategórie výrobkov.

Dôležitým trendom v slovenskom hutníctve je aj **zvyšovanie podielu recyklovanej ocele**, keďže oceľ možno opakovane recyklovať bez zásadnej straty kvality. Recyklácia vedie k nižšej spotrebe energie, menšiemu využívaniu primárnych surovín a významnému zníženiu emisií skleníkových plynov. Popri tom podniky investujú do **modernizácie výrobných technológií, energetickej efektívnosti, digitalizácie výrobných procesov a optimalizácie logistiky**, čím postupne znižujú environmentálne dopady svojej produkcie.

Z dlhodobého hľadiska možno očakávať, že výroba ocele na Slovensku bude čoraz viac orientovaná na nízkouhlíkové technológie, obehové hospodárstvo a vyššiu mieru recyklácie. Schopnosť slovenských hutníckych podnikov prispôbiť sa environmentálnym požiadavkám bude kľúčová nielen pre plnenie klimatických cieľov, ale aj pre zachovanie konkurencieschopnosti na európskom trhu.

4.3.4 Hlavné výzvy dekarbonizácie výroby ocele

Nízkouhlíkové technológie výroby ocele možno podľa spôsobu znižovania emisií rozdeliť do troch kategórií: substitúcia zdrojov na začiatku procesu, zvyšovanie efektívnosti výrobných procesov a recyklácia a využívanie zdrojov na konci procesu.

Náhradu energetických zdrojov smerujúcu k bezuhlíkovému alebo nízkouhlíkovému rozvoju v odvetví železa a ocele možno vo všeobecnosti rozdeliť do troch hlavných kategórií: využívanie vodíkovej energie, biomasy a obnoviteľných zdrojov energie.

Metódy znižovania emisií CO₂ sa rozšírili od zlepšovania energetickej efektívnosti k oblastiam ako:

- náhrada fosílnych palív obnoviteľnými zdrojmi energie,
- pokročilé nízkouhlíkové tavenie,
- využívanie nízkopotenciálnej energie,
- zachytávanie, využívanie a ukladanie uhlíka (CCUS),
- obehové hospodárstvo [14,15].

Zvyšovanie energetickej efektívnosti predstavuje jeden z najdôležitejších prístupov k znižovaniu emisií CO₂ v odvetví výroby železa a ocele. Možno ho realizovať na viacerých úrovniach – od optimalizácie vstupných surovín, cez zlepšenie samotných výrobných procesov až po efektívnejšie využívanie vedľajších energetických zdrojov a odpadového tepla.

Na úrovni vstupov zohráva významnú úlohu kvalita železnej rudy a koksovateľného uhlia, ktorá priamo ovplyvňuje energetickú náročnosť a emisie CO₂. Energetickú efektívnosť možno zvyšovať napríklad zvýšením miery vstrekovania práškoveho uhlia do vysokej pece s cieľom znížiť spotrebu koksu, optimalizáciou úpravníckych procesov rudy alebo zvyšovaním podielu ocelového šrotu vo výrobe [7]. Dôležitá je aj úprava surovín pred ich vstupom do výroby – napríklad technológia zhutňovania vsádzky v koksárenských batériách môže zvýšiť produktivitu približne o 10–12 % [16].

Energetickú efektívnosť možno výrazne zlepšiť aj optimalizáciou samotných výrobných procesov. Výroba ocele predstavuje komplexný dynamický systém, v ktorom opatrenia ako modernizácia zariadení, optimalizácia pomeru materiálov alebo zavedenie inteligentného riadenia procesov dokážu znížiť spotrebu energie aj emisie CO₂ [17]. Medzi konkrétne opatrenia patrí napríklad zvyšovanie účinnosti pecí, znižovanie tepelných strát pri aglomerácii, využívanie technológie vysokého podielu peliet či optimalizácia spotreby energie v elektrických oblúkových peciach [18]. Zvyšovanie výťažnosti kovu zároveň znižuje materiálovú aj energetickú náročnosť výroby.

Pokročilé nízkouhlíkové tavenie predstavuje kľúčovú transformáciu v oceliarskom a metalurgickom priemysle, ktorá sa zameriava na radikálne zníženie emisií nahradzaním koksu a uhlia čistejšími zdrojmi energie, najmä vodíkom a obnoviteľnou elektrinou. Cieľom je prechod od tradičných vysokých pecí k technológiám s takmer nulovými emisiami.

Progresívne metódy nízkouhlíkového tavenia:

- Priama redukcia železa vodíkom (-DRI): Táto technológia nahrádza uhlík vodíkom ako redukčným činidlom. Pri reakcii vzniká namiesto CO₂ vodná para.
- Elektrické oblúkové pece (EAF): Využívajú elektrickú energiu z obnoviteľných zdrojov na tavenie šrotu alebo -DRI, čo výrazne znižuje uhlíkovú stopu oproti vysokej peci.
- Tavenie v elektrickej peci (ESF) a HyREX: POSCO a BHP vyvíjajú technológiu HyREX (Hydrogen Reduction Ironmaking), ktorá využíva fluidné reaktory na priamu redukciu jemnej rudy vodíkom a následné tavenie v ESF.
- Hlsarna proces: Technológia priameho tavenia, ktorá eliminuje potrebu koksární a aglomerácií, čím znižuje emisie o 20 % a umožňuje zachytávanie zostávajúceho (CCS).
- Elektrolýza roztavených oxidov (MOE): Priama výroba kovu z rúd pomocou elektriny, kde je vedľajším produktom len kyslík.

Významný potenciál predstavuje aj využívanie vedľajších energetických zdrojov a odpadového tepla. Pri výrobe železa a ocele vzniká veľké množstvo vedľajších plynov, ako sú koksárenský plyn, vysokopečný plyn a konvertorový plyn, ktoré možno využiť napríklad na výrobu elektriny, tepla alebo vodíka [19]. Tieto plyny možno ďalej spracovať na syntézny plyn a následne na chemické produkty, napríklad metanol alebo dimetyléter [20]. Ďalším významným zdrojom energie je odpadové teplo zo strusky a technologických procesov. Moderné technológie, ako napríklad organický Rankinov cyklus, Kalinov cyklus alebo systémy výroby energie zo sytej pary, umožňujú jeho efektívne využitie [21].

Výskum naznačuje, že pomocou pokročilých technológií je možné získať späť približne 44 % odpadového tepla vznikajúceho pri výrobe železa a ocele, pričom v súčasnosti sa využíva len približne 20–25 % z celkového potenciálu [22]. Zvyšovanie energetickej efektívnosti preto zostáva jedným z kľúčových smerov budúceho znižovania spotreby energie a emisií v tomto odvetví.

4.3.4.1 Zachytávanie, využívanie a ukladanie uhlíka (CCUS)

Energetická náročnosť odvetvia výroby železa a ocele sa v posledných desaťročiach znížila približne o 60 % a súčasná výroba sa už blíži k maximálnemu termodynamickému limitu [23]. Potenciál ďalšieho zvyšovania energetickej efektívnosti sa odhaduje len na približne 15–20 %. Z tohto dôvodu sa technológie zachytávania, využívania a ukladania uhlíka (CCUS) považujú za jeden z najvýznamnejších nástrojov na výrazné zníženie emisií CO₂ v tomto odvetví.

Výskumy ukazujú, že pomocou technológií CCUS je možné znížiť emisie CO₂ v sektore železa a ocele približne o 50–85 %. Samotné tieto technológie však nedokážu zachytiť všetky emisie vznikajúce počas výroby, a preto sa pre dosiahnutie uhlíkovej neutrality uvažuje aj o ich kombinácii s technológiami bioenergie so zachytávaním a ukladaním uhlíka (BECCS) [24].

Odhady naznačujú, že globálna kapacita geologického ukladania CO₂ sa pohybuje približne medzi 10 a 20 miliardami ton, čo naznačuje dostatočný potenciál na uloženie emisií pochádzajúcich z výroby ocele [25]. Problémom však môže byť skutočnosť, že nie všetky oceliarske majú v blízkosti vhodné lokality na ukladanie zachyteného CO₂. Podľa analýz Medzinárodnej energetickej agentúry by v scenári udržateľného rozvoja mohlo zachytávanie CO₂ v sektore železa a ocele dosiahnuť približne 15,77 Gt, čo by do roku 2070 predstavovalo asi 25 % celkových emisií tohto odvetvia.

Technológie CCUS sú však stále v počiatočnej fáze rozvoja a zatiaľ sa realizuje len obmedzený počet projektov. Ekonomické analýzy ukazujú, že výroba jednej tony ocele pomocou procesov vybavených CCUS je približne o 8–9 % drahšia než pri súčasných

hlavných výrobných trasách, zatiaľ čo výroba založená na redukcii železnej rudy vodíkom môže zvýšiť náklady približne o 35–70 %. Z ekonomického hľadiska sa preto v súčasnosti javí implementácia technológií CCUS ako realizovateľnejšia alternatíva [26].

4.3.4.2 Budúce výzvy dekarbonizácie v odvetví železa a ocele

Na základe analýzy literatúry možno identifikovať niekoľko kľúčových výziev pri tvorbe dekarbonizačných stratégií pre odvetvie železa a ocele. Jednou z hlavných otázok je vzájomná prepojenosť technológií na úsporu energie a znižovanie emisií uhlíka. Výroba ocele predstavuje komplexný systém tokov materiálov a energie, v ktorom zavedenie novej alebo modernizovanej technológie ovplyvňuje celý výrobný reťazec. Preto je dôležité skúmať synergické účinky a kombinácie rôznych technológií a hodnotiť ich spoločný prínos k znižovaniu emisií CO₂ [27].

Ďalšou významnou výzvou je optimalizácia spolupráce medzi odvetvím výroby ocele a nadväzujúcimi odvetviami v dodávateľskom a odberateľskom reťazci. Zmeny v objeme výroby a štruktúre priemyslu si vyžadujú koordinované riešenia na znižovanie emisií aj v súvisiacich sektoroch. Dôležitú úlohu zohráva najmä zvyšovanie využívania ocelového šrotu a rozvoj výroby ocele v elektrických oblúkových peciach, čo si vyžaduje efektívny systém zberu a recyklácie šrotu.

Významnou podmienkou pre účinné riadenie dekarbonizácie je aj zlepšenie dostupnosti a kvality priemyselných dát. Je potrebné zjednotiť metodiky určovania hraníc výroby, výpočtu a prenosu emisií uhlíka a vytvoriť vedecky podložený systém ukazovateľov a štandardov. Takýto systém môže podporiť porovnávanie výkonnosti podnikov a prispieť k rozvoju produkcie a obchodu so „zelenou“ oceľou.

Dôležitú úlohu zohráva aj rozvoj globálneho trhu s nízkouhlíkovou oceľou. Potrebne je posilniť systém medzinárodného obchodu so šrotom a ekologicky vyrábanou oceľou a zároveň vytvárať spravodlivé environmentálne obchodné mechanizmy [28]. Kľúčovým nástrojom môžu byť aj regulačné opatrenia a politické mechanizmy podporujúce znižovanie emisií v medzinárodnom obchode.

Napokon je potrebné zohľadniť aj vysokú mieru neistoty, ktorá ovplyvňuje budúci vývoj dekarbonizačných stratégií. Faktory ako hospodársky rast, vývoj globálneho obchodu, dopyt na trhoch alebo nepredvídané udalosti, napríklad pandémie či geopolitické konflikty, môžu výrazne ovplyvniť tempo transformácie priemyslu [29]. Preto je dôležité tieto neistoty analyzovať a zahrnúť ich do modelov plánovania dekarbonizačných trajektórií.

Tabuľka 4.3.4 prezentuje hodnoty GWP-GHG pre ocel na roky 2030 a 2050 podľa predpokladaných emisných faktorov pre elektrinu s hodnotou 0,08 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2030 a 0,04 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2050 [30]. Predpokladané percentuálne zníženie emisií v roku 2030 je 68 až 78 % a v roku 2050 je 84 až 89 % až v porovnaní s emisným faktorom pre „elektrina, vysoké napätie, mix, Slovenská republika“ podľa databázy Ecoinvent 3.11 s hodnotami 0,367 kg CO_{2eq}./kWh a 0,25 kg CO_{2eq}./kWh.

Tabuľka 4.3.4 GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre ocelové výrobky v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050

EPD registračné číslo	Druh ocele	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./t)	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./t) 2030	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./t) 2050
S-P-05745	Plynulo odlievané ocelové bloky	178	39	19,40
S-P-05539	Presné bezšvíkové ocelové rúry ťahané za studena	1080	235	117,71

S-P-05359	Bezšvíkové oceľové rúry valcované za tepla	538	117	58,64
SQ 00-044	Bezšvíkové oceľové rúry PE60 valcované za tepla	710	227	113,60

Dekarbonizácia výroby ocele je kľúčovou výzvou moderného priemyslu, keďže oceliarsky sektor patrí medzi významné zdroje emisií skleníkových plynov. Dosiahnutie klimatických cieľov si vyžaduje prechod na nízkouhlíkové technológie, najmä využívanie vodíka, zvyšovanie podielu recyklovaného materiálu, zavádzanie technológií zachytávania a ukladania uhlíka (CCS) a využívanie obnoviteľných zdrojov energie či bioenergie. Naplnenie cieľov dekarbonizácie do rokov 2030 a 2050 však závisí nielen od technologických inovácií, ale aj od spolupráce priemyslu, štátu a výskumných inštitúcií, podpory investícií a vhodných regulačných podmienok. Kombinácia týchto faktorov umožní výrazne znížiť emisie a zabezpečiť udržateľnú budúcnosť oceliarskeho priemyslu.

Literatúra

1. United States Geological Survey (USGS) (2022) Iron and steel statistics and information. Reston, National Minerals Information Center. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-iron-steel.pdf>
2. World Steel Association, WSA (2022a) Exports of semi-finished and finished steel products. World Steel Association. https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/annual-production-steel-data/?ind=T_exports_sf_f_total_pub/CHN/JPN. Accessed 19 Feb 2023
3. World Steel Association, WSA (2022b) World Steel Statistical Yearbook 2022. World Steel Association. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022-1.pdf>. Accessed 19 Oct 2022
4. Rui-yu Yin, Review on the study of metallurgical process engineering (2021). Int. J. Miner. Metall. Mater., 28(8), 1253-1263. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2220-z>
5. Muslemani H, Liang X, Kaesehage K et al (2021). Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products. J Clean Prod 315:128127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128127>
6. Hasanbeigi A, Price LK, McKane AT (2010). The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook. <https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/eco/docs/SOACT-Handbook-2nd-Edition.pdf>.
7. Na H, Du T, Sun W et al (2019) Review of evaluation methodologies and influencing factors for energy efficiency of the iron and steel industry. Int J Energy Res 43(11):5659–5677. <https://doi.org/10.1002/er.4623>
8. International Energy Agency (IEA) (n.d.) Energy demand for iron and steel by fuel in the Net Zero Scenario. 2010–2030. IEA. Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/energy-demand-for-iron-and-steel-by-fuel-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>. Accessed 10 Feb 2023
9. IEA (2022a) Bioenergy, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/bioenergy>, License: CC BY 4.0. Accessed 9 Dec 2022
10. IEA (2022b) Clean energy demonstration projects database, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/clean-energy-demonstration-projects-database>. Accessed 13 Dec 2022
11. Hasanbeigi A (2022) Steel climate impact - an international benchmarking of energy and CO2 intensities. Global efficiency intelligence. Florida, United States. <https://www.globalefficiencyintel.com>. Accessed 9 Oct 2022
12. Li Y, Zhu L (2014) Cost of energy saving and CO2 emissions reduction in China's iron and steel sector. Appl Energy 130:603–616
13. The European Steel Association (EUROFER) (2020) LOW CARBON ROADMAP PATHWAYS TO A CO2-NEUTRAL EUROPEAN STEEL INDUSTRY. Available:

- EUROFER-Low-Carbon-Roadmap- Pathways- to-a- CO₂- neutr al- Europ ean- Steel- Industry. Pdf
14. Luderer G, Pehl M, Arvesen A et al (2019) Environmental co-benefits and adverse side-effects of alternative power sector decarbonization strategies. *Nat Commun* 10(1):5229
 15. Chao C, Deng Y, Dewil R et al (2021) Post-combustion carbon capture. *Renew Sustain Energy Rev* 138:110490
 16. Liu C, Li J, Tang H et al (2014) A sintering ore blending optimization model based on “iron increase and silicon reduction” ore dressing processes. *EPD Congress 2014*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, p 231-240
 17. Yin R (2021) Review on the study of metallurgical process engineering. *Int J Miner Metall Mater* 28(8):1253–1263
 18. Zhu S, Gao C, Gao C et al (2022) Exploration of a new path to reduce air pollutant emissions in the sinter plant of steelworks. *J Clean Prod* 373:133831
 19. Han R, Wang X (2022) Simulation and optimization of a combined cycle power plant with low heating value fuel gas. *Int J Model Simul Sci Comput* 13(03):2142002
 20. Angeli SD, Gossler S, Lichtenberg S et al (2021) Reduction of CO₂ emission from off-gases of steel industry by dry reforming of methane. *Angew Chem Int Ed* 60(21):11852–11857
 21. Yan T, Sun J, Qiu Z et al (2022) Energy optimization based on steam system analysis and waste energy recovery for iron and steel industry. *Energy Technol* 10(12):2200191
 22. Zhang Q, Zhao X, Lu H et al (2017) Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China’s iron and steel industry. *Appl Energy* 191:502–520
 23. Cormos C-C (2016) Evaluation of reactive absorption and adsorption systems for postcombustion CO₂ capture applied to iron and steel industry. *Appl Therm Eng* 105:56–64
 24. Yu S, Lehne J, Blahut N et al (2021) 1.5 C steel: decarbonizing the steel sector in Paris-compatible pathways. Pacific Northwest National Laboratory. [https:// www. e3g. org/ wp- conte nt/ uploa ds/1. 5C- Steel-Report_ E3G- PNNL-1. pdf](https://www.e3g.org/wp-content/uploads/1.5C-Steel-Report_E3G-PNNL-1.pdf).
 25. Fan Z, Friedmann SJ (2021) Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy. *Joule* 5(4):829–862
 26. Jones C, Piebalgs A (2022) The role of CCUS on the EU road to climate neutrality. Policy Briefs, 2022/04, Florence School of Regulation, [Gas]. [https:// hdl. handle. net/ 1814/ 73595](https://hdl.handle.net/1814/73595)
 27. Sun W, Wang Q, Zhou Y et al (2020) Material and energy flows of the iron and steel industry: status quo, challenges and perspectives. *Appl Energy* 268:114946
 28. Hasanbeigi A, Sibal A (2023) What is green steel? Definitions and scopes from standards, protocols, initiatives, and policies around the world. Global Efficiency Intelligence, Florida, United States
 29. Kim J, Sovacool BK, Bazilian M et al (2022) Decarbonizing the iron and steel industry: a systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Res Soc Sci* 89:102565
 30. https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en

4.4 Hliník

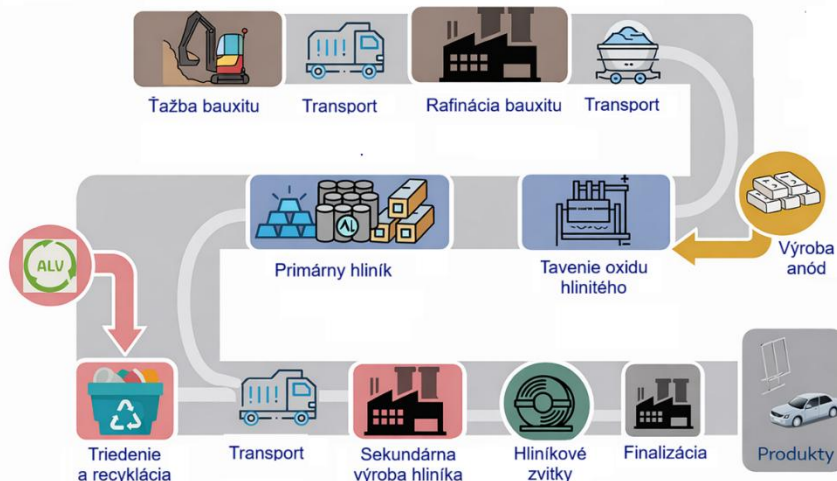
Hoci má priemyselná výroba hliníka viac ako 150 rokov, hliník prešiel dlhú cestu od zriedkavo využívaného materiálu až po materiál používaný prakticky vo všetkých oblastiach modernej ekonomiky. Na hliníku je závislé široké spektrum priemyselných odvetví, vrátane letectva, automobilového priemyslu, výroby nápojových obalov, stavebníctva, balenia potravín a mnohých ďalších [1,2]. Hliník sa v stavebníctve používa napríklad na okná, fasády, strešné konštrukcie, výťahové šachty, kompozitné panely, zábradlia a iné. Hoci je hliník najrozšírenejším kovom v zemskej kôre, nikdy sa nevyskytuje v čistej forme, ale je viazaný s inými prvkami vo forme rúd. Samotná výroba primárneho hliníka (tavenie) predstavuje približne 8 % celosvetovej spotreby elektrickej energie v priemysle [3]. V roku 2023 hlinikársky sektor ako celok vykázal približne 1,11 Gt emisií skleníkových plynov vyjadrených ako CO₂-ekvivalent (GHG) [4].

Zintenzívňujúce sa prejavy globálneho otepľovania prinútili hlavné ťažké priemyselné odvetvia znižovať svoje emisie skleníkových plynov a smerovať k cieľom uhlíkovej neutrality do roku 2050. Tento prechod však zďaleka nie je priamočiary. Rýchlo sa meniaci priemyselný sektor má tendenciu prijímať ad hoc zmierňujúce stratégie na splnenie krátkodobých regulačných požiadaviek, pričom často prehliada systematickejšie a optimálnejšie riešenia. Hoci sa viaceré štúdie zameriavajú na konkrétne dekarbonizačné technológie, existujúci výskum je roztrieštený a vzájomne neprepojený a v súčasnosti neexistuje komplexný prehľad, ktorý by kriticky hodnotil integrovaným spôsobom najmodernejšie prístupy k výrobe hliníka

Za zmienku tiež stojí, že sektory ťažkého priemyslu, ako sú výroba ocele, cementu a hliníka, sú čoraz viac uznávané ako kľúčové oblasti stratégií dosiahnutia uhlíkovej neutrality, pričom si vyžadujú osobitné dekarbonizačné cesty odlišné od sektorov výroby elektriny alebo mobility [5,6].

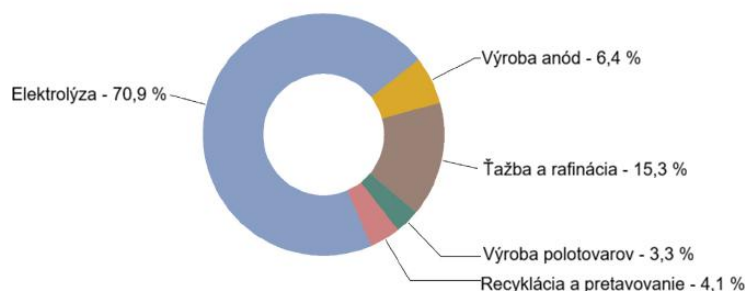
4.4.1 Výroba hliníka

Jednotlivé fázy výroby hliníka (Obrázok 4.4.1)) zahŕňajú ťažbu bauxitu, rafináciu, redukciu oxidu hlinitého, pretavovanie, valcovanie a konečné tvarovanie výrobkov.



Obrázok 4.4.1 Jednotlivé fázy výroby hliníka

Podľa Medzinárodného inštitútu pre hliník (International Aluminium Institute, IAI) je približne 71 % emisií skleníkových plynov v tomto sektore (Obrázok 4.4.2)) pripísaných elektrolytickému procesu, ktorým sa oxid hlinitý (Al_2O_3) redukuje na primárny hliník (Al). Z toho 80 % predstavujú nepriame emisie pochádzajúce z tzv. „sivej“ elektriny a 12 % priame emisie spôsobené použitím uhlíkových anód [4]. Na zmiernenie tohto vplyvu sa priemysel usiluje o zvýšené využívanie recyklovaného materiálu.

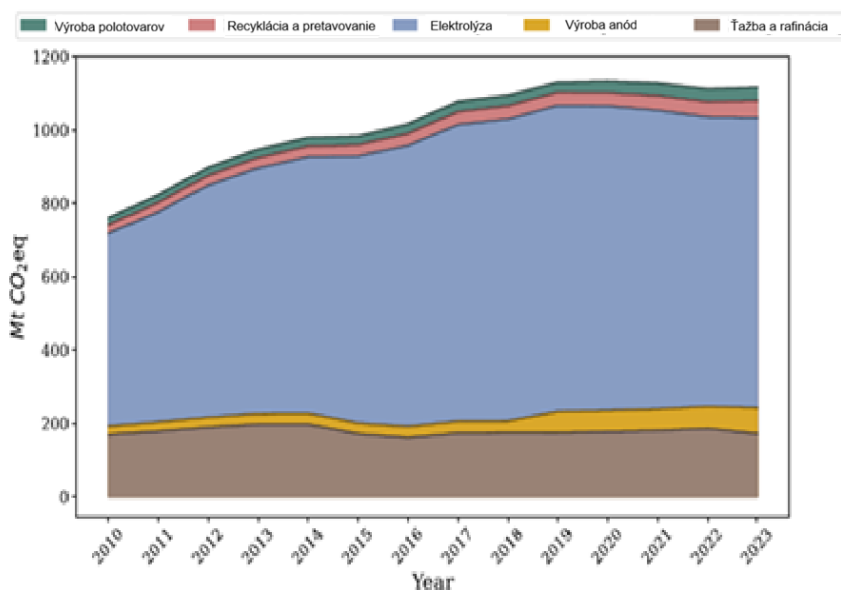


Obrázok 4.4.2 Príspevky k emisiám skleníkových plynov pri výrobe hliníka v roku 2023 [4].

Avšak vzájomná kontaminácia medzi jednotlivými zliatinami a rastúci globálny dopyt viedli k pokračujúcemu rastu primárnej výroby a emisií skleníkových plynov (Obrázok 4.4.3)), pričom sa predpokladá ich nárast až o 80 % do roku 2050 [7].

Okrem mnohých praktických priemyselných využití hliníka v súčasnej ekonomike je hliník považovaný za kľúčový prvok globálnej energetickej transformácie. Dôvodom je jeho rozsiahle využitie pri výstavbe zariadení na výrobu energie z obnoviteľných zdrojov, ako sú fotovoltické panely a veterné turbíny [8]. Nízkoemisný hliník je preto neoddeliteľne spätý s nízkoemisnou výrobou elektrickej energie – a naopak.

Hoci inovatívne triediace technológie a zlepšené recyklačné postupy môžu znížiť potrebu primárneho hliníka, je nevyhnutné dekarbonizovať celý hodnotový reťazec hliníka nad rámec samotnej dodávky energie pre elektrolytický proces. V tomto kontexte budú recyklácia a pretavovanie hliníka zohrávať čoraz významnejšiu úlohu v dekarbonizačnej stratégii odvetvia. Preto je potrebné zintenzívniť úsilie zamerané na dekarbonizáciu týchto procesov [9].

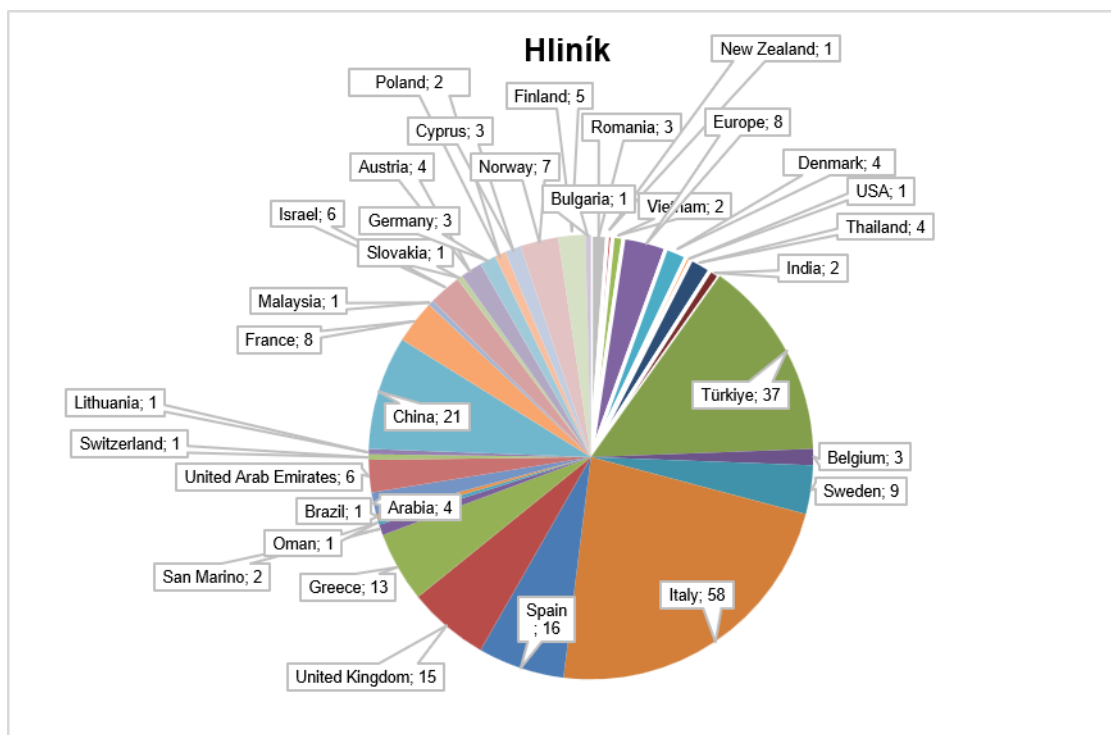


Obrázok 4.4.3 Historický trend rastu a rozloženie emisií skleníkových plynov v sektore hliníka v rokoch 2010 až 2023 [4].

4.4.2 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG hliníka a jeho výrobkov v hodnotených krajinách

Pri spracovaní analýzy boli využité rôzne databázy environmentálnych vyhlásení o produktoch (International EPD System, EPD Global, epsquare), ktoré obsahujú environmentálne údaje

o výrobe hliníka a ich výrobkov od viacerých výrobcov a z rôznych krajín. Na základe získaných údajov bola vykonaná analýza 250 EPD pre hliník a hliníkové výrobky v jednotlivých krajinách (Obrázok 4.4.4), čo umožnilo posúdiť rozsah dostupnosti environmentálnych informácií v oblasti hliníkárskeho a stavebného priemyslu. Následne boli z analyzovaných EPD vyhodnotené hodnoty indikátora GWP-GHG pre fázy životného cyklu A1–A3, ktoré reprezentujú emisie skleníkových plynov vznikajúce pri výrobe hliníka a hliníkových výrobkov. Porovnaním údajov medzi jednotlivými krajinami bolo možné určiť úroveň uhlíkovej stopy hliníkových materiálov a identifikovať rozdiely vyplývajúce najmä z použitých výrobných technológií, podielu recyklovaného materiálu, energetického mixu, typu výroby hliníka a efektívnosti výrobných procesov. Výsledná analýza poskytuje prehľad o environmentálnych parametroch hliníka a hliníkových výrobkov v medzinárodnom kontexte a vytvára podklad pre hodnotenie možností znižovania emisií CO₂ v oblasti výroby stavebných a priemyselných materiálov.



Obrázok 4.4.4 Prehľad počtu EPD pre hliník v hodnotených krajinách (Zdroj: autori)

Tabuľka 4.4.1 prezentuje základné štatistické vyhodnotenie environmentálnych indikátorov GWP pre analyzované hliníkové výrobky. Hliník patrí medzi materiály s vysokou energetickou náročnosťou výroby, avšak jeho environmentálne parametre sa môžu výrazne líšiť v závislosti od podielu recyklovaného materiálu a použitej výrobnéj technológie. Priemerná hodnota ukazovateľa GWP-GHG dosahuje 6,72 kg CO₂e/kg, pričom medián predstavuje 5,81 kg CO₂e/t. Skutočnosť, že priemer je vyšší ako medián, naznačuje prítomnosť niekoľkých výrobkov s vyššími hodnotami emisií, ktoré zvyšujú celkový priemer analyzovaného súboru. Interval hodnôt GWP-GHG je široký, a to od 0,00265 do 24,7 kg CO₂e/kg. Táto variabilita je typická pre hliníkové výrobky a súvisí najmä s rozdielnym podielom primárneho a recyklovaného hliníka.

Tabuľka 4.4.1 GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre hliník

	GWP-celkový	GWP-fosílny	GWP-biogénny	GWP-LULUC	GWP-GHG

	(kg CO _{2eq} /kg)	(kg CO _{2eq} /kg)	(kg CO _{2eq} /kg)	(kg CO _{2eq} /kg)	(kg CO _{2eq} /kg)
Priemer	6,94	6,90	0,0192	0,0913	6,72
Min	0,0462	0,0462	-6,84	0,0000002	0,00265
Max	24,6	24,6	6,56	7,6	24,7
Medián	5,84	5,865	0,009205	0,0111	5,81

Výroba primárneho hliníka z bauxitu patrí medzi energeticky najnáročnejšie metalurgické procesy, zatiaľ čo recyklácia hliníka vyžaduje len približne 5 % energie potrebnej na výrobu primárneho kovu. Výrobky s vysokým obsahom recyklovaného hliníka preto dosahujú výrazne nižšie hodnoty GWP.

Hodnoty GWP-fosílného sú prakticky identické s celkovým GWP, čo potvrdzuje, že dominantnú časť environmentálnej záťaže hliníkových výrobkov predstavujú emisie súvisiace so spotrebou energie pri výrobe a spracovaní hliníka. Priemerná hodnota GWP-fosílného dosahuje 6,90 kg CO_{2eq}/kg. Biogénna zložka GWP má v prípade hliníkových výrobkov minimálny význam. Priemerná hodnota predstavuje iba 0,0192 kg CO_{2eq}/kg a medián 0,0092 kg CO_{2eq}/kg. Výskyt záporných hodnôt (minimum -6,84 kg CO_{2eq}/kg) pravdepodobne súvisí so započítaním biogénneho uhlíka viazaného v drevených obalových a manipulačných prvkoch, ako sú palety, hranoly alebo prepravné rámy používané pri skladovaní a transporte hliníkových výrobkov. Ukazovateľ GWP-LULUC dosahuje nízke hodnoty, s priemerom 0,0913 kg CO_{2eq}/kg a mediánom 0,0111 kg CO_{2eq}/kg. To naznačuje, že emisie súvisiace so zmenou využívania pôdy majú pri hliníkových výrobkoch len okrajový význam. Vyššie maximálne hodnoty môžu byť spojené s individuálnymi metodickými prístupmi v EPD alebo so špecifickými dodávateľskými reťazcami. Celkovo výsledky ukazujú, že environmentálne dopady hliníkových výrobkov sú vo veľkej miere závislé od pôvodu materiálu a podielu recyklovaného hliníka. Výrobky využívajúce sekundárny hliník dosahujú výrazne nižšiu uhlíkovú stopu, čo potvrdzuje význam recyklácie ako jedného z najúčinnějších nástrojov na znižovanie environmentálnych dopadov hliníkoveho priemyslu.

4.4.3 Výroba hliníka na Slovensku

Na Slovensku má výroba hliníka dlhoročnú tradíciu, pričom jej hlavným centrom sa stal Žiar nad Hronom. Priemyselná výroba hliníka sa v tomto regióne rozvíjala už v období bývalého Československa, keď vznikla potreba zabezpečiť dostatočné množstvo ľahkých kovov pre rozvoj priemyslu. Významný míľnik predstavoval projekt modernizácie výroby hliníka, ktorý sa začal pripravovať začiatkom 80. rokov 20. storočia. Jeho cieľom bolo nahradiť zastarané technológie ekologickejším a výkonnejším systémom výroby založeným na modernej elektrolyze [10].

Kľúčovú úlohu vo výrobe hliníka na Slovensku zohrávala spoločnosť Slovalco, založená v roku 1993 v Žiari nad Hronom. Spoločnosť vznikla s cieľom dokončiť modernizáciu výroby a zaviesť efektívnejšie technológie založené na elektrolytickom procese. Od roku 1996 závod fungoval na plný výkon a stal sa významným producentom primárneho hliníka v strednej Európe. Výroba bola založená na elektrolyze oxidu hlinitého, pri ktorej sa pomocou elektrickej energie získava čistý hliník. Tento proces patrí medzi energeticky najnáročnejšie metalurgické procesy, čo významne ovplyvňuje ekonomiku výroby.

Význam slovenského hliníkárskeho priemyslu spočíval nielen v produkcii samotného kovu, ale aj v nadväzujúcich odvetviach, ako je výroba lisovaných profilov, komponentov pre stavebníctvo či automobilový priemysel. Významným partnerom v tomto odvetví je aj spoločnosť Hydro, ktorá na Slovensku pôsobí prostredníctvom výroby hliníkových profilov a podieľa sa na rozvoji spracovania hliníka.

V posledných rokoch však slovenský hlinikársky priemysel čelil významným výzvam, najmä rastúcim cenám elektrickej energie a zvýšeným výrobným nákladom, ktoré výrazne ovplyvnili konkurencieschopnosť domácej produkcie. Napriek týmto problémom zostáva výroba a spracovanie hliníka dôležitou súčasťou slovenského priemyslu a významným prvkom hospodárskeho rozvoja krajiny. Prehľad vplyvu výroby vybraných hliníkových výrobkov na Slovensku na GWP-GHG je uvedený v Tabuľke 4.4.2.

Tabuľka 4.4.2 Prehľad vplyvu výroby vybraných hliníkových výrobkov na Slovensku na GWP-GHG

Výrobca	EPD registračné číslo	Druh výrobku	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /kg)
Hydro Extrusion Slovakia a.s. Žiar nad Hronom	EPD-IES-0015658	Hliníkové profily v surovom stave	6,53
Hydro Extrusion Slovakia a.s. Žiar nad Hronom	EPD-IES-0015593:002	Profily v surovom stave, eloxované	7,23
Hydro Extrusion Slovakia a.s. Žiar nad Hronom	EPD-IES-0015657:002	Profily v surovom stave, spracované	6,90
Hydro Extrusion Slovakia a.s. Žiar nad Hronom	EPD-IES-0015656	Profily v surovom stave, eloxované, spracované	7,65
Slovalco	NEPD-1839-768-EN	Hydro Aluminium Extrusion Ingot Europe (GWP)	5,71
Priemer			6,80
Min			5,71
Max			7,65
Medián			6,90

Na základe hodnôt GWP-GHG A1–A3 (6,53; 7,23; 6,90; 7,65; 5,71 kg CO_{2eq}/kg) možno konštatovať, že environmentálna záťaž hliníkového výrobku v etape A1–A3 (ťažba surovín, doprava a výroba) vykazuje relatívne stabilné výsledky s miernou variabilitou. Priemerná hodnota dosahuje 6,80 kg CO_{2eq}/kg, pričom medián (6,90 kg CO_{2eq}/kg) je veľmi blízky priemeru, čo naznačuje, že súbor údajov nie je výrazne ovplyvnený extrémnymi hodnotami a rozdelenie výsledkov je pomerne vyvážené.

Rozsah medzi minimálnou (5,71 kg CO_{2eq}/kg) a maximálnou hodnotou (7,65 kg CO_{2eq}/kg) predstavuje rozdiel 1,94 kg CO_{2eq}/kg, čo poukazuje na určitú mieru variability medzi analyzovanými EPD údajmi. Táto odlišnosť môže byť spôsobená rozdielnym podielom recyklovaného hliníka, použitou výrobnou technológiou, energetickým mixom krajiny pôvodu alebo rozdielnymi metodickými prístupmi jednotlivých výrobcov pri tvorbe EPD dokumentácie. Pri hliníku je práve pôvod elektrickej energie a podiel sekundárnej suroviny zásadným faktorom ovplyvňujúcim uhlíkovú stopu.

Z pohľadu environmentálneho hodnotenia možno výsledky interpretovať ako stredne konzistentné, bez výrazných odľahlých hodnôt. Najnižšia hodnota (5,71 kg CO_{2eq}/kg) môže reprezentovať výrobok s efektívnejším výrobným procesom alebo vyšším obsahom recyklovaného materiálu, zatiaľ čo najvyššia hodnota (7,65 kg CO_{2eq}/kg) pravdepodobne odráža energeticky náročnejšiu výrobu. Pri výbere hliníkových produktov z hľadiska udržateľnosti je preto vhodné zohľadniť konkrétne EPD deklarácie a preferovať riešenia s nižším potenciálom globálneho otepľovania v etape A1–A3, keďže táto fáza zvyčajne predstavuje dominantnú časť environmentálnej záťaže materiálu.

4.4.4 Výzvy pri dosahovaní uhlíkovej neutrality v hlinikárskom priemysle

Napriek neustálemu zlepšovaniu priemyselných postupov zostáva výroba hliníka spojená s významnou uhlíkovou stopou. V rozvojových regiónoch je táto výzva ešte umocnená potrebou zosúladiť priemyselný rast s rozsiahlymi dekarbonizačnými opatreniami, často bez prístupu k plne komercializovaným nízkouhlíkovým technológiám [11]. Priemerné globálne emisie hlinikárskeho priemyslu v rozsahu „od kolísky po bránu“ (cradle-to-gate) v posledných rokoch klesli na hodnotu 10,3 t CO_{2eq}/t hliníka

[12]. Napriek tomuto pokroku sa očakáva, že dopyt po hliníku bude rásť až do roku 2050. Na splnenie cieľa Parížskej dohody obmedziť globálne otepľovanie na 1,5 °C by bolo potrebné znížiť emisie sektora na približne na 250 Mt CO_{2eq} do roku 2050, čo je menej ako odhad pri zachovaní súčasného stavu 1,6 Gt CO_{2eq} podľa scenára „business-as-usual“ [13,14].

Niektorí poprední výrobcovia hliníka si stanovili vlastné environmentálne ciele:

- Novelis Inc.: dosiahnutie uhlíkovej neutrality do roku 2050, zníženie uhlíkovej stopy o 30 % a zníženie energetickej a vodnej náročnosti o 10 % do roku 2026 [28]. Medzi špecifické ciele spoločnosti Novelis Europe patrí dosiahnutie 75 % podielu recyklovaného materiálu vo výrobkoch pre EÚ a nulové emisie rozsahu 1 a 2 v závode Novelis Sierre do roku 2035.
- Alcoa: zníženie uhlíkovej intenzity o 30 % do roku 2025 a o 50 % do roku 2050 [15].
- Rio Tinto: dosiahnutie nulových priamych emisií do roku 2050, zníženie uhlíkovej intenzity o 30 % a zníženie absolútnych emisií o 15 % do roku 2030 [16].
- Norsk Hydro: dosiahnutie nulových priamych emisií do roku 2050, zníženie priamych emisií o 10 % do roku 2025 a o 30 % do roku 2030 v porovnaní s úrovňami z roku 2018 [17].

Na základe súčasnej priemyselnej praxe možno hlavné výzvy dekarbonizácie hlinikárskeho priemyslu zhrnúť nasledovne:

- Emisie z primárnej výroby

Primárna výroba hliníka je zodpovedná za prevažnú časť emisií sektora (približne 93 %), čo je dôsledkom vysokej energetickej náročnosti Hallou–Héroultovho procesu (13–15 kWh/kgAl) a priamych emisií súvisiacich s použitím uhlíkových anód (≈1,5 tCO₂/tAl) [18-19]. Dekarbonizácia si vyžaduje prechod na nízkouhlíkové zdroje elektrickej energie a vývoj škálovateľných, ekonomicky efektívnych technológií tavenia, ktoré zachovávajú požadovanú kvalitu produktu [18].

- Efektívnosť recyklácie

Hoci recyklácia hliníka produkuje až o 95 % nižšie emisie skleníkových plynov v porovnaní s primárnou výrobou, pretrvávajú viaceré prekážky, vrátane vzájomnej kontaminácie zliatin, nedostatočnej účinnosti triedenia šrotu a obmedzení vyplývajúcich zo súčasného dizajnu komponentov [20-21]. Riešenie týchto problémov bude kľúčové s rastúcim dopytom a postupným prechodom odvetvia na cirkulárne materiálové toky [20].

- Emisie zo sekundárnych procesov

So zvyšujúcim sa podielom recyklácie budú nadobúdať väčší význam emisie pochádzajúce z taviarní, odlievacích prevádzok a valcovní (v súčasnosti približne 5 %). Tieto procesy sú energeticky náročné, prebiehajú pri vysokých teplotách (presahujúcich 1000 °C) a ich elektrifikácia je technologicky náročná. Zvyšovanie energetickej účinnosti a zavádzanie nízkouhlíkových riešení pre výrobu tepla sú nevyhnutné pre ich udržateľné rozširovanie [22].

- Vplyvy surovinovej základne

Ťažba bauxitu a jeho rafinácia predstavujú druhý najväčší príspevok k celkovej uhlíkovej stopě hlinikárskeho priemyslu (približne 15 %). Hoci zníženie dopytu po primárnom hliníku prispeje k obmedzeniu tohto vplyvu, bude zároveň potrebné vyvinúť alternatívne chemické postupy na

separáciu a izoláciu oxidu hlinitého , ktoré budú energeticky efektívnejšie a environmentálne priaznivejšie [23].

4.4.4.1 Výzvy dekarbonizácie hliníkarskeho priemyslu v stavebníctve

Hliník patrí medzi najčastejšie používané materiály v moderných budovách a infraštruktúre, pričom sa využíva najmä pri výrobe okenných rámov, fasádnych systémov, strešných konštrukcií, výťahových komponentov a rôznych technických zariadení. Použitie hliníka vyrobeného s nízkou uhlíkovou stopou alebo z recyklovaných zdrojov umožňuje výrazne znížiť množstvo viazaného uhlíka (embodied carbon), ktorý vzniká počas výroby stavebných materiálov ešte pred samotnou prevádzkou budovy. Vzhľadom na rastúci dôraz na udržateľnú výstavbu a environmentálnu zodpovednosť sa nízkouhlíkový hliník stáva čoraz významnejším faktorom pri navrhovaní a realizácii stavebných projektov.

Význam dekarbonizácie podporujú aj medzinárodné environmentálne certifikačné systémy, ako sú LEED a BREEAM, ktoré pri hodnotení budov zohľadňujú uhlíkovú stopu použitých materiálov. Tieto systémy vytvárajú tlak na investorov, projektantov aj dodávateľov, aby uprednostňovali materiály s nižšími environmentálnymi dopadmi. V dôsledku toho rastie dopyt po takzvanom „zelenom hliníku“, teda hliníku vyrábanom s využitím obnoviteľných zdrojov energie, moderných nízkoemisných technológií alebo vysokého podielu recyklovaného materiálu.

Napriek významnému potenciálu však implementácia nízkouhlíkového hliníka v stavebníctve prináša viacero výziev. Jednou z hlavných prekážok je ekonomická stránka. Výroba hliníka s nízkou uhlíkovou stopou si často vyžaduje investície do nových technológií a obnoviteľných zdrojov energie, čo môže viesť k vyšším obstarávacím nákladom. Stavebné spoločnosti a investori preto musia byť ochotní akceptovať prípadne vyššiu cenu materiálu výmenou za nižšie environmentálne dopady a lepšie hodnotenie udržateľnosti projektu. Dôležitým faktorom je aj transparentnosť dodávateľského reťazca. Preukázanie pôvodu hliníka, jeho uhlíkovej stopy, podielu recyklovaného obsahu a príslušných certifikácií si vyžaduje efektívne systémy sledovania a overovania údajov. Ďalšou výzvou je technologická dostupnosť, keďže nie všetci výrobcovia disponujú rovnakými výrobnými možnosťami. To môže viesť k regionálnym rozdielom v environmentálnych parametroch hliníka a obmedzovať dostupnosť nízkouhlíkových produktov na trhu.

Z pohľadu stavebnej praxe je preto vhodné pri výbere hliníkových komponentov zohľadňovať nielen ich technické vlastnosti a cenu, ale aj spôsob výroby a environmentálne parametre. Projektanti, investori a stavebné firmy by mali uprednostňovať recyklovaný hliník alebo hliník vyrobený s nízkou uhlíkovou stopou a od dodávateľov požadovať informácie o emisiách, recyklovanom obsahu, použitých technológiách a príslušných certifikáciách. Významným nástrojom môže byť aj združovanie dopytu po nízkouhlíkových materiáloch v rámci väčších stavebných projektov alebo developerských skupín, čím sa zvýši tlak na výrobcov a podporí rozvoj trhu so zeleným hliníkom.

4.4.4.2 Usmernenia na dosiahnutie cieľov odvetvia do roku 2050

Medzinárodný inštitút pre hliník publikoval usmernenia na dosiahnutie cieľov odvetvia, ktorými je zníženie emisií skleníkových plynov o 80 % do roku 2050 [12]. Definovali tri široké oblasti s najvyšším potenciálom prispieť k oddeleniu rastu produkcie hliníka a emisií :

- Dekarbonizácia výroby elektrickej energie: ktorá je nevyhnutná pre hliníkarský priemysel vzhľadom na obrovskú stopu primárnej výroby hliníka. Smernica IAI zdôrazňuje, že dekarbonizovaná výroba energie a rýchle nasadenie CCUS (carbon capture, utilization, and storage) ponúkajú najväčšiu príležitosť na zníženie emisií. Energetický mix používaný taviarňami v roku 2018 pozostával prevažne zo 60 % elektriny z uhlia, 22 % vodnej energie a 10 % zemného plynu. Scenár nad 2 °C (B2DS

- Beyond 2°C Scenario) predpokladá do roku 2050 najmä využitie iných obnoviteľných zdrojov (≥60 %) a vodnej energie (~20 %). Ďalším potenciálnym technologickým riešením je použitie riešení CCUS v elektrárnach na zníženie ekologickej stopy dodávok elektriny.

Tabuľka 4.4.3 prezentuje hodnoty GWP-GHG pre výrobu hliníka na Slovensku na roky 2030 a 2050 podľa predpokladaných emisných faktorov pre elektrinu s hodnotou 0,08 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2030 a 0,04 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2050 [24]. Predpokladané percentuálne zníženie emisií v roku 2030 je 70,5 % a v roku 2050 je 85,2 % až v porovnaní s emisným faktorom pre „elektrina, vysoké napätie, mix, Slovenská republika“ podľa databázy Ecoinvent 3.11 s hodnotami 0,27 kg CO_{2eq}./kWh.

Tabuľka 4.4.3 GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre hliníkové výrobky v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050

EPD registračné číslo	Druh výrobky	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg)	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg) 2030	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg) 2050
EPD-IES-0015658	Hliníkové profily v surovom stave	6,53	1,93	0,97
EPD-IES-0015593:002	Profily v surovom stave, eloxované	7,23	2,14	1,07
EPD-IES-0015657:002	Profily v surovom stave, spracované	6,9	2,04	1,02
EPD-IES-0015656	Profily v surovom stave, eloxované, spracované	7,65	2,27	1,13
NEPD-1839-768-EN	Hydro Aluminium Extrusion Ingot Europe (GWP)	5,71	1,69	0,85

- Priame zníženie emisií: možno ho dosiahnuť nahradením konvenčnej elektrolýzy technológiou inertných anód alebo inými inovatívnymi alternatívami a nahradením fosílnych palív (najmä zemného plynu) v sekundárnych hliníkových peciach. Obnoviteľné palivá, ako napríklad zelený vodík alebo možnosti získané z biomasy, sú jednou z alternatív, zatiaľ čo riešenia CCUS by mohli tiež zohrávať úlohu pri zmierňovaní priamych dopadov hliníkarskeho priemyslu. Dosiahnutie tohto cieľa v súlade s B2DS je možné prostredníctvom kombinácie CCUS, inertných anód a elektrifikácie rafinérií a zlievarní alebo prechodu na iné palivo.
- Zlepšená recyklácia a efektívnosť využívania zdrojov: využitie jednej z jedinečných výhod hliníka, a to jeho nekonečnej recyklovateľnosti bez straty vlastností. Výzvou v tomto ohľade je hlavne zabránenie vzájomnej kontaminácie zliatin, ktorá je výsledkom miešania rôznych typov hliníkových zliatin. Efektívne stratégie zberu na konci životnosti, inovatívne návrhy komponentov pre jednoduchšie oddelenie zliatin, pokročilé technológie triedenia a zvýšená materiálová efektívnosť v krokoch odlievania a recyklácie sú kľúčové pre umožnenie dekarbonizácie odvetvia.

Nasledujúce štvrtstoročie bude rozhodujúce pre transformáciu hliníkarskeho priemyslu smerom k nízkouhlíkovej výrobe a napĺňaniu stanovených environmentálnych cieľov. Emisie skleníkových plynov v globálnom hliníkarskom sektore dosahovali v roku 2023 približne 1,1 Gt CO_{2eq}. V scenári bez dodatočných dekarbonizačných opatrení by mohli do roku 2050 vzrásť na približne 1,6 Gt CO_{2eq}, zatiaľ čo klimaticky kompatibilné scenáre predpokladajú ich zníženie na približne 250 Mt CO_{2eq} do roku 2050.

Dekarbonizácia hliníkarskeho priemyslu preto predstavuje komplexný proces vyžadujúci súčasné uplatňovanie technologických inovácií, transformáciu energetických zdrojov a rozvoj princípov obehového hospodárstva. Úspešné naplnenie stanovených cieľov bude závisieť od úzkej spolupráce výrobcov hliníka, energetického sektora, tvorcov politík a tiež stavebníctva, ktoré patrí medzi najvýznamnejších spotrebiteľov hliníkových výrobkov.

Literatúra

1. J.M. Cullen, J.M. Allwood, Mapping the global flow of aluminum: From liquid aluminum to end-use goods, *Environ. Sci. Technol.* 47 (7) (2013) 3057–3064, <http://dx.doi.org/10.1021/es304256s>.
2. K. Cervantes Barron, M.E. Hakker, J.M. Cullen, Material requirements for future low-carbon electricity projections in Africa, *Energy Strat. Rev.* 44 (2022) 100890, <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2022.100890>.
3. K. Kermeli, P.-H. Ter Weer, W. Crijns-Graus, E. Worrell, Energy efficiency improvement and GHG abatement in the global production of primary aluminium, *Energy Effic.* 8 (4) (2015) 629–666, <http://dx.doi.org/10.1007/s12053-014-9301-7>.
4. IAI, Greenhouse gas emissions – aluminium sector, 2024, URL <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminiumsector/>.
5. Mallett, P. Pal, Green transformation in the iron and steel industry in India: Rethinking patterns of innovation, *Energy Strat. Rev.* 44 (2022) 100968, <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2022.100968>.
6. P. Korkmaz, D. Schmid, U. Fahl, Incorporating uncertainties towards a sustainable European energy system: A stochastic approach for decarbonization paths focusing on the transport sector, *Energy Strat. Rev.* 38 (2021) 100707, <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2021.100707>.
7. IAI, IAI material flow model - 2021 update, 2021, URL <https://internationalaluminium.org/resource/iai-material-flow-model-2021-update/>.
8. K. Hund, D.L. Porta, T.P. Fabregas, T. Laing, J. Drexhage, Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition, Tech. Rep., World Bank, Washington, D.C., 2020, URL <http://documents.worldbank.org/curated/en/099052423172525564>.
9. Q. Wang, Y. Li, R. Li, Integrating artificial intelligence in energy transition: A comprehensive review, *Energy Strat. Rev.* 57 (2025) 101600, <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2024.101600>.
10. <https://www.slovalco.sk/>
11. K.F. Al-tabatabaie, M.B. Hossain, M.K. Islam, M.R. Awual, A.R.M. TowfiqulIslam, M.A. Hossain, M. Esraz-Ui-Zannat, A. Islam, Taking strides towards decarbonization: The viewpoint of Bangladesh, *Energy Strat. Rev.* 44 (2022) 100948, <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2022.100948>.
12. IAI, Aluminium industry reports decline in greenhouse gas emissions, 2024, URL <https://international-aluminium.org/aluminium-industry-reports-declinein-greenhouse-gas-emissions/>.
13. IAI, Aluminium sector greenhouse gas pathways to 2050, 2021, URL <https://international-aluminium.org/resource/aluminium-sector-greenhousegas-pathways-to-2050-2021/>.
14. IEA, Energy technology perspectives 2020. Paris: IEA, 2020, URL <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
15. Alcoa, 2022 sustainability report, 2022, URL <https://www.alcoa.com/sustainability>.
16. Rio Tinto, 2022 sustainability reporting, 2022, URL <https://www.riotinto.com/en/invest/reports/sustainability-report>.
17. Norsk Hydro, Climate, 2022, URL <https://www.hydro.com/en/sustainability/our-approach/environmental/climate/>.
18. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Aluminium. Paris: IEA, 2023.
19. INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050. London: IAI, 2021.

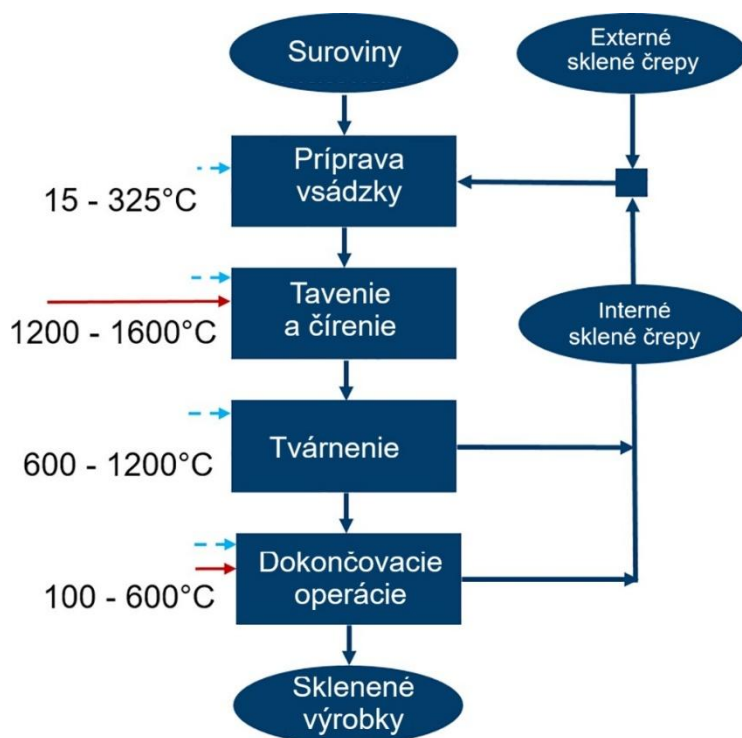
20. EUROPEAN ALUMINIUM. Circular Aluminium Action Plan. Brussels: European Aluminium, 2020.
21. Reuter, M. A.; Hudson, C.; Van Schaik, A. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. Oxford: Elsevier, 2013.
22. UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. Industrial Decarbonization and Energy Efficiency in Metals Processing. Vienna: UNIDO, 2022.
23. Habashi, F. Handbook of Extractive Metallurgy. Weinheim: Wiley-VCH, 1997.
24. https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en

4.5 Sklo

Sklo je všestranný materiál, ktorý nachádza široké uplatnenie v stavebníctve, automobilovom priemysle, elektrotechnike, zdravotníctve a obalovom priemysle. V stavebníctve sa využíva najmä na výrobu okien, fasád, dverí a izolačných skiel, pričom prispieva k energetickej efektívnosti, bezpečnosti a estetickému vzhľadu budov.

4.5.1 Výroba skla

Hoci sa jednotlivé odvetvia sklárskeho priemyslu môžu výrazne líšiť z hľadiska používaných výrobných a spracovateľských technológií, každý proces výroby skla možno rozdeliť na reťazec základných procesných krokov, ako je znázornené na obrázku 4.5.1. Výrobný proces začína surovinami, ktoré prechádzajú rôznymi technologickými stupňami s odlišnými teplotnými úrovňami a energetickými nárokmi. Základnou surovinou na výrobu skla je kremičitý piesok, ktorý je hlavným zdrojom oxidu kremičitého (SiO_2). Na zníženie teploty tavenia sa do vsádzky pridáva sóda (uhličitan sodný) a na zvýšenie chemickej stability skla vápenec alebo dolomit. Významnou súčasťou vsádzky sú aj recyklované sklené črepy, ktoré znižujú spotrebu energie a množstvo potrebných primárnych surovín. Približné teplotné úrovne a energetické požiadavky sú uvedené na obrázku 4.5.1.



Obrázok 4.5.1 Procesné kroky výroby skla s typickými teplotnými úrovňami a kvalitatívnou úrovňou energetickej náročnosti

Svetlomodré šípky označujú spotrebu elektrickej energie, zatiaľ čo tmavočervené šípky označujú spotrebu tepelnej energie dodávanej z fosílnych energetických zdrojov (upravené podľa [1])

Najväčším spotrebiteľom energie je proces tavenia. V závislosti od druhu vyrábaného skla sa na tavenie spotrebuje približne 50 až 85 % celkovej energie potrebnej na výrobu. Tavenie zvyčajne prebieha pri teplotách od 1200 do 1600 °C. Okrem toho je energia potrebná aj na prevádzku pomocných zariadení, ako sú kompresory alebo elektromotory. V závislosti od výrobného procesu môžu byť integrované aj sekundárne opatrenia na znižovanie emisií,

pričom najdôležitejšie sú odprášovanie, odsírenie kyslých zložiek spalín a znižovanie emisií oxidov dusíka.

Sklené črepy vstupujú do výrobného procesu prostredníctvom interného a/alebo externého recyklačného toku. Zatiaľ čo výroba obalového skla a sklenej vlny využíva externé aj interné črepy, výroba plochého, špeciálneho a stolového skla využíva takmer výlučne interné črepy [1]. Podiel interných črepov zodpovedá požadovanej kvalite skla. Čím vyšší je obsah interných črepov, tým vyššie sú požiadavky na kvalitu skla, pretože aj najlepšie riadené sklárske procesy podliehajú štatistickým odchýlkam. V závislosti od požadovanej kvality, napríklad z hľadiska rozbitia alebo štrukturálnych chýb, preto vznikajú rôzne množstvá nevyhovujúcich výrobkov.

Po zmiešaní surovín a črepov v procese prípravy vsádzky nasleduje tavenie skla v taviacej peci, potom tvárnenie, operácie po tvárnení a dokončovacie spracovanie, na konci ktorých vzniká finálny sklenený výrobok.

Výroba skla je energetický náročná kvôli vysokému podielu energie na tonu produktu [2]. Napríklad výroba 1 kg skla v plynovej peci generuje približne 0,6 kilogramu CO₂, z čoho 0,45 kilogramu pochádza zo spaľovania fosílnych palív a 0,15 kilogramu z rozkladu suroviny na báze uhličitanov [3]. Približne 75 % až 85 % celkovej energetickej spotreby potrebnej na výrobu skla vzniká pri tavení surovín v peci pri teplote vyššej ako 1500 °C. Počas tohto procesu vzniká veľké množstvo emisií. Ďalšími spotrebiteľmi elektrickej energie v závode na výrobu obalového skla sú kompresory používané na dodávku vzduchu pre procesy tvarovania skla [4]. Čerpadlá sú ďalším nástrojom, ktorý využíva elektrinu, najmä na vrecovú filtráciu na odstránenie znečistenia časticami z dopravníkov, motorov, elektrických ventilátorov, výfukových plynov, laminovania, zariadení na poťahovanie skla a obalov [5]. Spotrebe energie, ktorá konsoliduje európsky a americký sklársky priemysel, dominuje zemný plyn, ktorý často predstavuje približne 75 – 85 %, nasleduje spotreba elektriny s približne 10 – 15 % a zvyšných 5 – 10 % tvoria fosílna palivá [6].

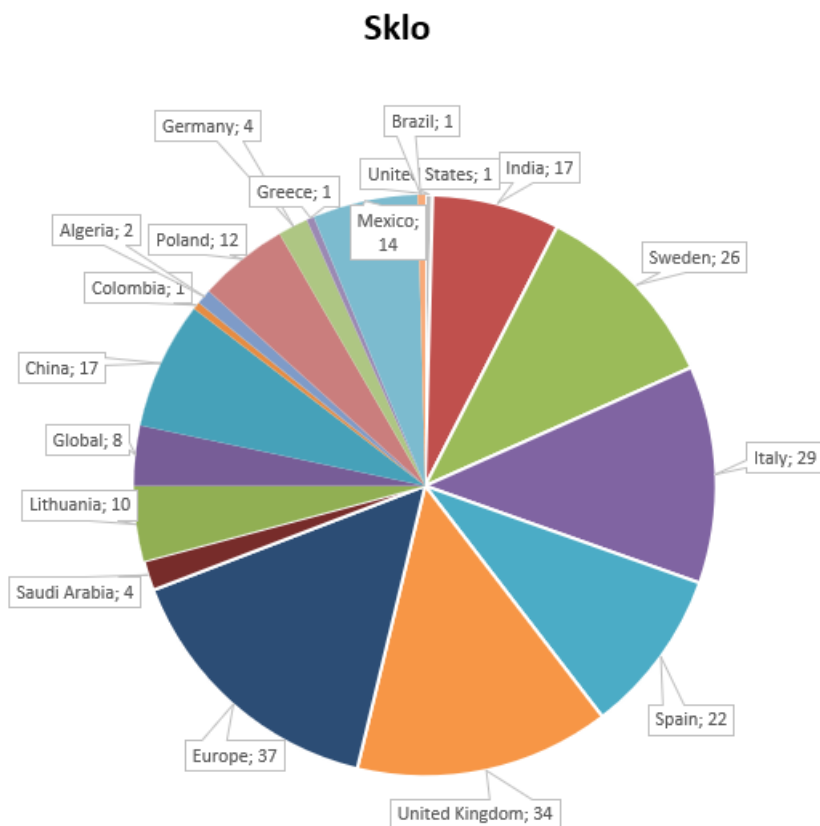
Priemysel na výrobu obalov a plochého skla, ktorý spolu predstavuje 80 % celkovej výroby skla, emituje viac ako 60 miliónov ton CO₂ ročne. Environmentálne problémy súvisiace so sklárskym priemyslom sa však neobmedzujú len na fázu výroby, ale aj na ťažbu surovín, ktorá má vplyv na miestne ekosystémy a vytvára ďalšie environmentálne výzvy súvisiace s likvidáciou odpadu a skládkami.

Sko je prítomné aj v menej viditeľných oblastiach, napríklad vo forme sklenených vlákien pre izoláciu a spevnenie, optických vlákien pre telekomunikácie, odpadového skla ako súčasti stavebných materiálov či na zapuzdrenie jadrového odpadu. Ďalšie aplikácie zahŕňajú biomedicínske prístroje a implantáty v medicíne (napr. pri laparoskopii) a stomatológii, elektrostatickú fotografiu, elektronické spínače a pamäte, lasery, spájky, sol-gél sklo, senzory a nelineárnu, aktívnu a digitálnu optiku [7].

4.5.2 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG výroby skla v jednotlivých krajinách

Pri spracovaní analýzy boli využité rôzne databázy environmentálnych vyhlásení o produktoch (International EPD System, EPD Global, epdsquare), ktoré obsahujú environmentálne údaje o výrobkoch skla od viacerých výrobcov a z rôznych krajín (Obrázok 4.5.2). Na základe získaných údajov bola vykonaná analýza 238 EPD pre sklo a výrobky zo skla v jednotlivých krajinách, čo umožnilo posúdiť rozsah dostupnosti environmentálnych informácií v oblasti sklárskeho priemyslu. Následne boli z analyzovaných EPD vyhodnotené hodnoty indikátora GWP-GHG pre fázy životného cyklu A1–A3, ktoré reprezentujú emisie skleníkových plynov vznikajúce pri výrobe skla a sklenených výrobkov. Porovnaním údajov medzi jednotlivými krajinami bolo možné určiť úroveň uhlíkovej stopy materiálov na báze skla a identifikovať rozdiely vyplývajúce najmä z použitých výrobných technológií, podielu recyklovaného materiálu, energetického mixu, typu výroby skla a efektívnosti výrobných procesov. Výsledná analýza poskytuje prehľad o environmentálnych parametroch výroby skla a sklenených

výrobkov v medzinárodnom kontexte a vytvára podklad pre hodnotenie možností znižovania emisií CO₂ v oblasti výroby stavebných a priemyselných materiálov.



Obrázok 4.5.2 Prehľad počtu EPD pre sklo v hodnotených krajinách (Zdroj: autori)

Tabuľka 4.5.1 GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre sklo

	GWP-celkový (kg CO _{2eq} /m ²)	GWP-fosílny (kg CO _{2eq} /m ²)	GWP-biogénny (kg CO _{2eq} /m ²)	GWP-LULUC (kg CO _{2eq} /m ²)	GWP-GHG (kg CO _{2eq} /m ²)
Priemer	43,6	46	-1,24	0,174	46,1
Min	1,33	-0,00163	-25,94	0,000052	1,36
Max	211,66	228,88	84,2	2,37	231,11
Medián	35,8	34,55	-0,00419	0,02675	34,8

Tabuľka 4.5.1 prezentuje základné deskriptívne štatistiky indikátorov potenciálu globálneho otepľovania (GWP) získaných z analyzovaného súboru 238 EPD pre sklenené výrobky.

Priemerná hodnota GWP-celkový dosiahla 43,6 kg CO_{2eq}/m², pričom medián bol nižší (35,8 kg CO_{2eq}/m²), čo naznačuje pravostrannú asymetriu rozdelenia hodnôt spôsobenú prítomnosťou výrobkov s vyššími emisiami. Hodnoty sa pohybovali od 1,33 do 211,66 kg CO_{2eq}/m², čo poukazuje na značnú variabilitu environmentálnych dopadov medzi analyzovanými EPD.

GWP-fosílny vykazoval priemernú hodnotu 46,0 kg CO_{2eq}/m² a medián 34,55 kg CO_{2eq}/m². Rozsah hodnôt od -0,00163 do 228,88 kg CO_{2eq}/m² naznačuje výrazné rozdiely medzi jednotlivými výrobkami. Záporná minimálna hodnota môže byť dôsledkom metodiky výpočtu, napríklad započítania kreditov za recykláciu alebo špecifických alokačných postupov použitých v niektorých EPD.

Pri indikátore GWP-biogénny bola priemerná hodnota $-1,24 \text{ kg CO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$, pričom medián dosiahol $-0,00419 \text{ kg CO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$, teda hodnotu veľmi blízku nule. Rozsah od $-25,94$ do $84,2 \text{ kg CO}_2 \text{ ekv.}/\text{m}^2$ poukazuje na to, že biogénny uhlík má pri sklenených výrobkoch vo väčšine prípadov zanedbateľný vplyv, avšak v niektorých EPD sa vyskytujú výraznejšie odchýlky v závislosti od použitých materiálov a metodiky hodnotenia.

GWP-LULUC dosiahol zo všetkých sledovaných indikátorov najnižšie hodnoty. Priemer predstavoval $0,174 \text{ kg CO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$, medián $0,02675 \text{ kg CO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$ a hodnoty sa pohybovali od $0,000052$ do $2,37 \text{ kg CO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$. Výsledky potvrdzujú, že emisie súvisiace so zmenami vo využívaní pôdy a lesného hospodárstva majú pri výrobe skla len minimálny význam.

Priemerná hodnota GWP-GHG bola $46,1 \text{ kg CO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$, medián $34,8 \text{ kg CO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$ a rozsah hodnôt sa pohyboval od $1,36$ do $231,11 \text{ kg CO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$. Veľmi podobné hodnoty v porovnaní s indikátorom GWP-fosílny potvrdzujú, že celkové emisie skleníkových plynov pri výrobe skla sú dominantne ovplyvnené spotrebou energie a využívaním fosílnych palív.

Celkovo výsledky naznačujú značnú variabilitu environmentálnych profilov analyzovaných sklenených výrobkov. Rozdiel medzi priemerom a mediánom pri indikátoroch GWP-celkový, GWP-fosílny a GWP-GHG poukazuje na pravostranne zošíkmené rozdelenie hodnôt, spôsobené výskytom niekoľkých výrobkov s výrazne vyššími emisiami. Naopak, indikátory GWP-biogénny a GWP-LULUC majú v prípade sklenených výrobkov spravidla len malý podiel na celkovom potenciáli globálneho otepľovania.

4.5.3 Súčasný stav výroby stavebného skla na Slovensku

Výroba skla pre stavebníctvo je dnes zameraná najmä na ploché (tabuľové) sklo, ktoré sa používa na okná, fasády, presklené steny, dvere, strešné zasklenia a izolačné sklá. Základným produktom je float sklo, ktoré vzniká plavením roztaveného skla na hladine roztaveného cínu. Táto technológia zabezpečuje dokonale rovný a hladký povrch skla.

Na Slovensku sa dnes vo väčšej miere realizuje najmä spracovanie stavebného skla – rezanie, kalenie, vrstvenie, výroba izolačných dvojskiel a trojskiel či nanášanie špeciálnych povlakov. Tieto úpravy zlepšujú tepelnoizolačné, bezpečnostné a akustické vlastnosti skla, ktoré sú nevyhnutné pre moderné energeticky úsporné budovy [8].

Súčasný trend v stavebníctve smeruje k využívaniu:

- nízkoemisných skiel znižujúcich tepelné straty,
- solárnych kontrolných skiel obmedzujúcich prehrievanie budov,
- bezpečnostných a laminovaných skiel,
- recyklovaného a nízkouhlíkového skla s menšou environmentálnou stopou.

Výrobcovia stavebného skla sa zameriavajú na znižovanie energetickej náročnosti výroby a na využívanie recyklovaných sklenených črepov. Tieto opatrenia prispievajú k znižovaniu emisií CO_2 a podporujú trvalo udržateľnú výstavbu.

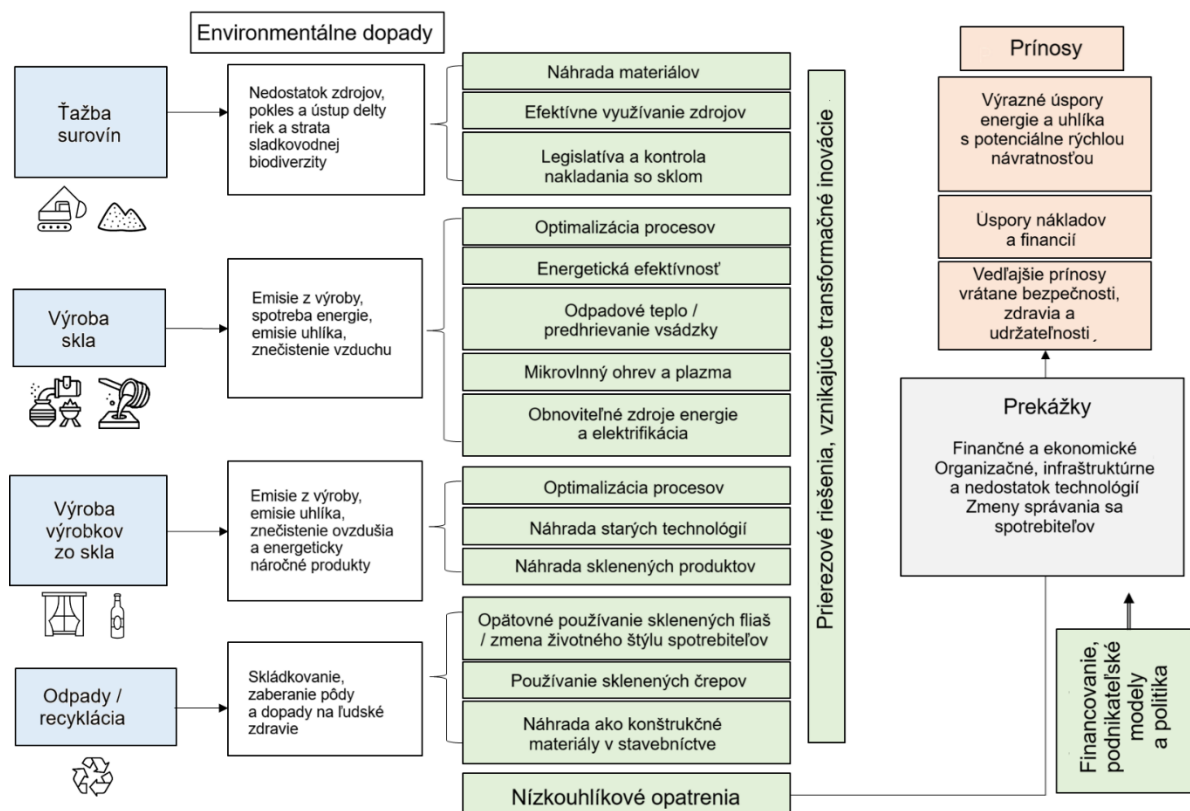
4.5.4 Environmentálne problémy výroby skla

Napriek týmto prínosom však sklo môže negatívne ovplyvňovať spoločenské aj prírodné systémy počas celého svojho životného cyklu. Obrázok 4.5.3 znázorňuje (bielou farbou) environmentálne dopady skla – od ťažby surovín (napr. degradácia pôdy, strata biodiverzity), cez emisie vznikajúce počas výroby, až po jeho konečné zneškodnenie.

Bez ohľadu na to, aký zložitý a environmentálne škodlivý tento proces, obrázok 4.5.3 znázorňuje množstvo možností (zelenou farbou), ktoré môžu zmierniť emisie a dokonca zlepšiť vplyvy na životné prostredie, biodiverzitu a ľudské zdravie.

Hoci sa suroviny na výrobu skla často považujú za neobmedzené, množstvo kremičitého piesku, ktoré je potrebné na jeho výrobu, je v súčasnosti tak veľké, že presahuje ich prirodzenú obnovu, a odhady naznačujú, že do polovice 21. storočia už výroba nebude schopná uspokojiť dopyt [9]. Vysoký dopyt po týchto materiáloch bude s najväčšou pravdepodobnosťou

pretrvávajú aj v budúcnosti v dôsledku vysokej urbanizácie, pričom OSN odhaduje, že do roku 2060 dosiahne ročný dopyt 82 miliárd ton [10]. Neudržateľná spotreba piesku na výrobu skla a iných materiálov nielenže ničí tieto obmedzené zdroje, ale v dôsledku energeticky náročných procesov na výrobu týchto produktov pravdepodobne zvýši emisie, pokiaľ nenájde spôsoby, ako zmierniť emisie z priemyslu.



Obrázok 4.5.3 Opatrenia, prínosy, bariéry a politiky pre dekarbonizáciu sklárskeho priemyslu podľa [7].

Sklo nie je biologicky odbúrateľné, hoci sa dá donekonečna recyklovať rôznymi postupmi bez ovplyvnenia jeho chemického zloženia [11]. Vlastnosti skla sú jedinečné pre jeho chemické zloženie. Zmena jednej z jeho vlastností často ovplyvňuje ostatné. Preto pri výbere skla pre konkrétny produkt sú dôležité tepelné, chemické, mechanické a optické vlastnosti [12]. Recyklácia skla navyše úzko súvisí so štátnou politikou a správaním spotrebiteľov, ktoré sú kľúčové pri zmiernovaní environmentálnych dopadov sklárskeho priemyslu.

Na obrázku 4.5.3 sú tiež znázornené prekážky dekarbonizácie v sklárskom priemysle. Hlavnou prekážkou je nedostatok ekonomických stimulov pre dekarbonizáciu. Ďalšie významné problémy predstavuje nedostatok poznatkov u menších výrobcov pri zavádzaní nízkouhlíkových procesov a absencia overených veľkokapacitných technológií s nízkymi emisiami. Na úrovni spotrebiteľov sú hlavné bariéry spojené s normami a správaním týkajúcimi sa používania skla a s nízkou akceptáciou nových materiálov.

Prínosy, zhrnuté oranžovou farbou na obrázku 4.5.3, ukazujú, že pre výrobcov existujú ekonomické a finančné príležitosti, pričom spoločenské, environmentálne a ekonomické prínosy nadobúdajú čoraz väčší význam, keďže sa globálne zvyšuje dôraz na klímu a udržateľnosť.

V poslednom období sa sklo stalo kľúčovým prvkom mnohých nízkouhlíkových inovácií. Zohráva zásadnú úlohu pri vývoji vysokokapacitných batérií, úložných médií a 3D tlače. Sklo má tiež významnú úlohu v oblasti environmentálneho dizajnu, nielen zvyšovaním energetickej

efektívnosti budov, ale je dokonca kľúčovým prvkom nízkouhlíkovej budúcnosti, keďže sa využíva pri výstavbe technológií obnoviteľných zdrojov energie a pri výrobe ľahších a ekologickejších dopravných prostriedkov. Vzhľadom na jeho rozšírenosť nie je prekvapujúce, že celosvetová produkcia skla dosiahla v roku 2020 približne 130 miliónov ton.

4.5.5 Sklárske technológie pre energeticky hospodárne budovy

Viacere technológie výroby skla môžu zlepšiť energetickú efektívnosť budov. Napríklad elektrochromatické (EC) okná poskytujú používateľom lepšiu vizuálnu a tepelnú komfort a zároveň umožňujú vytvoriť klimaticky adaptívny obal budovy, ktorý je plne prispôsobiteľný akýmkoľvek poveternostným podmienkam alebo preferenciám používateľov [12]. EC okná sa ukázali ako o 45 % účinnejšie než statické jednoplášťové zasklenie, ktoré je bežným materiálom v existujúcom fonde budov. EC sklo dokáže znížiť emisie uhlíka o 35 % v novostavbách a približne o 50 % pri projektoch renovácií [13].

Ďalšie štúdie naznačujú, že nízkoemisné (low-E) sklo zlepšuje tepelno-optické vlastnosti skla, keďže dokáže odrážať až 90 % infračerveného žiarenia, pričom umožňuje prenikanie viditeľného svetla. Low-E sklo tak môže znížiť nežiaduci prírastok tepla v lete a tepelné straty v zime [14]. Používanie solárnych termických fasád predstavuje ďalšiu technológiu na zlepšenie tepelných vlastností budov a dosahuje úspory energie v rozsahu 50 – 70 % pri rekonštrukciách a 20 – 30 % pri nových nízkoenergetických budovách [15].

Solárne ochranné zasklenie prispieva k zmierňovaniu emisií tým, že znižuje závislosť od klimatizácie, obmedzuje množstvo tepelnej energie vstupujúcej do budovy a zároveň zachováva vysokú úroveň transparentnosti [16].

Ďalším využitím skla, ktoré pomáha znižovať emisie v budovách, sú solárne okná využívajúce termochromizmus [17].

Táto technológia funguje tak, že pohlcuje slnečné žiarenie pri jeho prechode cez okno a premieňa ho na elektrickú energiu. Okná fungujú podobne ako solárne články a poskytujú flexibilné riešenie čistej energie pre moderný dizajn budov. Technológia umožňuje výrazné zníženie potreby energie na vykurovanie v zime aj na chladenie v lete, čo zodpovedá zvýšeniu energetickej účinnosti o viac než 20 % [18].

Ďalšie inovácie predstavujú tzv. „kvapalinové okná“, technológia založená na kvapaline na báze hydrogélu uzavretej v sklenených paneloch. Kvapalinové okná dokážu blokovat' slnečné žiarenie a udržiavať budovu chladnú, pričom absorbujú teplo a postupne ho uvoľňujú počas dňa alebo noci, čím dochádza k úsporám energie. Táto technológia môže znížiť spotrebu energie v budovách o viac než 45 % v porovnaní s tradičnými sklenenými oknami [19].

Existujú aj ďalšie technológie určené na postupné nahradenie tradičných okien [20], ako sú inteligentné (smart) okná. Tieto technológie môžu priniesť úspory energie presahujúce 8 % z celkovej spotreby energie a až 18 % v oblasti chladenia [21].

Medzi ďalšie komerčne dostupné sklené výrobky patria fotovoltické systémy integrované do budov typu sklo-na-sklo (BIPV). Tieto systémy môžu byť plne integrované do fasádnych okenných systémov a používané aj ako strešné svetlíky budov [22]. Takéto riešenia napríklad vyrábajú energiu a zároveň regulujú množstvo priameho slnečného žiarenia vstupujúceho do budovy. Výsledkom je zníženie potreby chladenia a obmedzenie prehrievania počas jasných a oslňujúcich dní [23].

Význam tejto technológie je taký veľký, že sa odhaduje, že do konca roka 2021 [24] plocha inštalácií BIPV presiahla 7,6 milióna štvorcových metrov a do roku 2026 sa očakáva dosiahnutie trhovej hodnoty 8,7 miliardy USD, čo predstavuje priemernú ročnú mieru rastu (CAGR) 16 % počas prognózovaného obdobia [25]. V rámci stavebných konštrukcií budú aplikácie BIPV dominované strešnými inštaláciami s takmer 80 % podielom na trhu, v porovnaní s 20 % pre fasádne aplikácie [26]. Integrácia systémov BIPV do „zelených“ budov môže priniesť dodatočný zdroj výroby energie priamo v obálke budovy, pričom hlavnou výhodou je okamžitá dostupnosť vyrobenej energie priamo v mieste jej spotreby [27].

Možnosti v oblasti ťažby surovín siahajú od hľadania alternatív pre náhradu skla a zvýšenia efektívnosti využívania zdrojov až po zavedenie prísnejšej legislatívy. Pokiaľ ide o druhý a tretí krok (výrobu skla a výrobkov zo skla), existuje množstvo technológií a procesov, ktoré majú potenciál podporiť energetickú efektívnosť, využívanie obnoviteľných zdrojov energie a znižovanie emisií v priemysle.

Aj keď sa výsledky môžu zdať čiastočne demotivujúce, na základe zhromaždených dôkazov možno konštatovať, že neexistuje všeobecná zhoda na najperspektívnejších technológiách, ktoré by mohli pomôcť dosiahnuť uhlíkovú neutralitu alebo aspoň nízkouhlíkovú budúcnosť. Namiesto toho sa zdá, že podľa literatúry bude prechod k dekarbonizovanému sklárskemu priemyslu pravdepodobne pomalý, pričom skutočný pokrok možno očakávať až po roku 2030.

Literatúra

1. Shelby JE. Introduction to Glass Science and Technology; The Royal Society of Chemistry 2005.
2. Springer, C. & Hasanbeigi, A. Emerging Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions-Reduction Technologies for the Glass Industry. <https://china.lbl.gov/publications/emerging-energy-efficiency-and-1> (2017).
3. Wintour, N. The glass industry: Recent trends and changes in working conditions and employment relations. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/publication/wcms_442086.pdf (2015).
4. Steps to energy efficiency: introductory guides. Carbon Trust. <https://www.carbontrust.com/resources/steps-to-energy-efficiency-introductory-guides> (2005)
5. Department of Energy & Climate Change. The potential for recovering and using surplus heat from industry. <https://www.gov.uk/government/publications/the-potential-for-recovering-and-using-surplus-heat-from-industry> (2014).
6. British Glass. A clear future: UK glass manufacturing sector decarbonisation roadmap to 2050. <https://www.britglass.org.uk/knowledge-base/resources-and-publications/clear-future-uk-glass-manufacturing-sector-decarbonisation#:~:text=In2014 the UK glass,in the UK by 2050.> (2014)
7. Furszyfer Del Rio, D. D., Sovacool, B. K., Foley, A. M., Griffiths, S., Bazilian, M., Kim, J., & Rooney, D. (2022). Decarbonizing the glass industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, Article 111885 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111885>
8. <https://www.saint-gobain-glass.cz/>
9. Bendixen, M., Best, J., Hackney, C. & Iversen, L. L. Time is running out for sand. *Nature* 571, 29–31 (2019).
10. UNEP. Rising demand for sand calls for resource governance. <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/rising-demand-sand-calls-resource-governance> (2019).
11. Lumar, S. et al. Valorisation of glass waste for development of Geopolymer composites – Mechanical properties and rheological characteristics: A review. *Constr. Build. Mater.* 220, 547–564 (2019).
12. Casini, M. Active dynamic windows for buildings: A review. *Renew. Energy* 119, 923–934 (2018).
13. Sbar, N. L., Podbelski, L., Yang, H. M. & Pease, B. Electrochromic dynamic windows for office buildings. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 1, 125–139 (2012).
14. Wu, Q., Zeng, L. & Zhou, Q. Phase I monitoring of optical profiles with application in low-emittance glass manufacturing. *J. Qual. Technol.* 50, (2018).

15. Hoogland, O. et al. Study on impacts of EU actions supporting the development of renewable energy technologies.
<http://trinomics.eu/wp-content/uploads/2019/03/Trinomics-et-al.-2019-Study-on-impacts-of-EU-actions-supporting-the-development-of-RE-technologies.pdf> (2019).
16. Pilkington. Specifying solar control glazing to improve energy efficiency. *News*
<https://www.pilkington.com/en-gb/uk/news-insights/featured-articles/specifying-solar-control-glazing-to-improve-energy-efficiency-not-published> (2019).
17. Hyrkas, E. Five Fun Facts about NREL's New Solar Windows Innovation. NREL
<https://www.energy.gov/eere/articles/five-fun-facts-about-nrel-s-new-solar-windows-innovation> (2018).
18. Glass for Europe. Flat glass in Climate-Neutral Europe: Triggering a virtuous cycle of decarbonization. <https://glassforeurope.com/wp-content/uploads/2020/01/flat-glass-climate-neutral-europe.pdf> (2020).
19. Taylor, M. This 'liquid window' harnesses light and heat to save energy in buildings. Reuters <https://www.reuters.com/article/us-singapore-climatechange-technology-tr-idUSKBN27L16C> (2020).
20. Garlisi, C. et al. Multilayer thin film structures for multifunctional glass: Self-cleaning, antireflective and energy-saving properties. *Appl. Energy* 264, (2020).
21. Garlisi, C., Trepici, E., Sakkaf, R. Al, Azar, E. & Palmisano, G. Combining energy efficiency with self-cleaning properties in smart glass functionalized with multilayered semiconductors. *J. Clean. Prod.* 272, (2020).
22. Kuhn, T. E. et al. Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). *Energy Build.* 231, (2021).
23. Henson, J. Integrating BIPV: How the market for building integrated photovoltaics is being created in the USA. *Refocus* 6, 28–30 (2005).
24. ReportLinker. BIPV Markets Analysis and Forecasts 2014-2021.
<https://www.reportlinker.com/p02115227/BIPV-Markets-Analysis-and-Forecasts.html> (2014).
25. Arizton. Building Integrated Photovoltaics (BIPV) Market - Global Outlook and Forecast 2021-2026. BIPV: Market Overview
<https://www.arizton.com/market-reports/building-integrated-photovoltaics-bipv-market> (2021).
26. Parisi, M. L. et al. Prospective life cycle assessment of third-generation photovoltaics at the pre-industrial scale: A long-term scenario approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 121, (2020).
27. Vasiliev, M., Alghamedi, R., Nur-E-Alam, M. & Alameh, K. Photonic microstructures for energy-generating clear glass and net-zero energy buildings. *Nature* 31831, (2016).

4.6 Tehly

Globálny dopyt po stavebných materiáloch sa do roku 2050 výrazne zvýši v dôsledku rastu populácie a rozširovania podlahovej plochy budov [1-3]. Pálené hlinené tehly (Fired clay bricks (FCBs)) patria medzi najpoužívanejšie stavebné materiály, pričom približne 87 % ich produkcie pochádza z Ázie [4,5]. Celosvetová produkcia FCB sa odhaduje na 2–3 Gt/rok [6-7].

4.6.1 Výroba tehál

Na výrobu **pálenej tehly** sa ako hlavná surovina používa **hlina**, ktorá obsahuje ílové minerály, kremičitý piesok a jemné prírodné prímеси. Na úpravu vlastností zmesi sa často pridávajú **piesok, šamot (mletá vypálená hlina), popolček, piliny alebo iné organické prísady**, ktoré počas výpalu vyhoria a vytvoria póry zlepšujúce tepelnoizolačné vlastnosti tehly. Pri príprave zmesi sa používa aj **voda**, ktorá zabezpečuje potrebnú plasticitu na tvarovanie výrobkov.

Typické zloženie vsádzky:

- 70 – 90 % hlina a íly (základná surovina),
- 20 % piesok alebo kremenná zložka,
- 0 – 15 % prísady (šamot, popolček, piliny a pod.),
- voda na spracovanie.

Výroba tehál pozostáva zo štyroch základných operácií alebo krokov:

1. Príprava surovinovej zmesi

V tomto kroku sa hlina ťaží, čistí od nežiaducich prímеси (kamene, korene, organické látky) a upravuje na vhodnú konzistenciu. Následne sa mieša s vodou a prípadnými prísadami, aby sa získala homogénna zmes vhodná na tvarovanie.

2. Tvarovanie tehál

Pripravená hlinená zmes sa formuje do požadovaného tvaru tehál. Tvarovanie môže prebiehať ručne alebo strojovo pomocou lisovania, vytlačania alebo odlievania do foriem.

3. Sušenie tehál na vzduchu

Čerstvo vytvarované tehly (surové tehly) obsahujú značné množstvo vody. Pred výpalom sa preto sušia na vzduchu alebo v sušiacich komorách, aby sa odstránila vlhkosť a zabránilo sa vzniku trhlín počas výpalu.

4. Výpal tehál

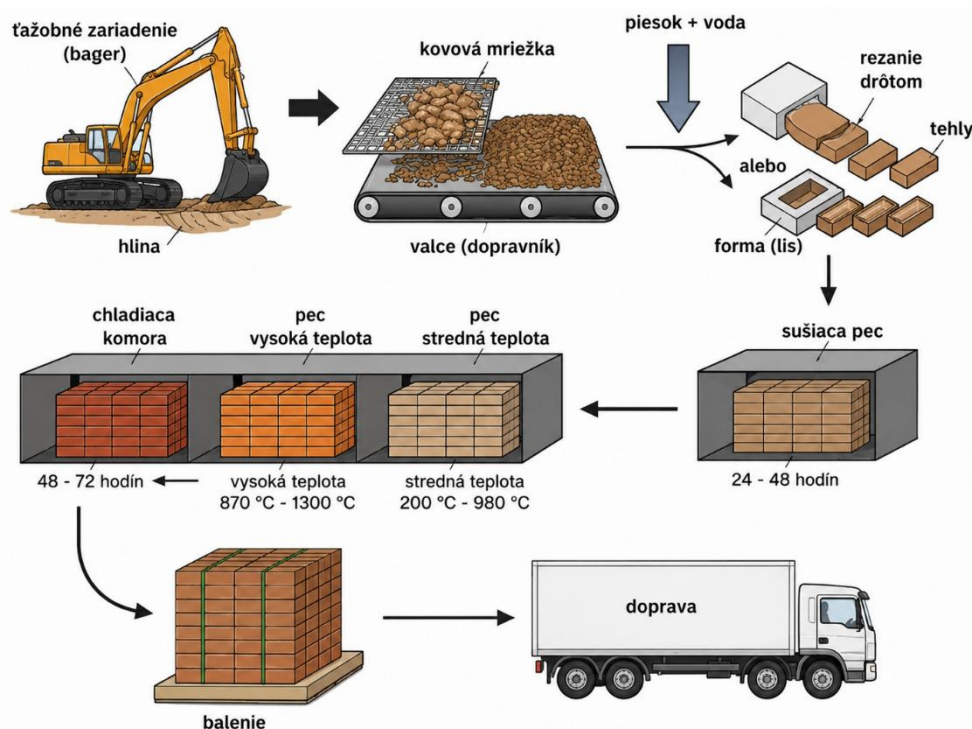
Vysušené tehly sa vypaľujú v peciach pri vysokých teplotách, spravidla v rozsahu 900 až 1100 °C. Počas výpalu dochádza k spekaniu materiálu, čím tehly získavajú požadovanú pevnosť, tvrdosť, odolnosť a trvanlivosť. Postup výroby pálených tehál je na obrázku 4.6.1.

Energetická náročnosť výroby pálených tehál sa pohybuje v rozsahu 0,5–5 MJ/kg [8,10-14], pričom je silne závislá od typu pece a použitého paliva. Najčastejšie používaným palivom je uhlie, ktoré vedie k vysokej emisnej intenzite skleníkových plynov (GHG) [16,17]. V dôsledku toho predstavuje tehliarsky sektor významný zdroj emisií, pričom v Indii ide o druhé najväčšie odvetvie spotreby uhlia [8].

Literatúra uvádza uhlíkovú stopu výroby pálených tehál v rozpätí 0,07–0,34 kg CO_{2eq}/kg tehly pre najbežnejšie výrobné technológie [9,11,12,18-25]. Odhaduje sa, že výroba tehál v piatich hlavných ázijských krajinách (Čína, India, Pakistan, Vietnam a Bangladéš) môže byť zodpovedná za približne 1,24 % globálnych antropogénnych emisií CO₂, najmä v dôsledku spotreby uhlia [7].

Emisie GHG z výroby pálených tehál sú výrazne ovplyvnené typom pece. Menej efektívne technológie, ako poľné pece a pece s pevným komínom, vykazujú vyššiu spotrebu energie a emisie, zatiaľ čo modernejšie technológie (napr. Zigzag pece, tunelové pece a vertikálne

šachtové pece – VSBK) dosahujú vyššiu energetickú účinnosť a nižšiu uhlíkovú stopu [8,9,15,19].



Obrázok 4.6.1 Výroba pálených tehál

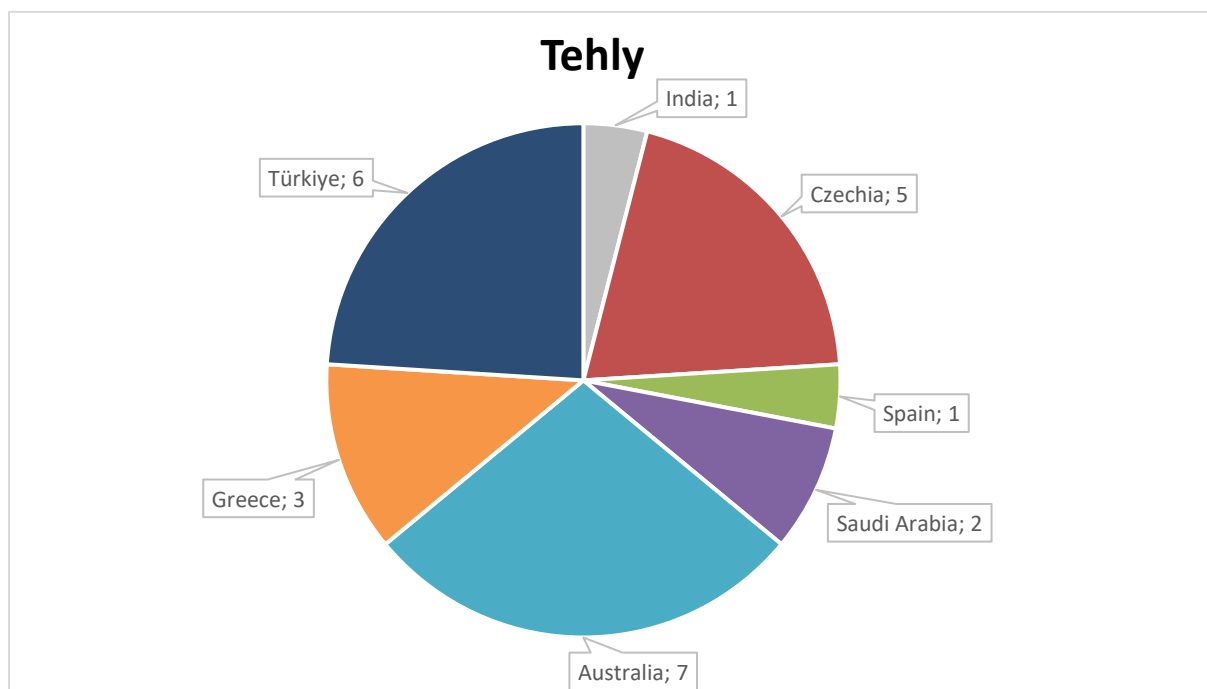
Znižovanie uhlíkovej stopy pálených tehál je možné dosiahnuť najmä zvyšovaním energetickej účinnosti výrobných technológií, modernizáciou existujúcich pecí a zmenou palív. Modernizácia pecí môže znížiť spotrebu energie až o 20 % a emisie tuhých častíc približne o 50 % [9], zatiaľ čo používanie čistejších palív a alternatívnych surovín môže ďalej znižovať emisie GHG [9,24,26].

Napriek významnému podielu pálených tehál na globálnych emisiách skleníkových plynov chýbajú jednotné a robustné modely na kvantifikáciu súčasnej uhlíkovej stopy a projekciu budúcich emisií. Stanovenie východiskovej hodnoty uhlíkovej stopy výroby pálených tehál je preto kľúčové pre hodnotenie dekarbonizačných stratégií a dosiahnutie cieľov uhlíkovej neutrality do roku 2050 [7].

4.6.2 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG výroby tehál v hodnotených krajinách

Pri spracovaní analýzy boli využité rôzne databázy prevádzkovateľov programov (International EPD System, EPD Global, EPDSQUARE), v ktorých sú registrované a publikované Environmentálne vyhlásenia o produktoch (EPD) s kvantifikovanými údajmi o environmentálnych parametroch tehál od viacerých výrobcov a z rôznych krajín. Na základe získaných údajov bola vykonaná analýza počtu dostupných EPD pre tehly v jednotlivých krajinách, čím bolo možné identifikovať rozsah a úroveň dostupnosti environmentálnych informácií v rámci európskeho a celosvetového trhu. Následne boli z počtu 27 analyzovaných EPD (Obrázok 4.6.2) vyhodnotené hodnoty indikátora GWP-GHG pre fázu produktu (A1–A3), ktoré reprezentujú emisie skleníkových plynov vznikajúce počas výroby tehál. Porovnaním výsledkov medzi jednotlivými krajinami bolo možné posúdiť úroveň uhlíkovej stopy tehlových výrobkov a identifikovať rozdiely vyplývajúce z použitých výrobných technológií, energetického

mixu a ďalších špecifických podmienok výroby. Výsledky analýzy poskytujú prehľad o environmentálnych charakteristikách tehlových výrobkov v medzinárodnom kontexte a predstavujú podklad na hodnotenie potenciálu znižovania emisií skleníkových plynov v sektore výroby stavebných materiálov.



Obrázok 4.6.2 Prehľad počtu EPD pre cementy v hodnotených krajinách (Zdroj: autori)

Tabuľka 4.6.1 prezentuje základné deskriptívne štatistiky indikátorov potenciálu globálneho otepľovania (GWP) získaných z analyzovaného súboru 27 environmentálnych vyhlásení o produktoch (EPD) pre tehlové výrobky.

Tabuľka 4.6.1 GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre tehly

	GWP-celkový (kg CO _{2eq} /t)	GWP-fosílny (kg CO _{2eq} /t)	GWP-biogénny (kg CO _{2eq} /t)	GWP-LULUC (kg CO _{2eq} /t)	GWP-GHG (kg CO _{2eq} /t)
Priemer	168	165	3,35	0,082	162
Min	47,7	47,5	-16,5	0,00031	47,6
Max	288	288	18,4383	0,478	288
Medián	181	177	0,236	0,0298	179,5

Priemerná hodnota GWP-celkový dosiahla 168 kg CO_{2eq}/t, zatiaľ čo medián predstavoval 181 kg CO_{2eq}/t. Keďže medián je vyšší ako priemer, možno predpokladať miernu ľavostrannú asymetriu rozdelenia hodnôt, spôsobenú výskytom výrobkov s nižšou uhlíkovou stopou. Hodnoty sa pohybovali od 47,7 do 288 kg CO_{2eq}/t, čo poukazuje na značné rozdiely v environmentálnych dopadoch medzi jednotlivými tehlovými výrobkami.

GWP-fosílny vykazoval priemernú hodnotu 165 kg CO_{2eq}/t a medián 177 kg CO_{2eq}/t. Rozsah hodnôt od 47,5 do 288 kg CO_{2eq}/t potvrdzuje, že fosílné emisie predstavujú dominantnú zložku celkového potenciálu globálneho otepľovania pri výrobe tehál. Tieto emisie súvisia najmä so spotrebou fosílnych palív počas procesu vypaľovania a s energetickou náročnosťou výroby.

Pri indikátore GWP-biogénny bola zistená priemerná hodnota 3,35 kg CO_{2eq}/t, pričom medián dosiahol iba 0,236 kg CO_{2eq}/t. Hodnoty sa pohybovali od -16,5 do 18,44 kg CO_{2eq}/t, čo naznačuje, že vo väčšine EPD je vplyv biogénneho uhlíka veľmi nízky, avšak v niektorých prípadoch môže byť ovplyvnený použitím pomocných materiálov alebo metodikou výpočtu.

Indikátor GWP-LULUC dosiahol najnižšie hodnoty zo všetkých sledovaných kategórií. Priemerná hodnota bola 0,082 kg CO_{2eq}/t, medián 0,0298 kg CO_{2eq}/t a zaznamenané hodnoty sa pohybovali od 0,00031 do 0,478 kg CO_{2eq}/t. Výsledky potvrdzujú, že emisie súvisiace so zmenami vo využívaní pôdy a lesného hospodárstva majú pri výrobe tehál zanedbateľný význam.

Priemerná hodnota indikátora GWP-GHG predstavovala 162 kg CO_{2eq}/t, pričom medián bol 179,5 kg CO_{2eq}/t. Rozsah hodnôt od 47,6 do 288 kg CO_{2eq}/t odráža rozdiely medzi výrobcami z hľadiska energetickej náročnosti výroby, používaných palív, technologických postupov a podielu obnoviteľných zdrojov energie.

Celkové výsledky ukazujú, že environmentálny profil tehlových výrobkov je výrazne ovplyvnený fosílnymi emisiami, ktoré tvoria rozhodujúcu časť celkového potenciálu globálneho otepľovania. Naopak, príspevok biogénneho uhlíka a emisií súvisiacich so zmenou využívania pôdy (LULUC) je vo väčšine hodnotených EPD nízky. Súčasne široký rozsah hodnôt jednotlivých indikátorov poukazuje na významné rozdiely medzi výrobcami a výrobnými technológiami, čo naznačuje existenciu potenciálu na ďalšie znižovanie emisií skleníkových plynov prostredníctvom modernizácie výrobných procesov a využívania nízkouhlíkových zdrojov energie.

4.6.3 Výroba tehál na Slovensku

Pálené tehly patria medzi najvýznamnejšie stavebné materiály používané na Slovensku. Vďaka svojim vlastnostiam, ako sú vysoká pevnosť, dlhá životnosť, dobré tepelnoizolačné parametre a odolnosť voči poveternostným vplyvom, nachádzajú široké uplatnenie pri výstavbe rodinných domov, bytových budov, administratívnych objektov aj priemyselných stavieb. Ich používanie má na území Slovenska dlhú tradíciu a dodnes predstavujú jeden zo základných materiálov pre murované konštrukcie.

Slovensko disponuje vhodnými ložiskami ílov a hĺn, ktoré tvoria základnú surovinu pre výrobu pálených tehál. Výroba tehliarskych výrobkov je sústredená najmä v regiónoch s dostupnými surovinovými zdrojmi a rozvinutou dopravnou infraštruktúrou. Medzi najvýznamnejších výrobcov patrí spoločnosť Wienerberger Slovensko, ktorá na slovenskom trhu pôsobí prostredníctvom značky Porotherm. Jej výrobné závody zabezpečujú produkciu moderných murovacích systémov určených pre nízkoenergetické a pasívne budovy.

V posledných desaťročiach prešla výroba pálených tehál výraznou modernizáciou. Súčasné tehliarske výrobky sa od tradičných plných tehál odlišujú najmä svojou konštrukciou. Moderné tehly obsahujú systém dutín, ktorý znižuje ich objemovú hmotnosť a zároveň zlepšuje tepelnoizolačné vlastnosti muriva. Vďaka tomu je možné dosahovať prísnejšie požiadavky na energetickú hospodárnosť budov bez potreby dodatočných úprav konštrukcie. Na trhu sú dostupné aj brúsené tehly, ktoré umožňujú presnejšie murovanie a znižujú spotrebu maltových zmesí.

Z pohľadu stavebníctva predstavujú pálené tehly materiál s priaznivými úžitkovými vlastnosťami. Vyznačujú sa vysokou pevnosťou v tlaku, dobrou akumulácnou schopnosťou tepla, odolnosťou voči požiaru a dlhou životnosťou. Tieto vlastnosti prispievajú k vytváraniu kvalitného vnútorného prostredia budov a k znižovaniu prevádzkových nákladov počas ich životnosti. Významnou výhodou je aj schopnosť regulovať vlhkosť v interiéri, čo pozitívne ovplyvňuje komfort bývania.

V súčasnosti sa veľká pozornosť venuje environmentálnym aspektom výroby stavebných materiálov. Výrobcovia pálených tehál na Slovensku postupne zavádzajú opatrenia zamerané na znižovanie energetickej náročnosti výroby, optimalizáciu spotreby surovín a redukciu emisií skleníkových plynov. Dôležitým trendom je tiež zvyšovanie podielu recyklovaných materiálov

a efektívnejšie využívanie výrobných odpadov. Napriek energetickej náročnosti výroby sú pálené tehly považované za materiál s dlhou životnosťou a vysokou odolnosťou, čo prispieva k ich priaznivému environmentálnemu hodnoteniu počas celého životného cyklu stavby. Analýza uhlíkovej stopy pálených tehál firmy Wienerberger s.r.o. bola spracovaná riešiteľským kolektívom a je uvedená v Tabuľke 4.6.2.

Tabuľka 4.6.2 Prehľad vplyvu výroby pálených tehál na Slovensku na GWP

Výrobca	EPD registračné číslo	Druh výrobku	GWP A1–A3 (kg CO _{2eq} /t)
Wienerberger s.r.o. Zlaté Moravce	3015-EPD- 030060789	Porotherm Klasik	64,3
Wienerberger s.r.o. Zlaté Moravce	3015-EPD- 030060789	Porotherm AKU	78,4
Wienerberger s.r.o. Boleráz	3015-EPD- 030060789	Porotherm Klasik	83,9
Wienerberger s.r.o. Boleráz	3015-EPD- 030060789	Porotherm AKU	106
Wienerberger s.r.o. Zlaté Moravce	3015-EPD- 030060790	Porotherm Profi	75,5
Wienerberger s.r.o. Boleráz	3015-EPD- 030060790	Porotherm Profi	84,6
Wienerberger s.r.o. Boleráz	3015-EPD- 030060790	Porotherm EKO+Profi	92,2
Wienerberger s.r.o. Zlaté Moravce	3015-EPD- 030060791	Porotherm KSV 17/60 a KSV 17/45	82
Wienerberger s.r.o. Zlaté Moravce	3015-EPD- 0300792	Vencová tehla Porotherm VT 22 a VT 23,8	83,1
Wienerberger s.r.o. Zlaté Moravce	3015-EPD- 030060793	Vencová tehla Porotherm VT 24,9 Profi	67
Priemer			81,7
Min			64,3
Max			106
Medián			82,55

Na základe analyzovaných hodnôt potenciálu globálneho otepľovania (GWP) (Tabuľka 5.1) pre fázu životného cyklu A1–A3 dosahujú pálené tehly hodnoty v rozsahu od 64,3 do 106,0 kg CO_{2eq}/t, pričom priemerná hodnota predstavuje 81,7 kg CO_{2eq}/t a medián 82,55 kg CO_{2eq}/t. Skutočnosť, že priemer a medián sú si veľmi blízke, naznačuje relatívne rovnomerné rozloženie hodnôt bez výrazných extrémov, hoci maximálna hodnota 106 kg CO_{2eq}/t je citeľne vyššia ako ostatné údaje.

Rozdiel medzi minimálnou a maximálnou hodnotou predstavuje 41,7 kg CO_{2eq}/t, čo poukazuje na určitú variabilitu environmentálnych dopadov medzi jednotlivými výrobcami alebo produktmi. Táto variabilita môže byť spôsobená rozdielmi vo výrobných technológiách, energetickom mixe používanom pri výrobe, účinnosti pecí, vzdialenosti dopravy surovín alebo podielom recyklovaných materiálov vo výrobnom procese.

Pri porovnaní s inými stavebnými materiálmi možno konštatovať, že pálené tehly dosahujú stredné hodnoty uhlíkovej stopy. Významná časť emisií vzniká počas procesu vypaľovania, ktorý si vyžaduje vysoké teploty a značné množstvo energie. Napriek tomu sú výsledné hodnoty relatívne priaznivé vzhľadom na dlhú životnosť tehál, ich vysokú odolnosť a minimálne nároky na údržbu počas prevádzky budovy.

Z hľadiska hodnotenia environmentálnych dopadov je pozitívne, že väčšina analyzovaných hodnôt sa pohybuje v úzkom intervale približne 75 až 85 kg CO_{2eq}/t, čo naznačuje určitú úroveň technologickej vyspelosti výroby pálených tehál. Hodnota 106 kg CO_{2eq}/t predstavuje odľahlejší výsledok, ktorý môže súvisieť s menej efektívnym výrobným procesom alebo s využívaním energetických zdrojov s vyššou uhlíkovou stopou.

Celkovo možno konštatovať, že priemerná hodnota 81,7 kg CO_{2eq}/t predstavuje reprezentatívny údaj pre environmentálne hodnotenie pálených tehál v etape A1–A3. Výsledky zároveň poukazujú na potenciál ďalšieho znižovania emisií prostredníctvom modernizácie výrobných zariadení, zvyšovania energetickej účinnosti, využívania obnoviteľných zdrojov energie a optimalizácie výrobných procesov. Z pohľadu udržateľného stavebníctva zostávajú pálené tehly materiálom s relatívne priaznivými environmentálnymi vlastnosťami, najmä ak sa zohľadní ich dlhá životnosť a možnosť recyklácie po ukončení životného cyklu stavby.

Vďaka kombinácii tradičných vlastností a moderných technologických riešení zostávajú pálené tehly jedným z najvýznamnejších stavebných materiálov na Slovensku. Ich široké využitie, dostupnosť a schopnosť spĺňať súčasné požiadavky na energetickú efektívnosť budov zabezpečujú, že budú aj naďalej zohrávať významnú úlohu v slovenskom stavebníctve.

4.6.4 Globálne emisie z výroby pálených hlinených tehál

Kvantifikácia emisií skleníkových plynov (GHG) z výroby pálených tehál, zohľadňujúca regionálne rozdiely v používaných technológiách pecí, vedie k priemerným emisným faktorom v rozsahu 0,18–0,24 kg CO_{2eq}/kg FCB v roku 2020 [8,9,15]. Tento rozsah vyplýva z rôznych podielov jednotlivých typov pecí v rôznych regiónoch. Vážený globálny priemer emisnej intenzity, založený na podiele jednotlivých regiónov na svetovej produkcii tehál, je 0,24 kg CO_{2eq}/kg pálených tehál [8]. Horná hranica tohto priemeru je ovplyvnená najmä Indiou a Pakistanom, ktoré majú súčasne vysokú produkciu tehál aj vysoké emisné faktory [7,9].

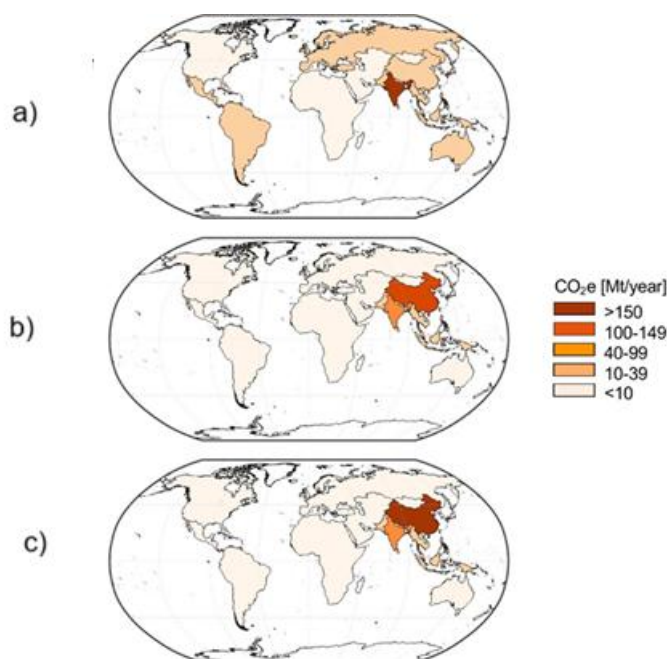
Výsledok je v dobrom súlade s databázou *Inventory of Carbon and Energy* (ICE) Univerzity v Bath, ktorá uvádza priemernú hodnotu emisií „od kolísky po bránu“ (*cradle-to-gate*) 0,22 kg CO_{2eq}/kg pálených tehál, pričom približne 75 % týchto emisií pochádza priamo z výrobného procesu [28]. Iné zdroje však uvádzajú vyššie minimálne hodnoty: správa Programu OSN pre životné prostredie (UNEP) uvádza 0,24 kg CO_{2eq}/kg pálených tehál pre pece spaľujúce zemný plyn a 0,34 kg CO_{2eq}/kg pre pece využívajúce olej [29]. Regionálne špecifické štúdie zaznamenali výrazné rozdiely, napríklad 0,25 kg CO_{2eq}/kg pre Čínu [30], 0,52 kg CO_{2eq}/kg pre Indiu [8] a až 0,86 kg CO_{2eq}/kg pre Afriku [17].

Pri uvažovaní najnižších a najvyšších literárnych hodnôt emisných faktorov pre rôzne typy pecí (Clamp, FCK, Zigzag, VSBK a tunelové pece) sa globálny emisný faktor, bez započítania Číny, pohybuje v rozsahu 0,18–0,27 kg CO_{2eq}/kg pálených tehál [8,9,15].

Pri priemernom odhade globálnej ročnej produkcie pálených tehál 2,18 Gt, získanom spriemerovaním viacerých výpočtových prístupov, dosahujú súvisiace emisie skleníkových plynov približne 0,51 Gt CO_{2eq}/rok [7]. Pri uvažovaní najnižších a najvyšších odhadovaných emisných faktorov sa tento rozsah pohybuje približne medzi 0,40 a 0,60 Gt CO_{2eq}/rok. Vzhľadom na to, že celkové globálne antropogénne emisie skleníkových plynov v roku 2020 dosahovali približne 50 Gt CO_{2eq}, predstavuje výroba pálených tehál približne 1 % celosvetových emisií [31].

Ako je znázornené na obrázku 4.6.3, regionálny rozsah výroby pálených tehál sa priamo premieta do úrovne emisií skleníkových plynov [7]. Regióny s najvyššou produkciou tehál zároveň vykazujú najvyššie absolútne emisie, čo poukazuje na úzku väzbu medzi objemom výroby a environmentálnymi dopadmi [8]. Voľba dekarbonizačných stratégií sa však môže líšiť v závislosti od miestnych podmienok, dostupnosti zdrojov a sociálno-ekonomických priorít jednotlivých regiónov [26,27].

V porovnaní s odvetvami, ktorým sa v súčasnosti venuje značná pozornosť v kontexte dekarbonizácie do roku 2050, ako sú cementársky a oceliarsky priemysel, zostáva výroba pálených tehál relatívne opomínaná. Ročná globálna produkcia cementu a ocele dosahuje približne 4,1 Gt, resp. 1,3 Gt [32,33], čo vedie k emisiám približne 1,6 Gt CO₂ a 2,6 Gt CO₂ ročne [34,35]. Napriek nižšej absolútnej produkcii materiálu prispieva výroba pálených tehál k emisiám CO₂ v porovnateľnom rozsahu, ako je znázornené na obrázku 4.6.4 [7]. Tieto výsledky zdôrazňujú, že sektor výroby pálených tehál predstavuje významnú, no zatiaľ nedostatočne riešenú oblasť s vysokým potenciálom znižovania globálnych emisií skleníkových plynov.

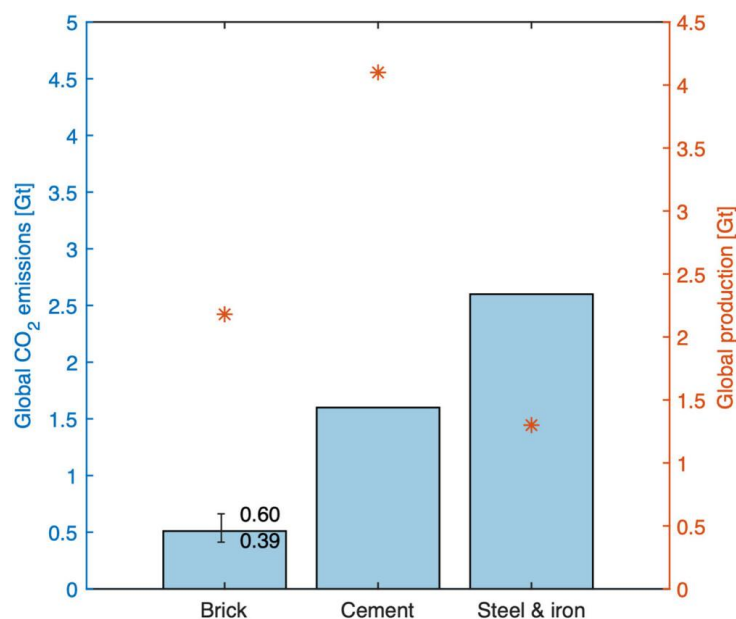


Obrázok 4.6.3 Emisie skleníkových plynov (GHG) z globálnej výroby tehál v roku 2020 odhadnuté na základe:

(a) produkcie tehál uvádzanej v literatúre,

(b) nárastu podlahovej plochy budov (Bm²/rok) a intenzity spotreby tehál (kg tehál/m²), a

(c) výroby tehál odvodenej z podielu vyťaženej konštrukčnej hliny.



Obrázok 4.6.4 Odhadovaná globálna produkcia a emisie skleníkových plynov (GHG) z výroby pálených tehál, cementu a ocele

Ľavá os zobrazuje globálne emisie GHG spojené s výrobou tehál, cementu a ocele, znázornené stĺpcami. Pravá os zobrazuje globálnu produkciu týchto materiálov, vyjadrenú symbolom „*“.

4.6.5 Príklady nových technológií na znižovanie uhlíkovej stopy v Európe

Snahy o dekarbonizáciu tehliarskeho priemyslu už prinášajú konkrétne technologické a organizačné riešenia, ktoré dokazujú, že zníženie uhlíkovej stopy je realizovateľné na rôznych úrovniach výroby. Príklad spoločnosti Michelmersh Brick Holdings (Spojené kráľovstvo) ukazuje, že je technicky možné nahradiť tradičný plynový výpal vodíkom bez zníženia kvality tehál. Testy vykonané v závode Freshfield Lane zahŕňali postupné prechody z 20 % na 100 % vodík a preukázali, že celoplošné zavedenie tejto technológie by mohlo znížiť emisie z plynu až o ~90 %. Tento projekt predstavuje významný prechodový krok pre výrobu vysokoteplotných produktov s nízkou uhlíkovou stopou [36].

Na globálnej úrovni je zaujímavý prístup spoločnosti Wienerberger AG, najväčšieho výrobcu tehál na svete, ktorý prevádzkuje viac ako 200 závodov v 28 krajinách. Spoločnosť si stanovila cieľ klimatickej neutrality do roku 2050 a vyvinula program udržateľnosti „LESS – sustainable brick collection“. Vďaka optimalizácii surovín, zníženiu materiálového vstupu a využitiu bioplynu pri výpale dosahuje táto tehla o 60–80 % nižšie emisie CO₂ v porovnaní s tradičnými produktmi. Okrem toho sériu NATURbric® charakterizuje 10–15 % úspora energie vo výrobe. Tento prípad ukazuje, že kombinácia inovácií, nových palív a optimalizácie materiálu môže viesť k výraznému zníženiu uhlíkovej stopy v rámci veľkých globálnych podnikov [37].

Výrobná prax v menšom meradle je ilustrovaná štúdiou štyroch závodov v Rumunsku, ktorá analyzovala energetickú efektívnosť a vyhodnotila výkonové indikátory (Energy Performance Indicators, EnPI) [38]. Identifikovali sa konkrétne opatrenia vedúce k zníženiu spotreby energie a emisií CO₂, čo ukazuje, že aj bez radikálneho prechodu palív je možné postupne dekarbonizovať výrobu pomocou optimalizácie procesov a lepšej energetickej efektívnosti.

Tieto príklady poukazujú na kľúčové stratégie pre znižovanie uhlíkovej stopy vo výrobe tehál:

- využitie nízkouhlíkových palív (vodík, bioplyn),
- zvyšovanie energetickej účinnosti výrobných procesov,
- optimalizácia materiálového vstupu a recyklácia,

- postupný a systematický prístup v menších závodoch s podporou investícií a know-how.

Rozdiely medzi veľkými medzinárodnými výrobcami a menšími regionálnymi závodmi ukazujú, že investičná kapacita a prístup k technológiám sú kľúčové faktory úspechu. Pre stavebnícky sektor je preto dôležité sledovať výrobcov s deklarovanými nízkymi emisiami a stratégiami dekarbonizácie, ktorí môžu byť preferovanými dodávateľmi, čím sa podporuje širšie šírenie nízkouhlíkových riešení.

4.6.6 Hlavné výzvy dekarbonizácie výroby tehál

Dekarbonizácia výroby pálených hlinených tehál predstavuje významnú výzvu pre stavebný materiálový sektor, keďže ide o proces úzko spojený s vysokou energetickou náročnosťou a tradičnými výrobnými technológiami. Pálené tehly patria medzi najrozšírenejšie stavebné materiály na svete a ich výroba zohráva dôležitú úlohu pri zabezpečovaní potrieb stavebníctva. Napriek tomu je tento proces sprevádzaný značnými emisiami skleníkových plynov, ktoré vznikajú predovšetkým počas energeticke náročného vypaľovania tehál a spaľovania fosílnych palív. Prechod na nízkouhlíkové technológie je preto nevyhnutný, avšak jeho realizácia naráža na viaceré technické, ekonomické a organizačné prekážky.

Jednou z najväčších výziev je vysoká energetická náročnosť samotného procesu vypaľovania. Výroba pálených tehál vyžaduje dosahovanie vysokých teplôt, ktoré sú tradične zabezpečované spaľovaním uhlia, zemného plynu alebo iných fosílnych palív. Významný podiel emisií vzniká nielen priamo pri spaľovaní palív, ale aj v dôsledku využívania elektrickej energie pochádzajúcej z energetických zdrojov s vysokou uhlíkovou stopou. Znižovanie emisií je preto úzko prepojené s dekarbonizáciou energetického sektora a prechodom na obnoviteľné zdroje energie.

Tabuľka 4.6.3 prezentuje hodnoty GWP-GHG pre výrobu tehál na Slovensku na roky 2030 a 2050 podľa predpokladaných emisných faktorov pre elektrinu s hodnotou 0,08 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2030 a 0,04 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2050 [24]. Predpokladané percentuálne zníženie emisií v roku 2030 je 90,8 % a v roku 2050 je až 95,4 % v porovnaní s emisným faktorom pre „elektrina, vysoké napätie, mix, Slovenská republika“ podľa databázy Ecoinvent 3.11 s hodnotami 0,86 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2021.

Tabuľka 4.6.3 GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre výrobu tehál v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050

EPD registračné číslo	Druh výrobky	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg)	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg) 2030	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg) 2050
3015-EPD-030060789	Porotherm Klasik	64,3	5,98	2,99
3015-EPD-030060789	Porotherm AKU	78,4	7,29	3,65
3015-EPD-030060789	Porotherm Klasik	83,9	7,80	3,90
3015-EPD-030060789	Porotherm AKU	106	9,86	4,93
3015-EPD-030060790	Porotherm Profi	75,5	7,02	3,51
3015-EPD-030060790	Porotherm Profi	84,6	7,87	3,93
3015-EPD-030060790	Porotherm EKO+Profi	92,2	8,58	4,29

3015-EPD-030060791	Porotherm KSV 17/60 a KSV 17/45	82	7,63	3,81
3015-EPD-0300792	Vencová tehla Porotherm VT 22 a VT 23,8	83,1	7,73	3,87
3015-EPD-030060793	Vencová tehla Porotherm VT 24,9 Profi	67	6,23	3,12

Ďalšou komplikáciou je technologická náročnosť zavádzania nových výrobných postupov. Modernizácia výrobných zariadení, elektrifikácia pecí, využívanie alternatívnych palív alebo implementácia princípov obehového hospodárstva si vyžadujú rozsiahle investície a technické know-how. Mnohé tehliarske závody, najmä v rozvojových krajinách, nemajú dostatočné finančné ani technologické kapacity na realizáciu takýchto zmien. Prechod na nové technológie je navyše často spojený s neistotou týkajúcou sa kvality výsledných výrobkov a návratnosti investícií.

Významným problémom sú aj materiálové obmedzenia a dostupnosť alternatívnych surovín. Hoci existujú možnosti využívania odpadových materiálov, biomasy alebo iných nízkouhlíkových vstupov, ich implementácia môže negatívne ovplyvniť vlastnosti tehál alebo si vyžadovať úpravy výrobných procesov. Podobne aj recyklácia a opätovné využívanie odpadových materiálov v tehliarskom priemysle zatiaľ nie sú dostatočne rozšírené, hoci predstavujú významný potenciál na znižovanie environmentálnych dopadov výroby.

Proces dekarbonizácie komplikujú aj výrazné regionálne rozdiely vo výrobných technológiách a energetickej efektívnosti. Veľká časť svetovej produkcie tehál sa sústreďuje v krajinách ako Čína, India alebo Pakistan, kde sa stále využívajú technológie s vysokou emisnou intenzitou. Súčasne je v mnohých regiónoch problémom nedostatok spoľahlivých údajov o spotrebe energie a produkovaných emisiách, čo sťažuje plánovanie a hodnotenie účinnosti dekarbonizačných opatrení. Absencia kvalitných dát predstavuje významnú prekážku pri tvorbe národných aj medzinárodných stratégií znižovania emisií.

Napriek tomu, že výroba pálených tehál sa podieľa približne jedným percentom na celosvetových antropogénnych emisiách skleníkových plynov, sektor výroby pálených hlinených tehál zostáva v porovnaní s odvetvami výroby cementu alebo ocele relatívne opomínaný v globálnych dekarbonizačných politikách. Tento stav je prekvapujúci najmä vzhľadom na rozsah produkcie a význam tehál pre stavebný sektor. Nedostatočná pozornosť venovaná tomuto odvetviu spomaľuje implementáciu technologických inovácií a obmedzuje prístup k finančným nástrojom podporujúcim ekologizáciu výroby.

Významnú úlohu zohrávajú aj sociálno-ekonomické a infraštruktúrne bariéry. Modernizácia výrobných zariadení, zavádzanie nízkouhlíkových technológií a zvyšovanie energetickej efektívnosti si vyžadujú kvalifikovanú pracovnú silu, stabilné regulačné prostredie a dostupné investičné zdroje. Tieto podmienky však nie sú vo všetkých regiónoch sveta splnené, čo spomaľuje proces transformácie odvetvia.

Priemerná globálna emisná intenzita výroby pálených hlinených tehál sa pohybuje v rozmedzí 0,18 až 0,24 kg CO_{2eq} na kilogram výrobku. Pri odhadovanej svetovej produkcii približne 2,18 miliardy ton tehál ročne predstavujú celkové emisie približne 0,51 gigatony CO_{2eq} za rok. Hoci sú tieto hodnoty nižšie ako v prípade cementárskeho alebo oceliarskeho priemyslu, stále predstavujú významný zdroj emisií v stavebnom sektore. Perspektívne riešenia zahŕňajú modernizáciu pecí, využívanie zemného plynu, biomasy alebo alternatívnych palív, zvyšovanie energetickej účinnosti výroby a podporu recyklácie materiálov.

Efektívna dekarbonizácia výroby pálených tehál si preto vyžaduje komplexný prístup zahŕňajúci technologické inovácie, znižovanie závislosti od fosílnych palív, zlepšenie dostupnosti dát o emisiách a podporu zo strany verejných politík. Vzhľadom na význam tehál pre stavebníctvo môže úspešná transformácia tohto odvetvia významne prispieť k znižovaniu uhlíkovej stopy stavebného sektora a k dosiahnutiu cieľov uhlíkovej neutrality do roku 2050.

Literatúra

1. Dean, B.; Dulac, J.; Petrichenko, K.; Graham, P. In Global Status Report 2016: Towards Zero-Emission Efficient and Resilient Buildings.; United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2016. <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-2016-towards-zero-emission-efficient-and-resilient-buildings> (accessed 2023-05-10).
2. Global Alliance for Buildings and Construction; International Energy Agency; United Nations Environment Programme. In 2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero- Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector; Global Alliance for Buildings and Construction, 2019. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019> (accessed 2023-03-28).
3. KC, S.; Lutz, W. The Human Core of the Shared Socioeconomic Pathways: Population Scenarios by Age, Sex and Level of Education for All Countries to 2100. *Global Environmental Change* 2017, 42, 181–192.
4. Weyant, C.; Kumar, S.; Maithel, S.; Thompson, R.; Baum, E.; Bond, T. In Brick Kiln Measurement Guidelines: Emissions and Energy Performance; Climate and Clean Air Coalition, 2016.
https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/BC_BrickKilns_GuidanceDocument_Final.pdf (accessed 2023-03-27).
5. Zhang, Z. Energy Efficiency and Environmental Pollution of Brickmaking in China. *Energy* 1997, 22 (1), 33–42.
6. Miatto, A.; Schandl, H.; Fishman, T.; Tanikawa, H. Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals Used for Construction. *J. of Industrial Ecology* 2017, 21 (4), 924–937.
7. Lopez, A.; Lyoda, N.; Segal, R.; Tsai, T. In Building Materials: Pathways to Efficiency in the South Asia Brickmaking Industry; Johns Hopkins University SAIS, 2012.
8. (11) Eil, A.; Li, J.; Baral, P.; Saikawa, E. In Dirty Stacks, High Stakes: An Overview of Brick Sector in South Asia; World Bank, Washington, DC, USA, 2020. DOI: 10.1596/33727.
9. Rajarathnam, U.; Athalye, V.; Ragavan, S.; Maithel, S.; Lalchandani, D.; Kumar, S.; Baum, E.; Weyant, C.; Bond, T. Assessment of Air Pollutant Emissions from Brick Kilns. *Atmos. Environ.* 2014, 98, 549–553.
10. Christoforou, E. A.; Kylili, A.; Fokaides, P. A.; Ioannou, I. Cradle to Site Life Cycle Assessment (LCA) of Adobe Bricks. *Journal of Cleaner Production* 2016, 112, 443–452.
11. Maithel, S.; Kumar, S.; Lalchandani, D. Hybrid Hoffman Kiln Technology. Factsheets about Brick Kilns in South and Southeast Asia. 2014. <https://www.shareweb.ch/site/Climate-Change-and-Environment/about%20us/about%20gpc/D o c u m e n t s /06%20Hybrid%20Hoffman%20Kiln.pdf> (accessed 2023-04-03).
12. Maithel, S.; Heierli, U. In Brick by Brick: The Herculean Task of Cleaning up the Asian Brick Industry; The Swiss Agency for Development and Cooperation, Berne, Switzerland, 2008. <https://www.poverty.ch/wp-content/uploads/2017/10/brick.pdf> (accessed 2023-04-03).
13. Na Talang, R. P.; Sirivithayapakorn, S. Application of Life Cycle Assessment Method for Environmental Impact Assessment of Fired Brick Production Plant in Thailand. *Appl. Envi. Res.* 2016, 15–26.
14. Tiwari, P. Energy Efficiency and Building Construction in India. *Building and Environment* 2001, 36 (36), 1127–1135.

15. Kumbhar, S.; Kulkarni, N.; Rao, A. B.; Rao, B. Environmental Life Cycle Assessment of Traditional Bricks in Western Maharashtra, India. *Energy Procedia* 2014, 54, 260–269.
16. Nepal, S.; Mahapatra, P.; Adhikari, S.; Shrestha, S.; Sharma, P.; Shrestha, K.; Pradhan, B.; Puppala, S. A Comparative Study of Stack Emissions from Straight-Line and Zigzag Brick Kilns in Nepal. *Atmosphere* 2019, 10 (3), 107.
17. Koroneos, C.; Dompros, A. Environmental Assessment of Brick Production in Greece. *Building and Environment* 2007, 42 (5), 2114– 2123.
18. Akinshipe, O.; Kornelius, G. Quantification of Atmospheric Emissions and Energy Metrics from Simulated Clamp Kiln Technology in the Clay Brick Industry. *Environ. Pollut.* 2018, 236, 580–590.
19. Akinshipe, O.; Gerrit, K. Chemical and Thermodynamic Processes in Clay Brick Firing Technologies and Associated Atmospheric Emissions Metrics-A Review. *J. Pollut Eff Cont* 2017, 05 (02), 1000190.
20. Almeida, M. I.; Dias, A. C.; Demertzi, M.; Arroja, L. Contribution to the Development of Product Category Rules for Ceramic Bricks. *Journal of Cleaner Production* 2015, 92, 206–215.
21. Kulkarni, N. G.; Rao, A. B. Carbon Footprint of Solid Clay Bricks Fired in Clamps of India. *Journal of Cleaner Production* 2016, 135, 1396–1406.
22. Maithel, S.; Lalchandani, D.; Malhotra, G.; Bhanware, P.; Uma, R.; Ragavan, S.; Athalye, V.; Bindiya, K. R.; Reddy, S.; Bond, T. In *Brick Kilns Performance Assessment*; Greentech, New Delhi, India, 2012.
23. Manandhar, U. M.; Dangol, S. B. In *Study on Evaluating Energy Conservation Potential of Brick Production in SAARC Countries A Report on Nepal*; MinErgy Initiatives, Nepal, 2013. <https://www.saarcenergy.org/wp-content/uploads/2022/06/2012-Final-Report-Evaluating-Energy-Conservation-in-Brick-Production-in-Nepal.pdf>.
24. Rauf, A.; Shakir, S.; Ncube, A.; Abd-ur-Rehman, H. M.; Janjua, A. K.; Khanum, S.; Khoja, A. H. Prospects towards Sustainability: A Comparative Study to Evaluate the Environmental Performance of Brick Making Kilns in Pakistan. *Environmental Impact Assessment Review* 2022, 94, 106746.
25. Karaman Öztaş , S.; İ riş , S. Fired Clay Brick or Autoclaved Aerated Concrete as Walling Materials in Terms of Sustainability. *Celal Bayar University Journal of Science* 2020, 16 (2), 109–117, DOI: 10.18466/cbayarfbe.610833.
26. Abbas, A.; Sajid, M. B.; Iftikhar, M. A.; Khoja, A. H.; Ahmad, M. M.; Shahid, M.; Ullah, K. Assessment of Long-Term Energy and Environmental Impacts of the Cleaner Technologies for Brick Production. *Energy Reports* 2021, 7, 7157–7169.
27. Ramos Huarachi, D. A.; Gonçalves, G.; de Francisco, A. C.; Canteri, M. H. G.; Piekarski, C. M. Life Cycle Assessment of Traditional and Alternative Bricks: A Review. *Environmental Impact Assessment Review* 2020, 80, 106335.
28. Hammond, G.; Jones, C. *Inventory of Carbon & Energy (ICE)*, version 1.6a; University of Bath, Bath, UK, 2008.
[https:// perigordvacance.typepad.com/files/inventoryofcarbonandenergy.pdf](https://perigordvacance.typepad.com/files/inventoryofcarbonandenergy.pdf).
29. United Nations Environment Programme. In *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*; United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2023. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293>.
30. Huang, T.; Shi, F.; Tanikawa, H.; Fei, J.; Han, J. Materials Demand and Environmental Impact of Buildings Construction and Demolition in China Based on Dynamic Material Flow Analysis. *Resources, Conservation and Recycling* 2013, 72, 91–101.
31. Ritchie, H.; Roser, M.; Rosado, P. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> (accessed 2023-07-06).

32. U.S. Geological Survey. Iron and Steel - Historical Statistics (Data Series 140). <https://www.usgs.gov/media/files/iron-and-steel-historical-statistics-data-series-140> (accessed 2023-08-10).
33. U.S. Geological Survey. Cement - Historical Statistics (Data Series 140). <https://www.usgs.gov/media/files/cement-historical-statistics-data-series-140> (accessed 2023-08-10).
34. World Resources Institute. World Greenhouse Gas Emissions: 2020. <https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2020> (accessed 2024-11-13).
35. IEA. In Iron and Steel Technology Roadmap; International Energy Agency, Paris, France, 2020. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.
36. Michelmersh, 2023. HyBrick: Michelmersh is proud to announce HyBrick™ – The world's first 100 hydrogen-fired clay bricks. Available at <https://www.mbhplc.co.uk/sustainability/hybrick/>
37. Wienerberger. Wienerberger launches first CO2-neutral brick production line: 2022. Wienerberger launches first CO2-neutral brick production line. Available at <https://www.wienerberger.com/en/media/press-releases/2022/20220211-Wienerberger-launches-first-CO2-neutral-brick-production-line.html>
38. Tarvydas, D. The role of hydrogen in energy decarbonisation scenarios. Publications Office of the European Union: Luxembourg, (2022).

4.7 Plasty

Široké využívanie plastov transformovalo moderný život a ovplyvňuje produkty od každodenných až po pokročilé technológie. Plasty sú všadeprítomné vďaka svojej odolnosti, nízkej hmotnosti, vodeodolnosti a hlavne nízkej cene [1]. Ich schopnosť tvoriť zložité tvary a odolávať korozívnym prostrediam z nich robí kľúčový materiál pre stavebníctvo a infraštruktúru, vrátane budov, dopravných sietí, verejných priestorov a správy krajiny [2].

V stavebníctve plasty často nahrádzajú tradičné materiály alebo tvoria kompozity, ktoré zlepšujú vlastnosti finálnych produktov a zároveň znižujú hmotnosť a náklady [3–7].

Globálna výroba plastov vzrástla z 2 Mt v roku 1950 [8] na 413,8 Mt v roku 2023 [9] a podľa OECD môže výroba nových plastov do roku 2060 prekročiť 1 000 Mt ročne [8]. Stavebný sektor je druhým najväčším spotrebiteľom plastov v Európe (23,5 % v roku 2022), hneď po obalovom priemysle [10].

Životnosť plastov sa líši podľa použitia; v stavebníctve sú materiály často veľmi trvácne [11]. Napriek tomu plasty produkujú odpad počas celého životného cyklu – od ťažby surovín po recykláciu [12]. Ako najväčšie priemyselné odvetvie na svete [13] je stavebníctvo kľúčové pri riadení používania plastov a znižovaní ich environmentálneho dopadu.

4.7.1 Výroba plastov

Výroba plastov je zložitý technologický proces, ktorý začína spracovaním základných surovín a končí výrobou hotových produktov používaných v každodennom živote. Najčastejšou surovinou na výrobu plastov sú ropa a zemný plyn, z ktorých sa chemickými procesmi získavajú základné chemické látky potrebné na ďalšiu výrobu.

Na obrázku 4.7.1 je znázornená všeobecná schéma výroby plastov, ktorá zachytáva hlavné etapy procesu od spracovania surovín cez chemické reakcie a výrobu polymérov až po spracovanie plastov a výrobu hotových produktov. Schéma predstavuje zjednodušený prehľad najdôležitejších výrobných krokov používaných v plastikárskom priemysle [14,15].

Prvým krokom je destilácia a krakovanie ropy. Pri destilácii sa ropa rozdeľuje na jednotlivé frakcie podľa bodu varu. Následne sa pri krakovaní veľké molekuly uhľovodíkov štiepia na menšie, ktoré slúžia ako základné chemikálie pre petrochemický priemysel. Zo získaných látok vznikajú monoméry, teda jednoduché molekuly schopné vytvárať dlhé reťazce.

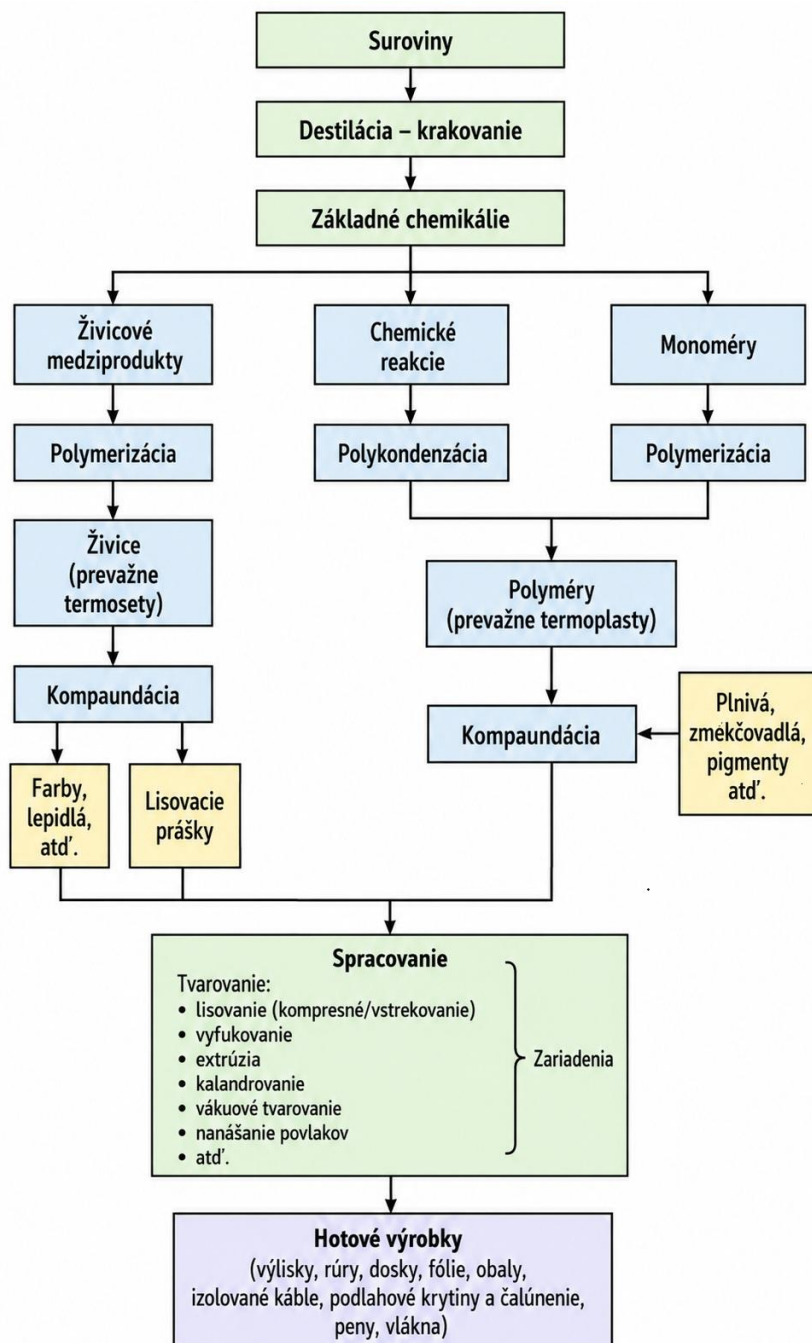
Ako je znázornené na obrázku 4.7.1, zo základných chemikálií vznikajú buď živicové medziprodukty, alebo monoméry. Monoméry sú jednoduché molekuly schopné spájať sa do dlhých reťazcov. Prostredníctvom procesu polymerizácie vznikajú polyméry, ktoré tvoria základ väčšiny plastových materiálov. Ďalšou možnosťou je polykondenzácia, pri ktorej sa vytvárajú polyméry za súčasného vzniku vedľajších produktov, napríklad vody alebo alkoholu.

Ľavá vetva schémy zobrazuje výrobu živíc, ktoré sa používajú najmä na výrobu termosetov. Tieto materiály po vytvrdnutí už nemožno opätovne roztaviť a tvarovať. Živice sa následne spracúvajú procesom kompaundácie, pričom výsledkom môžu byť napríklad farby, lepidlá alebo lisovacie prášky. Pravá časť schémy znázorňuje výrobu polymérov, ktoré predstavujú prevažne termoplasty. Na rozdiel od termosetov je možné termoplasty po zahriatí opakovane tvarovať.

Pred ďalším spracovaním sa polyméry upravujú kompaundáciou, počas ktorej sa pridávajú rôzne prísady, ako sú plnivá, zmäkčovadlá, pigmenty a ďalšie aditíva. Tieto látky zlepšujú mechanické, tepelné alebo estetické vlastnosti výsledného materiálu. Ako je uvedené na obrázku 1, takto pripravené plastové zmesi smerujú do procesu spracovania.

V dolnej časti schémy je znázornené spracovanie plastov, ktoré zahŕňa rôzne technológie tvarovania. Medzi najpoužívanejšie patria lisovanie, vstrekovanie, vyfukovanie, extrúzia, kalandrovanie a vákuové tvarovanie. Výber konkrétnej technológie závisí od požadovaného tvaru, rozmerov a vlastností výrobku. Na realizáciu týchto procesov sa využívajú špecializované stroje a zariadenia [16,17].

Konečným výsledkom celého výrobného procesu sú hotové plastové výrobky, ktoré sú znázornené v poslednom bloku schémy. Patria sem rôzne výlisky, rúry, fólie, obaly, izolácie káblov, podlahové krytiny, čalúnenie, peny a syntetické vlákna. Schéma na obrázku 4.7.1 tak poskytuje ucelený prehľad o tom, ako sa z jednoduchých surovín prostredníctvom chemických a technologických procesov vyrábajú plastové materiály a výrobky používané v každodennom živote.



Obrázok 4.7.1 Schéma výroby plastov od surovín až po hotové výrobky [14]

4.7.2 Používanie plastov v stavebníctve

Plasty predstavujú neoddeliteľnú súčasť moderného stavebníctva a tvoria približne 10 % materiálov používaných v obytných budovách [18]. Medzi najrozšírenejšie polyméry v tomto

sektore patria polyvinylchlorid (PVC), polyetylén (HDPE, LDPE), polystyrén (PS), polypropylén (PP) a polyuretán (PUR) [10, 19]. Ich široké využitie vyplýva z kombinácie nízkej hmotnosti, tvarovateľnosti, odolnosti a ekonomickej efektívnosti.

Plastové izolačné materiály, najmä PUR, EPS a XPS, zohrávajú kľúčovú úlohu pri zvyšovaní energetickej efektívnosti budov a adaptácii na zmenu klímy [20]. Ich použitie môže viesť k úsporám energie až o 16 % a k zníženiu emisií skleníkových plynov o 9 % v porovnaní s tradičnými izolačnými materiálmi [21]. Napriek priaznivým tepelnoizolačným vlastnostiam predstavuje ich horľavosť významnú výzvu, riešenú aplikáciou retardérov horenia [22]. Rastúci význam týchto materiálov sa odráža aj v globálnom trhu s izolačnými materiálmi, kde stavebný sektor predstavuje dominantný segment [23,24].

Plasty sú zároveň základným materiálom pre potrubné systémy zabezpečujúce rozvod vody, plynu a odvod odpadových vôd, predovšetkým vďaka vysokej odolnosti voči korózii a tvarovej flexibilitě [20]. PVC dominuje v tejto oblasti a jeho výroba predstavuje približne 40 % celkovej spotreby PVC [25]. Napriek deklarovanej trvácnosti však existujú dôkazy o jeho rýchlejšej degradácii v reálnych prevádzkových podmienkach. Produkcia PVC potrubí globálne rastie, a to aj napriek environmentálnym obavám spojeným s jeho toxicitou [26].

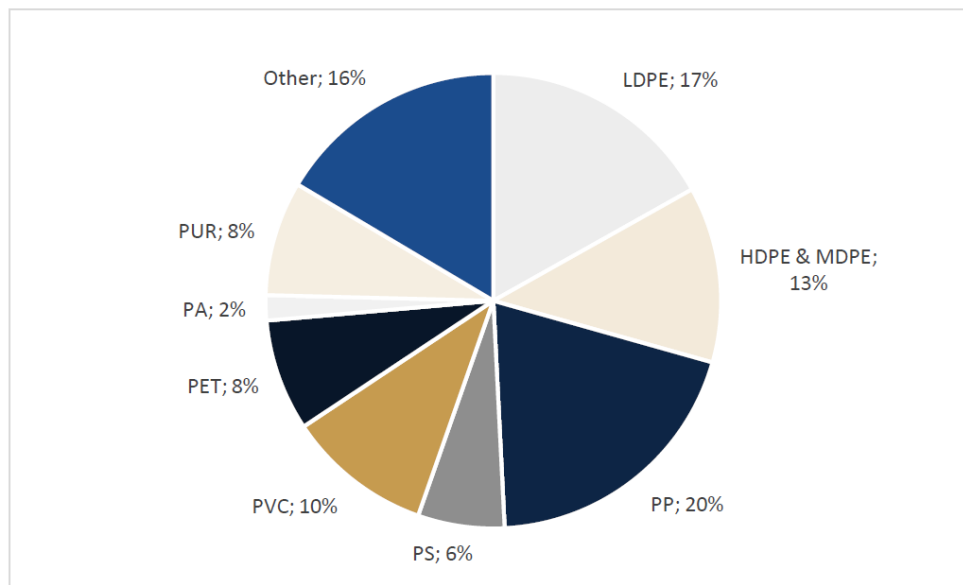
Význam plastov je výrazný aj v oblasti povrchových úprav, náterov, lepidiel a tmelov. Viac než 90 % spojív používaných vo farbách tvorí syntetické polyméry, ako PUR, PES, PAA, vinylové polyméry, alkydy a epoxidy [27]. V lepidlách a tmeloch plasty zabezpečujú mechanickú pevnosť, pružnosť a odolnosť voči únave materiálu, pričom výber konkrétneho systému závisí od mechanických, chemických a environmentálnych podmienok [28-30].

Plasty tvoria tiež kľúčové komponenty stavebných obalových konštrukcií, vrátane strešných membrán, podlahových krytín, okien a dverí. PVC dominuje v okenných a dverných systémoch vďaka priaznivej cene, energetickej efektívnosti a nízkym nárokom na údržbu [31]. Transparentné polyméry, ako polymetylmetakrylát a polykarbonát, v mnohých aplikáciách nahrádzajú sklo pre ich nižšiu hmotnosť a lepšie tepelnoizolačné vlastnosti [32].

V oblasti dopravnej infraštruktúry sa plasty čoraz častejšie využívajú na zlepšenie mechanických vlastností asfaltových zmesí. Plastové vlákna a polymérmi modifikovaný bitúmen zvyšujú trvácnosť, odolnosť voči únave a deformáciám vozoviek, pričom zároveň umožňujú využitie plastového odpadu ako náhrady tradičného kameniva [33-36].

Okrem finálnych stavebných prvkov sú plasty nevyhnutné aj pri pomocných stavebných materiáloch, ako sú hydroizolačné a parotesné membrány, geotextílie, fasádne kotvy a elektroinštalačné komponenty [38-41]. Na dosiahnutie požadovaných vlastností sú polymérne materiály často modifikované pomocou aditív, vrátane stabilizátorov, retardérov horenia a plnív [3].

Pokiaľ ide o produkciu plastov, z 390,7 Mt plastov vyrobených na celom svete v roku 2021 predstavovala EÚ-27+3 (vrátane Nórska, Švajčiarska a UK.) podiel približne 15 %, čo sa rovná 57,2 Mt. Rôzne typy PE predstavovali 24 % celkovej produkcie v krajinách EÚ-27+3, PP 16,6 %, PVC 11,4 %, PET 5,3 %, PUR 5,5 % a PS 6,1 %. Súčasne bioplasty predstavovali podiel 2,3 % a recyklované plasty 10,1 % celkovej produkcie [42]. Na obrázku 4.7.2 sú znázornené požiadavky na plasty podľa polymérov v EÚ-27+3.

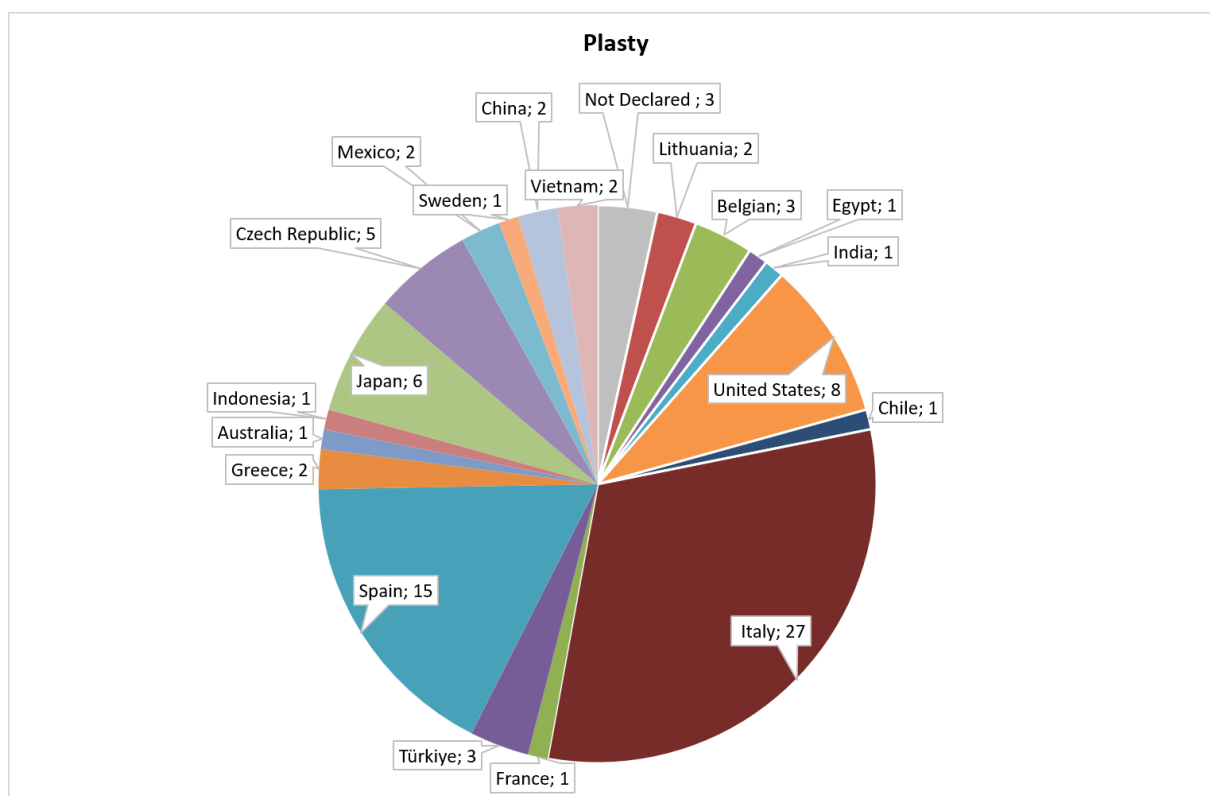


Obrázok 4.7.2 Požiadavky na plasty podľa polymérov v EÚ-27+3 v roku 2021 (podľa [38])

Ako ukazuje obrázok 4.7.2, rozdelenie dopytu po rôznych typoch polymérov v krajinách EÚ-27+3 vykazuje podobný vzorec. Hlavné polyméry predstavujú približne 82 % podiel z celkového dopytu po plastoch vo výške 50,3 Mt v roku 2021. Medzi nimi polyetylén vrátane LDPE, MDPE a HDPE predstavuje približne 30 %. Okrem toho PP predstavuje podiel 20 %, PVC podiel 10 %, PET aj PUR podiel 8 % a PS sa podieľa 6 % na európskom dopyte po plastoch v danom roku [38]. Obaly a stavebníctvo sú hlavnými hnacími silami európskeho dopytu po plastoch, pričom v roku 2021 predstavovali 60,4 % (39,1 % a 21,3 %) celkového dopytu po plastoch. Ostatné sektory, ako napríklad automobilový sektor (8,6 %) alebo elektrické a elektronické zariadenia (6,5 %), zohrávajú výrazne menšiu úlohu [42].

4.7.3 Analýza EPD databáz a hodnotenie úrovne GWP-GHG plastov a ich výrobkov v hodnotených krajinách

Pri spracovaní analýzy boli využité rôzne databázy environmentálnych vyhlásení o produktoch (International EPD System, EPD Global, epdsquare), ktoré obsahujú environmentálne údaje o výrobe plastov a ich výrobkov od viacerých výrobcov a z rôznych krajín. Na základe získaných údajov bola vykonaná analýza 80 EPD pre plasty a ich výrobky v jednotlivých krajinách (Obrázok 4.7.3), čo umožnilo posúdiť rozsah dostupnosti environmentálnych informácií v oblasti výroby plastov. Následne boli z analyzovaných EPD vyhodnotené hodnoty indikátora GWP-GHG pre fázy životného cyklu A1–A3, ktoré reprezentujú emisie skleníkových plynov vznikajúce pri výrobe plastov a ich výrobkov. Porovnaním údajov medzi jednotlivými krajinami bolo možné určiť úroveň uhlíkovej stopy plastových materiálov a identifikovať rozdiely vyplývajúce najmä z použitých výrobných technológií, podielu recyklovaného materiálu, energetického mixu, typu výroby plastov a efektívnosti výrobných procesov. Výsledná analýza poskytuje prehľad o environmentálnych parametroch plastov a ich výrobkov v medzinárodnom kontexte a vytvára podklad pre hodnotenie možností znižovania emisií CO₂ v oblasti výroby stavebných a priemyselných materiálov.



Obrázok 4.7.3 Prehľad počtu EPD pre plasty v hodnotených krajinách (Zdroj: autori)

Tabuľka 4.7.1 GWP indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre plasty

	GWP-celkový (kg CO _{2eq} /kg)	GWP-fosílny (kg CO _{2eq} /kg)	GWP-biogénny (kg CO _{2eq} /kg)	GWP-LULUC (kg CO _{2eq} /kg)	GWP-GHG (kg CO _{2eq} /kg)
Priemer	3,54	3,48	0,0183	0,00345	3,48
Min	0,0136	0,000008	-0,328	0,000006	0,000014
Max	16,9	16,9	0,5467	0,0533	16,9
Medián	2,425	2,37	0,00617	0,00118	2,3613

Tabuľka 4.7.1 prezentuje základné štatistické vyhodnotenie environmentálnych indikátorov GWP pre analyzované plastové výrobky. Výsledky poukazujú na značnú variabilitu uhlíkovej stopy plastov, ktorá je ovplyvnená najmä typom polyméru, podielom recyklovaného materiálu, použitými výrobnými technológiami a energetickou náročnosťou výroby. Priemerná hodnota ukazovateľa GWP-GHG dosahuje 3,48 kg CO_{2eq}/kg, pričom medián predstavuje 2,36 kg CO_{2eq}/kg. Skutočnosť, že priemer je vyšší ako medián, naznačuje prítomnosť plastových výrobkov s výrazne vyššími hodnotami emisií, ktoré zvyšujú celkový priemer analyzovaného súboru. Rozsah hodnôt GWP-GHG je veľmi široký – od 0,000014 až po 16,9 kg CO_{2eq}/kg. Takáto variabilita poukazuje na rozdiely medzi jednotlivými druhmi plastov a spôsobmi ich výroby. Najnižšie hodnoty sa pravdepodobne vzťahujú na výrobky s vysokým podielom recyklovaného plastu alebo na materiály, pri ktorých boli zohľadnené environmentálne prínosy recyklácie. Naopak, najvyššie hodnoty sú charakteristické pre primárne plasty vyrábané z

fosílnych surovín a pre výrobky s energeticky náročným procesom výroby. Hodnoty GWP-fosílny sú takmer totožné s hodnotami GWP-GHG a GWP-celkový, čo potvrdzuje, že rozhodujúci podiel environmentálnych dopadov plastov pochádza zo spotreby fosílnych zdrojov a emisií vznikajúcich pri výrobe polymérov. Priemerná hodnota GWP-fosílného dosahuje 3,48 kg CO_{2eq}/kg, čo predstavuje prakticky celý environmentálny profil analyzovaných plastových výrobkov. Biogénna zložka GWP vykazuje veľmi nízke hodnoty. Priemerná hodnota predstavuje 0,0183 kg CO_{2eq}/kg a medián 0,00617 kg CO_{2eq}/kg, čo naznačuje minimálny význam biogénneho uhlíka pri väčšine analyzovaných plastov. Záporná minimálna hodnota (-0,328 kg CO_{2eq}/kg) môže súvisieť s použitím bioplastov, recyklovaných materiálov alebo so započítaním biogénneho uhlíka v pomocných obalových materiáloch. Ukazovateľ GWP-LULUC dosahuje veľmi nízke hodnoty, s priemerom 0,00345 kg CO_{2eq}/kg a mediánom 0,00118 kg CO_{2eq}/kg. To znamená, že emisie spojené so zmenou využívania pôdy majú pri plastových výrobkoch zanedbateľný vplyv na celkovú uhlíkovú stopu. Vyššie hodnoty sa môžu vyskytnúť najmä pri plastoch čiastočne vyrábaných z obnoviteľných biologických zdrojov. Celkovo výsledky potvrdzujú, že environmentálne dopady plastov sú dominantne ovplyvnené fosílnymi emisiami spojenými s výrobou polymérov a spracovaním ropných alebo plyných surovín. Zároveň sa ukazuje význam využívania recyklovaných plastov a alternatívnych nízkouhlíkových výrobných technológií, ktoré môžu výrazne prispieť k znižovaniu uhlíkovej stopy plastových výrobkov.

4.7.4 Výroba plastov na Slovensku

Výroba plastov patrí medzi významné odvetvia slovenského spracovateľského priemyslu a zohráva dôležitú úlohu najmä v automobilovom, elektrotechnickom, stavebnom a obalovom sektore. Výroba plastov na Slovensku zahŕňa široké spektrum činností – od vývoja a výroby polymérnych materiálov, cez ich modifikáciu a recykláciu až po produkciu finálnych technických výliskov a komponentov. Dynamický rozvoj odvetvia je podporovaný rastúcim dopytom po ľahkých, odolných a ekonomicky efektívnych materiáloch, ktoré nachádzajú uplatnenie v mnohých oblastiach priemyslu.

Na slovenskom trhu pôsobí mnoho výrobcov plastových výrobkov, ako napríklad JASPLASTIK-SK, zameraný na vstrekovanie plastov a výrobu komponentov pre automobilový a elektronický priemysel, či Plastika, a.s. Nitra, ktorá využíva technológie vstrekovania a vytlačovania plastov pri výrobe potrubných systémov a technických plastových výrobkov. Tieto spoločnosti prispievajú k vysokej konkurencieschopnosti slovenského plastikárskeho priemyslu na európskom trhu [54].

Medzi významných slovenských výrobcov plastových materiálov patrí spoločnosť Plastcom, spol. s r.o., ktorá od roku 1996 prevádzkuje výrobný závod v Nitre. Spoločnosť sa špecializuje na vývoj, výrobu, recykláciu a aplikáciu konštrukčných plastov určených pre technické vstrekovanie. Jej produktové portfólio zahŕňa modifikované materiály na báze polyamidov (PA6, PA66), polypropylénu (PP) a polybutyléntereftalátu (PBT), ktoré sú prispôbované požiadavkám zákazníkov z automobilového, strojárkeho, elektrotechnického a spotrebného priemyslu. Významnou súčasťou činnosti spoločnosti je aj recyklácia plastových materiálov a znižovanie environmentálnych dopadov výroby prostredníctvom vývoja materiálov s nižšou uhlíkovou stopou [55]. Analýza uhlíkovej stopy plastových výrobkov firmy PLASTCOM, spol. s r.o. bola spracovaná riešiteľským kolektívom a je uvedená v Tabuľke 4.7.2.

Analyzované hodnoty indikátora GWP-GHG (Global Warming Potential – Greenhouse Gases) v životnom cykle A1–A3 sa pohybujú v rozmedzí od 1,31 do 7,74 kg CO_{2eq}/kg produktu, pričom priemerná hodnota dosahuje 5,49 kg CO_{2eq}/kg a medián 6,34 kg CO_{2eq}/kg. Relatívne vysoký rozdiel medzi minimálnou a maximálnou hodnotou poukazuje na značnú variabilitu environmentálnych dopadov jednotlivých plastových materiálov a výrobných procesov.

Tabuľka 4.7.2 Prehľad vplyvu výroby vybraných plastových výrobkov na Slovensku na GWP-GHG (zdroj autori)

Výrobca	Druh výrobku	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} /kg)
PLASTCOM, spol. s r.o., Nitra	POLYAMIDY PA6, PA6 bez sklených vlákien	6,1
PLASTCOM, spol. s r.o., Nitra	POLYAMIDY PA6 GF, PA6 plnené skleným vláknom	5,5
PLASTCOM, spol. s r.o., Nitra	POLYAMIDY PA66, PA66 bez sklených vlákien	6,57
PLASTCOM, spol. s r.o., Nitra	POLYAMIDY PA66 GF, PA66 GF so sklenými vláknami	7,57
PLASTCOM, spol. s r.o., Nitra	POLYPROPYLENY PP, PP bez sklených vlákien	1,68
PLASTCOM, spol. s r.o., Nitra	POLYPROPYLENY PP GF, PP GF so sklenými plnivami	1,31
PLASTCOM, spol. s r.o., Kežmarok	POLYAMIDY PA6	7,46
PLASTCOM, spol. s r.o., Kežmarok	POLYAMIDY PA66	7,74
Priemer		5,49
Min		1,31
Max		7,74
Medián		6,34

Nižšie hodnoty (1,31–1,68 kg CO_{2eq}/kg) sú typické najmä pre materiály s vysokým podielom recyklovaného plastu alebo pre výrobky vyrábané energeticky efektívnymi technológiami. Naopak, vyššie hodnoty presahujúce 7 kg CO_{2eq}/kg sa zvyčajne vyskytujú pri technických plastoch s náročnejšou výrobou, pri použití primárnych surovín alebo pri materiáloch obsahujúcich špeciálne aditíva a výstuže.

Skutočnosť, že medián (6,34 kg CO_{2eq}/kg) je vyšší ako priemer (5,49 kg CO_{2eq}/kg), naznačuje prítomnosť niekoľkých výrazne nižších hodnôt, ktoré znižujú celkový priemer súboru. Väčšina sledovaných materiálov sa preto nachádza v intervale približne 5,5 až 7,7 kg CO_{2eq}/kg, čo možno považovať za typický rozsah uhlíkovej stopy pre technické plasty používané v priemyselných aplikáciách.

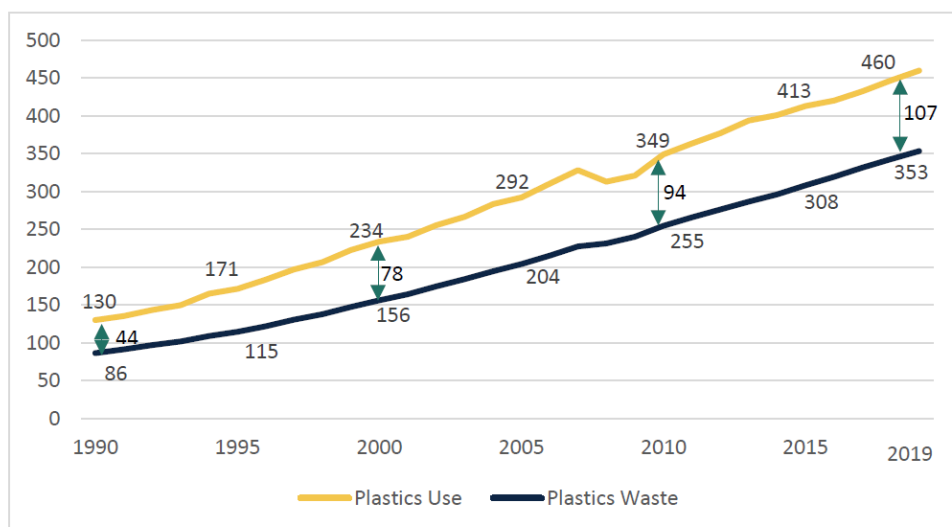
Výsledky zároveň potvrdzujú význam recyklácie a optimalizácie výrobných procesov pri znižovaní emisií skleníkových plynov. Rozdiel medzi najnižšou a najvyššou hodnotou predstavuje viac než šesťnásobok, čo poukazuje na značný potenciál environmentálnych úspor pri výbere vhodných materiálov a technológií výroby.

4.7.5 Nakladanie s plastovým odpadom

V závislosti od rôznych faktorov vrátane dizajnu produktu, spotrebiteľských vzorcov, typu a použitého sektora dosiahnu plastové výrobky v určitom bode štádium konca života [43]. Od tohto bodu sú rôzne cesty pre plasty na konci života opätovné použitie, recyklácia, spaľovanie a skládkovanie. Rozdiely medzi globálnou spotrebou plastov a produkciou plastového odpadu v miliónoch ton v intervale 1990-2019 sú znázornené na obrázku 4.7.4 a naznačujú neustále rastúci trend.

Podľa organizácie Plastics Europe (2022) sa v roku 2020 v celej EÚ vyprodukovalo približne 30 miliónov ton plastového odpadu. Likvidácia odpadu na skládkach – najmenej preferovaná cesta pre plasty po skončení životnosti podľa hierarchie odpadového hospodárstva EÚ – zostáva bežnou metódou nakladania s odpadom, pričom približne 23 % plastového odpadu končí na skládkach. Potom sa približne 42 % plastov spaľuje na energetické zhodnotenie, čo predstavuje najväčšiu cestu likvidácie plastového odpadu [45]. Ďalšou možnosťou v hierarchii odpadového hospodárstva EÚ, ktorá, ako je opísané ďalej, má oproti spaľovaniu a skládkovaniu niekoľko environmentálnych výhod, je recyklácia. Organizácia Plastic Europe

(2022) odhaduje, že v roku 2020 bolo v EÚ odoslaných na recykláciu približne 35 % plastového odpadu, zatiaľ čo na úrovni členských štátov sa toto číslo pohybuje od 21 % do 45 %.



Obrázok 4.7.4 Globálna produkcia plastov a plastového odpadu v Mt (1990-2019) podľa [44].

Obrázok 4.7.5 sumarizuje recyklovateľnosť rôznych plastov používaných v stavebníctve, zoradených od typu 1 (najviac recyklovateľný) po typ 7 (najmenej recyklovateľný) podľa systému RIC (Resin Identification Code). Ilustruje bežné použitie každého typu plastu v stavebníctve, spôsoby ich recyklovania a príslušné obrázky na lepšie pochopenie.

RECYKLOVATEĽNOSŤ PLASTOV POUŽÍVANÝCH V STAVEBNÍCTVE				
Typ	Typy plastov	Použitie	Metódy recyklácie	Príklady
1	PET (Polyetylén tereftalát)	<ul style="list-style-type: none"> Izolačné materiály Strešné membrány Vlákná 	Biologická, Chemická	
2	HDPE (Vysokohustotný polyetylén)	<ul style="list-style-type: none"> Vodovodné a plynové potrubia Plastové rezivo, Dosky 	Chemická, Fyzikálna	
3	PVC (Polyvinylchlorid)	<ul style="list-style-type: none"> Inštalčné potrubia Podlahové krytiny Izolácia káblov Okenné profily 	Chemická, Mechanická	
4	LDPE (Nízko-hustotný polyetylén)	<ul style="list-style-type: none"> Parozábrany Hydroizolačné membrány Ochranné fólie 	Chemická	
5	PP (Polypropylén)	<ul style="list-style-type: none"> Geotextílie Koberce Priemyselné vlákna Kontajnery 	Mechanická, Fyzikálna	
6	PS (Polystyrén)	<ul style="list-style-type: none"> Izolácia káblov Penové plasty 	Chemická	
7	OSTATNÉ	<ul style="list-style-type: none"> Strešné svetlíky Tvarovky Tepelné tvaovanie 	Rôzne (líšia sa podľa materiálu)	

Obrázok 4.7.5 Recyklovateľnosť plastov v stavebníctve podľa [46]

Typ 1 (PET) má najvyššiu recyklovateľnosť. Bežne sa používa v izolačných materiáloch, strešných membránach a vláknach a dá sa recyklovať biologickými a chemickými procesmi. Typ 2 (HDPE), používaný vo vodovodných a plynových potrubíach, plastových doskách a fóliách, je tiež vysoko recyklovateľný chemickými a fyzikálnymi metódami. Typ 3 (PVC), ktorý sa nachádza v potrubíach, podlahách, izolácii káblov a profiloch okien, sa recykluje

chemickými a mechanickými procesmi, ale jeho recyklovateľnosť je nižšia kvôli kontaminácii a prísadám. Typ 4 (LDPE), používaný v parozábranách, hydroizolačných membránach a ochranných krytinách, sa recykluje predovšetkým chemicky, čo obmedzuje jeho recyklovateľnosť. Typ 5 (PP), ktorý sa nachádza v geotextíliách, kobercoch, priemyselných vláknach a kontajneroch, sa recykluje mechanicky a fyzikálne, hoci kontaminácia znižuje jeho recyklačnú účinnosť. Typ 6 (PS), používaný v izolácii káblov, penových plastoch, svietidlách a EPS, je chemicky recyklovateľný, ale čelí výzvam kvôli svojej štruktúre a kontaminácii. Typ 7 (ostatné) má najnižšiu recyklovateľnosť, pretože zahŕňa strešné okná, armatúry, termoformovanie a zasklenie. Metódy recyklácie sa veľmi líšia, čo sťažuje ich efektívne spracovanie.

4.7.6 Environmentálne vplyvy plastov počas ich životného cyklu v stavebníctve

Rastúce využívanie plastov v posledných desaťročiach spôsobuje významné environmentálne dopady počas celého ich životného cyklu – od ťažby surovín až po fázu konca životnosti. Zároveň výroba polymérov a ich spracovanie sú spojené so značnými emisiami GHG, zahŕňajúc ťažbu a spracovanie fosílnych surovín, energeticky náročné kroky v petrochemickom reťazci a nízku mieru recyklácie v praxi.

V Tabuľke 4.7.3 sú uvedené orientačné číselné hodnoty emisií skleníkových plynov (GHG) pri výrobe primárnych (virgin) plastov, vyjadrené ako kg CO₂ ekv. na 1 kg plastu (cradle-to-gate). Ide o hodnoty bežne používané v LCA analýzach v stavebníctve (EPD, LCA budov), pričom sa môžu mierne líšiť podľa zdroja energie, technológie a regiónu.

Tabuľka 4.7.3 Emisie GHG pri výrobe plastov

Typ plastu (polymér)	Emisie GHG (kg CO ₂ ekv./kg)	Poznámka k použitiu v stavebníctve
HDPE / LDPE / LLDPE (PE)	1,7 – 2,5	potrubia, fólie, hydroizolácie
PP (polypropylén)	1,7 – 2,4	potrubia, tvarovky, kompozity
PVC	2,0 – 2,8	okná, potrubia, podlahy, fólie
EPS / XPS (polystyrén)	3,0 – 4,5	tepelné izolácie
PET	2,8 – 4,0	fólie, výstužné vlákna, prvky
PUR / PIR peny	3,5 – 6,0	tepelné izolácie, sendvičové panely
ABS	3,5 – 4,5	technické stavebné prvky
PA (polyamidy)	5,0 – 9,0	vysokopevnostné komponenty

Z porovnania emisií uvedených plastov vyplýva:

- Izolačné plasty (EPS, XPS, PUR) patria medzi najviac emisne náročné plasty, ale často znižujú prevádzkové emisie budov – preto je nutné hodnotiť ich v celom životnom cykle (LCA).
- PE a PP, ktoré sa masovo používajú v stavebných systémoch, majú nižšiu uhlíkovú stopu, no ich veľký objem spôsobuje významný kumulatívny dopad.
- Recyklované plasty majú spravidla o 30–70 % nižšie emisie GHG než primárne plasty (napr. rHDPE ≈ 0,5–1,0 kg CO₂ ekv./kg).

Pri výrobe plastov je prvou významnou environmentálnou záťažou ťažba fosílnych surovín, ako sú ropa, zemný plyn a uhlie, ktoré slúžia ako základ pre výrobu plastov. Dopady ťažby závisia od typu suroviny a použitej technológie. Následne sa suroviny spracúvajú v rafinérskych a krakovacích procesoch na petrochemikálie, najmä naftu a etán, z ktorých sa vyrábajú monoméry pre produkciu polymérov [45].

Najväčší podiel emisií skleníkových plynov vzniká pri spaľovaní fosílnych palív na výrobu energie a tepla potrebných pri spracovaní plastov. Emisie sa líšia podľa typu polyméru, pričom výroba primárnych polymérov, ako je polystyrén (PS) a polyetyléntereftalát (PET), ktoré sa používajú aj v stavebných aplikáciách, vykazuje vyššiu energetickú náročnosť a uhlíkovú stopu v porovnaní s rôznymi typmi polyetylénu [45,47,48].

Tabuľka 4.7.4 prezentuje hodnoty GWP-GHG pre výrobu plastov na Slovensku na roky 2030 a 2050 podľa predpokladaných emisných faktorov pre elektrinu s hodnotou 0,08 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2030 a 0,04 kg CO_{2eq}./kWh v roku 2050 [49]. Predpokladané percentuálne zníženie emisií v roku 2030 je 70,4 % a v roku 2050 je až 85,2 % v porovnaní s emisným faktorom pre „elektrina, vysoké napätie, mix, Slovenská republika“ podľa databázy Ecoinvent 3.11 s hodnotami 0,27 kg CO_{2eq}./kWh.

Tabuľka 4.7.4 GWP-GHG indikátory pre analyzovaný súbor EPD pre plasty v SR s predpokladanými emisnými faktormi v roku 2030 a 2050

Druh výrobky	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg)	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg) 2030	GWP-GHG A1–A3 (kg CO _{2eq} ./kg) 2050
POLYAMIDY PA6, PA6 bez sklených vlákien	6,10	1,81	0,90
POLYAMIDY PA6 GF, PA6 plnené skleným vláknom	5,50	1,63	0,81
POLYAMIDY PA66, PA66 bez sklených vlákien	6,57	1,95	0,97
POLYAMIDY PA66 GF, PA66 GF so sklenými vláknami	7,57	2,24	1,12
POLYPROPYLENY PP, PP bez sklených vlákien	1,68	0,50	0,25
POLYPROPYLENY PP GF, PP GF so sklenými plnivami	1,31	0,39	0,19
POLYAMIDY PA6	7,46	2,21	1,11
POLYAMIDY PA66	7,74	2,29	1,15

Významné environmentálne dopady vznikajú aj na konci životnosti plastových stavebných výrobkov. Pri skládkovaní dochádza k emisiám počas dopravy a manipulácie s odpadom, ako aj k úniku toxických látok do pôdy a podzemných vôd. Okrem toho sa plasty na skládkach postupne degradujú, pričom rýchlosť degradácie závisí od typu polyméru a podmienok prostredia [45,50].

Alternatívou k skládkovaniu je spaľovanie plastového odpadu, ktoré je však spojené s významnými environmentálnymi a zdravotnými rizikami. V rámci Európskej únie sa odhaduje, že spaľovanie plastov vedie k čistým emisiám približne 38 miliónov ton CO₂ ročne, aj po započítaní nahradenia iných fosílnych palív [51]. Environmentálny prínos spaľovania sa zároveň znižuje s rastúcim podielom elektriny z obnoviteľných zdrojov [50].

Osobitným problémom je únik plastového odpadu do životného prostredia, ktorý môže nastať aj v stavebníctve v dôsledku nedostatočného triedenia a nakladania so stavebným odpadom. Nesprávne spravované plasty sa môžu dostať do vodných tokov, kanalizačných systémov alebo do morského prostredia [52]. Najväčší podiel nesprávne spravovaných plastov tvoria polyméry s najvyšším dopytom, ako polypropylén (PP) a polyetylén (LDPE, MDPE, HDPE), ktoré sú bežne používané aj v stavebných výrobkoch [53].

Významnú časť únikov predstavujú aj mikroplasty, ktoré vznikajú napríklad mechanickým opotrebovaním plastových materiálov počas ich používania. Tieto častice môžu prenikať do pôdy, vody a ovzdušia a predstavujú dlhodobé environmentálne riziko [53, 54].

4.7.7 Kľúčové stratégie dekarbonizácie výroby plastov pre stavebníctvo

Plasty patria medzi významné materiály používané v stavebníctve, pričom ich využitie zahŕňa tepelné izolácie, potrubné systémy, hydroizolačné fólie, okenné profily a ďalšie stavebné prvky. Napriek svojim technickým a funkčným výhodám sú spojené s environmentálnymi dopadmi, ktoré vznikajú najmä počas výroby, spracovania a nakladania s odpadom po skončení životnosti. Znižovanie uhlíkovej stopy plastov preto predstavuje dôležitú súčasť dekarbonizácie stavebného sektora. Medzi hlavné opatrenia patria:

- Uprednostniť funkčné zníženie materiálu (design-for-less)
Optimalizovať návrh komponentov, aby sa dosiahla rovnaká funkcia pri menšom množstve materiálu (ľahšie rámy, tenšie profily, optimalizovaná izolácia). Menej materiálu = menej „embodied carbon“ [55].
- Zvýšiť mechanickú recykláciu a obsah recyklátu
Používať druhotný (recyklovaný) PE, PP, PET, PVC tam, kde to výkonové požiadavky dovoľujú. Recyklovaný hliník/plasty často majú výrazne nižšiu uhlíkovú stopu než primárne materiály. Hlavné prekážky: znečistenie materiálov, miešanie zliatin/zmesí, kvalita recyklátu [56].
- Chemická recyklácia ako doplnok
Pre znečistené alebo viacvrstvé plasty (napr. kompozity, mäkké fólie) môže byť efektívna chemická recyklácia (pyrolýza, depolymerizácia), ktorá vracia monoméry alebo olefinové frakcie pre opätovné spracovanie. Technológie sú však energeticky náročné, nákladné a vyžadujú zlepšenie energetickej bilancie a zdrojov energie [57].
- Náhrada fosílnych surovín – biobased a biodegradovateľné polyméry (s opatrnosťou)
Biopolyméry (PLA, PHA a ďalšie) môžu znížiť závislosť od ropy, avšak ich environmentálne prínosy závisia od pôvodu biomasy, spôsobu spracovania a nakladania s odpadom po skončení životnosti. Preto je potrebné ich hodnotiť individuálne pomocou LCA analýz [58].
- Dekarbonizácia napájania výroby plastov
Prejsť k obnoviteľnej, nízkouhlíkovej elektrine v rafinériách a polymerárňach, využívať elektrifikáciu procesov a nízkouhlíkové palivá pre teplo (zelený vodík, bioplyn) — toto má veľký potenciál pri znižovaní Scope 2 emisií výrobného reťazca [59].
- Použitie plastov, ktoré znižujú prevádzkové emisie budov
Niektoré plastové prvky (kvalitná tepelná izolácia z EPS/XPS, parozábrany, kompozitné fasádne panely) významne znižujú prevádzkové emisie počas životnosti budovy. Vyššia uhlíková stopa materiálu môže byť v mnohých prípadoch kompenzovaná úsporami energie počas prevádzky, čo je potrebné overiť prostredníctvom LCA hodnotenia [60].
- Cirkulárne modely a návrh pre demontáž / opätovné použitie
Navrhovať prvky pre rozoberateľnosť, zjednodušiť triedenie a opätovné použitie vymontovateľných komponentov (fasádne panely, okná, podlahy). Digitálne štítkovanie (EPD, digitálne pasy materiálov) pomáha sledovať pôvod a zloženie [58].
- Normy, certifikáty a politické nástroje
Carbon pricing, mandáty pre obsah recyklátu, EPR (rozšírená zodpovednosť výrobcu), štandardy pre EPD (environmentálne produktové deklarácie) a verejné zadávanie s požiadavkou na nízke zabudované emisie uhlíka motivujú výrobcov aj investorov k udržateľnejším riešeniam [61].

Z uvedených opatrení vyplýva, že najväčší potenciál na znižovanie emisií skleníkových plynov spočíva v kombinácii efektívneho využívania materiálov, rozvoja recyklácie, využívania nízkouhlíkovej energie a uplatňovania princípov cirkulárnej ekonomiky. Keďže najväčší podiel emisií vzniká vo fáze výroby plastov, osobitný význam má znižovanie spotreby primárnych surovín a zvyšovanie podielu recyklovaných materiálov. Dôležitým nástrojom pri hodnotení environmentálnych dopadov zostáva analýza životného cyklu (LCA) a environmentálne produktové deklarácie (EPD), ktoré umožňujú objektívne porovnávať jednotlivé materiálové riešenia a podporujú rozhodovanie smerujúce k udržateľnejšiemu stavebníctvu [62].

Literatúra

1. Ziani K, Ioniță-Mindrican C-B, Mititelu M, Neacșu SM, Negrei C, Moroșan E, Drăgănescu D, Preda O-T (2023) Microplastics: a real global threat for environment and food safety: a state of the art review. *Nutrients* 15:617–645. <https://doi.org/10.3390/nu15030617>
2. Yousaf A, Khan SA, Koc M (2025) Exploring the potential of construction-compatible materials in structural supercapacitors for energy storage in the built environment. *Cem Concr Compos* 155:105809. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105809>
3. Agarwal S, Gupta RK (2017) Plastics in buildings and construction. In: *Applied plastics engineering handbook*. Elsevier, pp 635–649
4. Andrady AL, Neal MA (2009) Applications and societal benefits of plastics. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 364:1977–1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
5. Acuna-Pizano H, Gonzalez-Trevizo ME, Luna-Leon A, Martinez-Torres KE, Fernandez-Melchor F (2022) Plastic composites as sustainable building materials: a thermal and mechanical exploration. *Constr Build Mater* 344:128083. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128083>
6. Xue MQ (2011) Study and application of plastic construction materials. *Appl Mech Mater* 99–100:1117–1120. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.99-100.1117>
7. Zidar P, Kuhnelt D, Škapin AS, Skalar T, Drobne D, Škrlep L, Mušič B, Jemec Kokalj A (2024) Comparing the effects of pristine and UV–VIS aged microplastics: behavioural response of model terrestrial and freshwater crustaceans. *Ecotoxicol Environ Saf* 285:117020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117020>
8. OECD (2022) Global plastics outlook: policy scenarios to 2060. OECD
9. Statista (2020) Production forecast of thermoplastics worldwide from 2025 to 2050. Statista. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>. Accessed 11 Sept 2025
10. Plastics Europe (2024) The circular economy for plastics—a European analysis 2024
11. Geyer R (2020) A brief history of plastics. In: Streit-Bianchi M, Cimadevila M, Trettnak W (eds) *Mare plasticum—the plastic sea: combatting plastic pollution through science and art*. Springer International Publishing, Cham, pp 31–47
12. Hussain CM, Paulraj MS, Nuzhat S (2022) Chapter 5 - Source reduction and waste minimization in construction industry. In: Hussain CM, Paulraj MS, Nuzhat S (eds) *Source reduction and waste minimization*. Elsevier, pp 111–126
13. McKinsey & Company (2020) The next normal in construction: how disruption is reshaping the world's largest ecosystem
14. Chanda, M. *Plastics Technology Handbook*. 5. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1498786218.
15. Bonten, C. *Plastics Technology: Introduction and Foundations*. München: Hanser Publishers, 2020. ISBN 978-1569907672.
16. Alexy, P. *Procesy spracovania polymérov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016. ISBN 978-80-227-4585-7.
17. Harper, C. A. *Handbook of Plastics Technologies: The Complete Guide to Properties and Performance*. 2. vyd. New York: McGraw-Hill Professional, 2010. ISBN 978-0071491860.

18. Gonçalves MC, Margarido F (2015) Materials for construction and civil engineering: science, processing, and design. Springer International Publishing, Cham
19. Yousaf A, Al Rashid A, Polat R, Koc M (2024) Potential and challenges of recycled polymer plastics and natural waste materials for additive manufacturing. *Sustain Mater Technol* 41:e01103. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01103>
20. Plastics Europe AISBL (2012) Plastics - Architects of modern and sustainable buildings. Plastics Europe. <https://plasticseurope.org/sustainability/sustainable-use/sustainable-building-construction/>. Accessed 7 Feb 2025
21. Pilz H, Brandt B, Fehring R (2010) The impact of plastics on life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions in Europe. Denkstatt GmbH
22. Grand View Research (2024) Insulation market size, share & trends analysis report by product (Glass Wool, Mineral Wool, EPS, XPS, CMS Fibers), by end-use (Construction, Industrial, HVAC & OEM), by region, and segment forecasts, 2024–2030
23. Grand View Research (2024) Insulation market size, share & trends analysis report by product (Glass Wool, Mineral Wool, EPS, XPS, CMS Fibers), by end-use (Construction, Industrial, HVAC & OEM), by region, and segment forecasts, 2024–2030
24. Grand View Research (2025) Building thermal insulation market size, share & trends analysis report by product (Glass Wool, EPS), by application (Roof, Walls, Floor), end-use (Residential, Commercial), by region, and segment forecasts, 2025–2030
25. Makris KF, Langeveld J, Clemens FHLR (2020) A review on the durability of PVC sewer pipes: research vs. practice. *Struct Infrastruct Eng* 16:880–897. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1673442>
26. Research and Markets Ltd (2025) PVC pipes market report by application (irrigation, water supply, sewerage, plumbing, hvac, oil and gas), and region 2025–2033. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5936093/pvc-pipes-market-report-application-irrigation>. Accessed 10 Mar 2025
27. OECD (2021) OECD economic outlook, volume 2021 issue 1: preliminary version. OECD
28. Halliwell SM (2002) Polymers in building and construction. Rapra Publishing
29. Harper CA (2002) Handbook of plastics, elastomers, and composites, 4th edn. McGraw-Hill Education
30. Van Linden S, Van Den Bossche N (2020) Airtightness of sealed building joints: comparison of performance before and after artificial ageing. *Build Environ* 180:107010. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107010>
31. Akovali G (2005) Polymers in construction. iSmithers Rapra Publishing
32. Blaga A (1980) Plastics in glazing and lighting applications. *Can Build Dig* CBD-213: <https://doi.org/10.4224/40000707>
33. Bueno M, Poulikakos LD (2020) Chemo-mechanical evaluation of asphalt mixtures reinforced with synthetic fibers. *Front Built Environ* 6:41. <https://doi.org/10.3389/fbuilt.2020.00041>
34. Slebi-Acevedo CJ, Lastra-Gonzalez P, Pascual-Munoz P, Castro-Fresno D (2019) Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: a review. *Constr Build Mater* 200:756–769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.171>
35. Mashaan N, Chegenizadeh A, Nikraz H (2022) A comparison on physical and rheological properties of three different waste plastic-modified bitumen. *Recycling Basel* 7:18. <https://doi.org/10.3390/recycling7020018>
36. Ullah S, Raheel M, Khan R, Tariq Khan M (2021) Characterization of physical & mechanical properties of asphalt concrete containing low- & high-density polyethylene waste as aggregates. *Constr Build Mater* 301:124127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124127>
37. Shah SSA, Khan R (2016) Re-use of hospital plastic waste in asphalt mixes as partial replacement of coarse aggregate. *Open J Civ Eng* 6:381–387. <https://doi.org/10.4236/ojce.2016.63032>

38. Garrido M, Antonio D, Lopes JG, Correia JR (2021) Reparability of aged PVC waterproofing membranes: effect of joining method. *J Build Eng* 33:101569. [https:// doi. org/ 10. 1016/j. jobe. 2020. 101569](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101569)
39. Padmaja SB (2021) Study of clayey soils with nonwoven geotextiles as liners in landfill stabilization. *Int J Res Appl Sci Eng Technol* 9:1239–1241. [https:// doi. org/ 10. 22214/ ijras et. 2021. 35246](https://doi.org/10.22214/ijras.et.2021.35246)
40. Hrishev L, Conev I-A (2024) Resistance of plastic anchors for fixing on ETICS in different types of base materials. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 1323:012006. [https:// doi. org/ 10. 1088/ 1757- 899X/ 1323/1/ 012006](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1323/1/012006)
41. Babrauskas V (2006) Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC-insulated electrotechnical products. *Fire Mater* 30:151–174. [https:// doi. org/ 10. 1002/ fam. 900](https://doi.org/10.1002/fam.900)
42. Plastics Europe. (2022). *Plastics – The Facts 2022*, Brussels: Plastics Europe.
43. Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L. (2017), 'Production, use, and fate of all plastics ever made', *Science Advances*, Vol.3(7).
44. OECD. (2023). *Global Plastics Outlook*. Retrieved 01 03, 2023, from OECD iLibrary: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/global-plastic-outlook_c0821f81-en
45. Hamilton, L. A., et al. (2019), *Plastic & Climate, The Hidden Costs of a Plastics Planet*. Geneva: Center for International Environmental Law (CIEL).
46. Panthi, S., Zhang, F. (2025) "A Comprehensive Review of Plastic Recycling in the Construction Industry: Challenges and Opportunities in the U.S.," *CIB Conferences*: Vol. 1 Article 63. DOI: <https://doi.org/10.7771/3067-4883.2081>
47. Ren, T., Patel, M. and Blok, K. (2006), 'Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes', *Energy*, Vol. 31, pp. 425-451.
48. Charles, D. and Kimman, L. (2023), *Plastic Waste Makers Index 2023*, Broadway Nedlands, WA: The Minderoo Foundation Pty Ltd.
49. https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en
50. Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H. and Suh, S. (2020), 'Degradation Rates of Plastics in the Environment', *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, (8), pp. 3494-3511.
51. *Material Economics* (2022), *Europe's missing plastics – Taking Stock of EU Plastics Circularity*, Commissioned by Agora Industry.
52. Jambeck, J. R., et al. (2015), 'Plastic waste inputs from land into the ocean', *Science*, 347, pp.768-771.
53. Ryberg, M. W., Hauschild, M. Z., Wang, F., Averous-Monnery, S. and Laurent, A. (2019), 'Global environmental losses of plastics across their value chains, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 151, 104459.
54. Lange, J.-P. (2021), 'Managing Plastic Waste – Sorting, Recycling, Disposal, and Product Redesign', *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 9(47), pp. 15722-15738.
55. <https://www.plasticportal.sk/>
56. <https://www.plastcom.sk/>
57. Nyika, J., Dinka, M. (2022). Recycling plastic waste materials for building and construction Materials: A minireview, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 62, pp. 3257-3262.
58. https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2023-07/Chemical_recycling_of_plastics_0.pdf
59. Ali, S. S., Abdelkarim, E.A., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Li, F., Kornaros, M., Zuurro, A., Zhu, D. (2023). Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review, *Environmental Science and Ecotechnology*, Vol. 15, pp. 100254.
60. Plastics Europe (2022) *The circular economy for plastics—a European overview 2022*
61. Turk, K., Kalčíkova, G., Jemec Kokalj, A., Mušič, B. (2025). From plastic use in the construction and built environment to state-of-the-art circular economy solutions to combat microplastic pollution, *Environmental Sciences Europe* Vol 37, pp. 1-22,
62. <https://plasticseurope.org/changingplasticsforgood/the-plastics-transition/>

4.8 Drevo

Drevo patrí medzi najstaršie stavebné materiály používané človekom a v súčasnosti opäť získava význam v súvislosti so snahou o znižovanie emisií skleníkových plynov v stavebnom sektore. V porovnaní s tradičnými stavebnými materiálmi, ako sú cement, betón alebo oceľ, má drevo výrazne nižšiu uhlíkovú stopu a zároveň predstavuje obnoviteľný prírodný zdroj. Vďaka dobrým mechanickým vlastnostiam, relatívne nízkej hmotnosti a priaznivým tepelnoizolačným vlastnostiam sa drevo využíva pri výstavbe rodinných domov, viacpodlažných budov, mostov či rôznych konštrukčných prvkov [1].

4.8.1 Drevo ako konštrukčný materiál

Rozvoj moderných technológií spracovania dreva umožnil vznik nových konštrukčných materiálov, ako sú lepené lamelové drevo (glulam), krížom lepené drevo (CLT – Cross Laminated Timber) alebo laminované dyhové drevo (LVL). Tieto materiály sa vyznačujú vysokou pevnosťou, stabilitou a umožňujú realizáciu väčších stavebných konštrukcií, vrátane viacpodlažných budov.

V stavebníctve sa dnes využívajú najmä tieto typy drevených konštrukčných systémov:

- Drevené rámové konštrukcie (frame structures) – najčastejšie pri rodinných domoch.
- Masívne drevené konštrukcie – CLT panely, lepené lamelové nosníky.
- Hybridné konštrukcie – kombinácia dreva s betónom alebo oceľou.

Použitie prefabrikovaných drevených prvkov zároveň umožňuje rýchlejšiu a presnejšiu výstavbu, keďže časť výroby prebieha v priemyselných halách [2].

Analýzy ukazujú, že drevostavby môžu výrazne znížiť emisie CO₂ v porovnaní s tradičnými materiálmi. V posledných rokoch preto vznikajú moderné drevostavby, ktoré predstavujú alternatívu k tradičným betónovým alebo oceľovým konštrukciám [3].

Napríklad pri projekte Timber Praha (Obr. 4.8.1) sa preukázalo, že hybridná drevostavba mala o približne 52 % nižšie celkové emisie CO₂ v porovnaní s pôvodným železobetónovým projektom [2].



Obrázok 4.8.1 Timber Praha - drevené viacpodlažné bytové domy

Timber Praha predstavuje prvé drevené viacpodlažné bytové domy v novodobej histórii českej metropoly. Súčasťou rezidenčného komplexu Arcus City je 62 bytových jednotiek. Tento komplex vznikol v roku 2024 na pomedzí pražských štvrtí Stodůlky a Řeporyje a zahŕňa celkovo 278 bytov a niekoľko obchodných jednotiek.

Domy Timber Praha sú vybavené energeticky úspornými prvkami, tepelnými čerpadlami, fotovoltickými panelmi, geotermálnymi vrtmi a systémom Smart Home. Nosná drevená konštrukcia je vyrobená zo smrekového dreva, pričom vonkajšie obklady fasády sú zo

smrekovca. Drevo je použité aj v interiéri bytov ako pohľadový materiál na stropoch obytných miestností, chodieb a taktiež na schodiskách.

Dodávateľom drevených konštrukcií bola rakúska spoločnosť ELK s dlhoročnými skúsenosťami. Bytové domy komornejšieho charakteru obsahujú byty s dispozíciami od 1+kk až po 4+kk a s výmerou od 39 m² do 110 m².

Projekt Timber Praha je realizovaný s energetickým certifikátom PENB A – mimoriadne úsporná budova – a zároveň získal ekologickú certifikáciu BREEAM Excellent [4].

4.8.2 Uhlíková stopa drevených materiálov

V praxi sa často využívajú aj hybridné konštrukčné systémy, kde sa drevo kombinuje s betónom alebo oceľou s cieľom optimalizovať statické vlastnosti a zároveň znížiť environmentálne dopady stavby.

Z environmentálneho hľadiska je významnou výhodou dreva jeho schopnosť viazať uhlík počas rastu stromov. Stromy počas fotosyntézy absorbujú oxid uhličitý (CO₂) z atmosféry a ukladajú uhlík vo svojej biomase. Tento uhlík zostáva uložený aj v drevených výrobkoch počas celej životnosti stavby. V dôsledku toho môžu drevené konštrukcie fungovať ako dočasné zásobníky uhlíka, čím prispievajú k znižovaniu koncentrácie CO₂ v atmosfére [5].

Uhlíková stopa drevených materiálov je vo všeobecnosti nižšia ako pri tradičných stavebných materiáloch. Výroba cementu alebo ocele je energeticky náročná a spojená s vysokými emisiami CO₂, zatiaľ čo spracovanie dreva si vyžaduje menej energie a produkuje menej emisií. Štúdie ukazujú, že nahradenie energeticky náročných materiálov drevom môže významne znížiť emisie skleníkových plynov počas životného cyklu budovy [6]. Okrem toho môže byť časť energie potrebnej na spracovanie dreva získaná z biomasy alebo z odpadového dreva.

Pri hodnotení environmentálnych dopadov dreva je však potrebné zohľadniť celý životný cyklus materiálu (Life Cycle Assessment – LCA). Do uhlíkovej stopy vstupuje ťažba dreva, jeho spracovanie, doprava, výstavba, údržba a spôsob nakladania s materiálom po skončení životnosti stavby [7]. Ak je drevo po skončení životnosti budovy recyklované alebo energeticky využité, môže to ešte viac znížiť jeho celkový environmentálny dopad.

V súčasnosti sa preto kladie dôraz aj na udržateľné lesné hospodárstvo a certifikáciu dreva, napríklad prostredníctvom systémov FSC (Forest Stewardship Council) alebo PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification). Tieto systémy zabezpečujú, že drevo pochádza z lesov obhospodarovaných environmentálne a sociálne zodpovedným spôsobom [8].

Napriek mnohým výhodám má využívanie dreva v stavebníctve aj určité obmedzenia. Medzi hlavné výzvy patrí požiarne bezpečnosť, ochrana dreva pred vlhkosťou a biologickými škodcami, ako aj dostupnosť kvalitnej suroviny v niektorých regiónoch. Moderné stavebné technológie, ochranné nátery a konštrukčné riešenia však postupne umožňujú tieto problémy minimalizovať.

Využívanie dreva v stavebníctve tak predstavuje významný krok smerom k nízkouhlíkovému stavebníctvu. Pri správnom využívaní a zodpovednom hospodárení so zdrojmi môže drevo významne prispieť k znižovaniu uhlíkovej stopy budov a k rozvoju udržateľného stavebného sektora.

4.8.3 Spracovanie dreva na Slovensku

Slovensko patrí medzi krajiny s bohatými lesnými zdrojmi. Lesy pokrývajú približne 41 % územia štátu a zásoba dreva v slovenských lesoch sa odhaduje na približne 396 miliónov m³ [9]. Vďaka tomu je drevo jednou z najvýznamnejších domácich surovín a drevospracujúci priemysel patrí medzi dôležité odvetvia slovenského hospodárstva. Okrem ekonomického významu má drevo aj ekologický prínos, pretože ide o obnoviteľný prírodný zdroj.

Spracovanie dreva sa začína v lesnom hospodárstve, kde sa drevo po vyťažení triedi a prepravuje do spracovateľských podnikov. Na pilách sa guľatina rozreže na rezivo, ktoré sa následne využíva v stavebníctve, nábytkárstve alebo pri výrobe drevených konštrukcií. Časť drevnej suroviny sa ďalej spracováva na drevotrieskové dosky, celulózu a papier.

Drevospracujúci priemysel na Slovensku má značnú výrobnú kapacitu. Celková kapacita slovenských píl a drevospracujúcich podnikov je približne 4 milióny m³ surového dreva ročne [10]. Významné postavenie má aj 31 piliarskych spoločností združených v drevárskej sekcii Zväzu spracovateľov dreva SR, ktoré spolu spracujú viac ako 1,5 milióna m³ piliarskej guľatiny ročne. Tieto podniky zabezpečujú veľkú časť domáceho spracovania dreva a dodávajú surovinu pre ďalšie odvetvia priemyslu.

Medzi najvýznamnejšie podniky patrí Mondi SCP Ružomberok, najväčší slovenský výrobca papiera a celulózy, a KRONOSPAN Zvolen, ktorý sa špecializuje na výrobu drevotrieskových a laminovaných dosiek. Významným spracovateľom dreva je aj Slovwood Ružomberok, ktorý ročne spracuje viac ako 1,2 milióna m³ dreva, čím patrí medzi najväčšie drevárske spoločnosti na Slovensku. K tradičným podnikom patrí aj Bučina DDD Zvolen, zameraná najmä na spracovanie bukového dreva [11-12].

Dôležitou súčasťou moderného drevospracujúceho priemyslu je efektívne využívanie drevnej hmoty. Vedľajšie produkty, ako sú piliny, štiepka a kôra, sa používajú na výrobu drevotrieskových dosiek, peliet alebo energie. Vďaka tomu sa minimalizuje odpad a zvyšuje hospodárnosť výroby.

Spracovanie dreva má na Slovensku dlhú tradíciu a významne prispieva k rozvoju hospodárstva. Bohaté lesné zdroje, vysoká kapacita spracovania a pôsobenie významných podnikov umožňujú efektívne využívať domácu surovinu a vytvárať produkty s vysokou pridanou hodnotou pre domáci aj zahraničný trh.

4.8.4 Dekarbonizácia drevospracujúceho priemyslu na Slovensku

Drevospracujúci priemysel patrí medzi odvetvia, ktoré majú dobré predpoklady na znižovanie emisií skleníkových plynov. Drevo je obnoviteľná surovina a počas rastu stromov sa v ňom ukladá oxid uhličitý (CO₂), ktorý zostáva viazaný aj v drevených výrobkoch. Preto sa drevo považuje za materiál s nižšou uhlíkovou stopou v porovnaní s oceľou, betónom alebo plastmi.

Na Slovensku sa dekarbonizácia v drevospracujúcom priemysle realizuje najmä týmito spôsobmi:

- Využívanie biomasy na výrobu energie – piliny, kôra a drevná štiepka sa používajú ako palivo na výrobu tepla a elektriny. Tým sa znižuje spotreba fosílnych palív, ako sú uhlie alebo zemný plyn.
- Maximálne využitie drevnej hmoty – moderné podniky spracúvajú takmer všetky časti stromu. Odpad z píl sa ďalej využíva na výrobu dosiek, peliet alebo energie, čím sa znižujú emisie spojené s odpadovým hospodárstvom.
- Energeticky úsporné technológie – nové výrobné linky spotrebujú menej elektrickej energie a tepla na jednotku produkcie.
- Podpora drevostavieb – používanie dreva v stavebníctve pomáha znižovať emisie, pretože výroba drevených konštrukcií je menej energeticky náročná ako výroba betónu alebo ocele.
- Udržateľné lesné hospodárstvo – po ťažbe sa lesy obnovujú výsadbou nových stromov, ktoré opäť viažu CO₂ z atmosféry.

Príkladom dekarbonizačných opatrení je spoločnosť Mondi SCP, ktorá investuje do nových zdrojov energie na biomasu. Cieľom je zvýšiť energetickú sebestačnosť závodu a znížiť závislosť od fosílnych palív. Podobné opatrenia zavádzajú aj ďalšie drevospracujúce podniky na Slovensku.

V porovnaní s mnohými inými priemyselnými odvetviami má drevospracujúci priemysel výhodu, že pracuje s obnoviteľnou surovinou a časť energie si dokáže vyrábať z vlastných vedľajších produktov. Preto môže významne prispieť k plneniu klimatických cieľov Slovenska a Európskej únie.

Literatúra

1. Gustavsson, L., Pingoud, K., & Sathre, R. (2017). Carbon dioxide balance of wood substitution: Comparing concrete- and wood-framed buildings. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(3), 667–691.
2. <https://www.ubm-development.com/cs/projekty/timber-praha/>
3. Hildebrandt, J., Hagemann, N., & Thrän, D. (2017). The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. *Sustainable Cities and Society*, 34, 405–418.
4. <https://www.ubm-development.com/cs/projekty/timber-praha/>
5. IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
6. Leskinen, P., Cardellini, G., González-García, S., et al. (2018). Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. *European Forest Institute*.
7. Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416.
8. FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
9. Ministerstvo pôdohospodárstva a rozvoja vidieka SR. Dostupné na: <https://www.mpsr.sk>
10. Zväz spracovateľov dreva Slovenskej republiky. Dostupné na: <https://www.zsdsr.sk>
11. Mondi SCP Ružomberok. Dostupné na: <https://www.mondislovensko.sk/>
12. Slovwood Ružomberok. Informácie o spoločnosti. Dostupné na: <https://www.slovwood.sk/>

5 HLAVNÉ PRIORITY PRE DOSIAHNUTIE NULOVÝCH EMISIÍ V STAVEBNOM SEKTORE DO ROKU 2050

Budovy a stavebníctvo sú zodpovedné za takmer 40 % globálnych emisií oxidu uhličitého spojených s využívaním energie. Tieto emisie sa delia na dve hlavné kategórie: prevádzkové emisie (približne 70 %) a zabudované emisie (zvyšných 30 %). Na splnenie cieľov Parížskej dohody, ktorá sa snaží udržať globálne otepľovanie pod 1,5 °C, musí stavebný sektor znížiť svoje emisie o polovicu do roku 2030 a dosiahnuť nulové emisie do roku 2050.

Medzi hlavné priority patrí:

5.1 Celkové posudzovanie uhlíkovej stopy počas životného cyklu stavby

Donedávna sa dekarbonizačné stratégie v stavebníctve zameriavali predovšetkým na znižovanie emisií spojených s prevádzkou budov, najmä prostredníctvom zvyšovania energetickej efektívnosti a využívania nízkouhlíkových zdrojov energie. S postupnou dekarbonizáciou energetického sektora však rastie význam zabudovaného uhlíka, ktorý zahŕňa emisie vznikajúce počas ťažby surovín, výroby stavebných materiálov, dopravy, výstavby, údržby, obnovy a demolácie objektov.

Významný podiel na globálnych emisiách skleníkových plynov majú najmä stavebné materiály s vysokou uhlíkovou náročnosťou, ako sú betón a oceľ. Z tohto dôvodu sa čoraz viac presadzuje uplatňovanie metodík hodnotenia uhlíkovej stopy počas celého životného cyklu stavby (Whole Life Carbon – WLC), ktoré umožňujú komplexne kvantifikovať emisie skleníkových plynov vo všetkých fázach životného cyklu budovy.

Jedným z významných metodických prístupov je rámec vypracovaný World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), ktorý poskytuje štandardizovaný postup na identifikáciu a monitorovanie emisií počas celého životného cyklu budov. Výsledky hodnotenia umožňujú identifikovať hlavné zdroje emisií, takzvané uhlíkové hotspots, ktoré sa často nachádzajú v nosných konštrukčných systémoch a interiérových povrchových úpravách.

Význam hodnotenia uhlíkovej stopy počas celého životného cyklu potvrdzuje aj legislatívny vývoj v rámci Európskej únie. Revidovaná smernica o energetickej hospodárnosti budov zavádza požiadavku na vykazovanie emisií skleníkových plynov počas celého životného cyklu pre nové budovy, pričom možno očakávať, že obdobné regulačné opatrenia budú postupne implementované aj v ďalších krajinách a regiónoch.

5.2 Dekarbonizácia materiálov s vysokou uhlíkovou náročnosťou

Významnú časť emisií skleníkových plynov v stavebnom sektore predstavuje výroba stavebných materiálov s vysokou uhlíkovou náročnosťou, predovšetkým cementu, ocele a hliníka. Tieto materiály sa spoločne podieľajú približne 30 % na celkových emisiách stavebného priemyslu. Znižovanie ich uhlíkovej stopy preto predstavuje jednu z kľúčových podmienok úspešnej dekarbonizácie stavebníctva.

V súčasnosti sa rozvíjajú nové technológie a výrobné postupy, ktoré umožňujú významne znížiť emisie skleníkových plynov bez negatívneho vplyvu na technické vlastnosti a kvalitu výsledných materiálov.

Výroba tradičného portlandského cementu patrí medzi najvýznamnejšie zdroje emisií CO₂, predovšetkým v dôsledku procesu kalcinácie vápenca a vysokej energetickej náročnosti výroby. Perspektívnou alternatívou sú geopolymérne cementy vyrábané z vedľajších priemyselných produktov, ako sú popolček alebo vysokopecná troska, ktoré nevyžadujú kalcináciu vápenca. Ďalšou inovatívnou technológiou je výroba betónov s karbonatným vytvrdzovaním, pri ktorých dochádza počas procesu tuhnutia k viazaniu CO₂ do štruktúry

materiálu. Uvedené riešenia môžu v porovnaní s konvenčnými technológiami znížiť emisie až o 80 %.

V oceliarskom priemysle dochádza k postupnému prechodu od tradičných vysokých pecí využívajúcich koks k nízkoemisným výrobným technológiám. Medzi perspektívne riešenia patria elektrické oblúkové pece napájané elektrickou energiou z obnoviteľných zdrojov a technológia priamej redukcie železa s využitím vodíka, pri ktorej sa uhlík v redukčnom procese nahrádza vodíkom. Tieto prístupy zároveň podporujú vyššiu mieru recyklácie oceleového šrotu, čím prispievajú k znižovaniu energetickej náročnosti výroby a rozvoju obehového hospodárstva.

Výroba hliníka je taktiež energeticky náročný proces s významným environmentálnym dosahom. Potenciál znižovania emisií spočíva najmä vo využívaní nízkouhlíkových technológií elektrolýzy napájaných obnoviteľnými zdrojmi energie a v rozširovaní uzavretých recyklačných cyklov.

Popri vývoji nízkoemisných materiálov je dôležité zamerať sa aj na optimalizáciu spotreby materiálov. Efektívne konštrukčné návrhy, ľahké stavebné systémy a modulárna výstavba umožňujú znížiť materiálovú náročnosť už vo fáze projektovania. Významný potenciál má aj opätovné využívanie stavebných materiálov, ako sú drevo, tehly alebo oceľ získané zo selektívnej demolácie existujúcich objektov, čím sa obmedzuje potreba ťažby primárnych surovín a znižujú emisie spojené s ich spracovaním.

Príkladom prínosov obehového hospodárstva je recyklácia ocele, ktorá v porovnaní s výrobou z primárnej železnej rudy vyžaduje približne o 75 % menej energie. Význam cirkulárnych princípov v procese dekarbonizácie stavebníctva zdôrazňuje aj národná stratégia dekarbonizácie sektora budov vypracovaná United States Department of Energy, ktorá odporúča rozšírenie politických nástrojov a podporných mechanizmov zameraných na využívanie opätovne použitých a recyklovaných materiálov.

5.3 Obnova existujúcich budov a elektrifikácia ako efektívne nástroje dekarbonizácie

Predpokladá sa, že približne 80 % budov, ktoré budú využívané v roku 2050, už v súčasnosti existuje. Táto skutočnosť naznačuje, že znižovanie emisií skleníkových plynov v sektore stavebníctva nezávisí len od návrhu nových nízkouhlíkových budov, ale vo významnej miere aj od obnovy a modernizácie existujúceho stavebného fondu.

Komplexná obnova budov predstavuje účinný a škálovateľný prístup k znižovaniu emisií. Opatrenia, ako sú zlepšenie tepelnoizolačných vlastností obvodových konštrukcií, inštalácia vysokovýkonných okien a modernizácia systémov vykurovania, vetrania a klimatizácie (HVAC), môžu znížiť prevádzkovú spotrebu energie o 50 až 75 %. Ďalší potenciál znižovania emisií prináša elektrifikácia budov, ktorá spočíva v nahrádzaní zariadení využívajúcich fosílnu palivá elektrickými technológiami, ako sú tepelné čerpadlá. Význam elektrifikácie sa zvyšuje najmä v podmienkach rastúceho podielu obnoviteľných zdrojov energie v elektroenergetickej sústave.

5.4 Politické nástroje, partnerstvá a dlhodobé stratégie dekarbonizácie

Dosiahnutie uhlíkovo neutrálnych budov nezávisí výlučne od vývoja nízkoemisných materiálov a zavádzania inovatívnych technológií. Kľúčovú úlohu zohrávajú aj vhodne nastavené regulačné rámce, ekonomické stimuly a dlhodobá koordinácia medzi jednotlivými zainteresovanými subjektmi. Bez systematickej podpory zo strany verejných politík a efektívnej spolupráce medzi sektormi je implementácia aj technologicky vyspelých riešení výrazne obmedzená.

- **Stanovenie štandardov podporujúcich transformáciu sektora**

Jedným z najúčinnějších regulačných nástrojov sú štandardy energetickej a emisnej výkonnosti budov (Building Performance Standards – BPS), ktoré stanovujú záväzné ciele pre postupné znižovanie energetickej náročnosti a emisií skleníkových plynov existujúcich budov. Tieto politiky motivujú vlastníkov a investorov k realizácii opatrení na zvyšovanie energetickej efektívnosti a zároveň zabezpečujú systematické monitorovanie dosiahnutého pokroku.

Významnú úlohu pri dekarbonizácii zohráva aj súkromný sektor. Medzinárodné iniciatívy, ako napríklad Science Based Targets initiative (SBTi), podporujú podniky pri stanovovaní klimatických cieľov v súlade s vedeckými poznatkami a trajektóriami potrebnými na obmedzenie globálneho otepľovania. Takýto prístup prispieva k transparentnosti a dôveryhodnosti environmentálnych záväzkov organizácií.

- **Korekcia ekonomických stimulov**

Regulačné opatrenia významne ovplyvňujú ekonomické podmienky dekarbonizácie. Pretrvávajúce dotácie na fosílna palivá naďalej znevýhodňujú nízkouhlíkové technológie a spomaľujú ich širšie uplatňovanie. Presmerovanie finančných stimulov smerom k udržateľným riešeniam, zavedenie mechanizmov oceňovania uhlíka a podpora investícií do nízkoemisných technológií môžu vytvoriť priaznivejšie podmienky pre transformáciu stavebného sektora.

Podľa odhadov Medzinárodnej energetickej agentúry bude približne 70 % potrebných redukcí emisií do roku 2050 závisieť od účinných cenových mechanizmov a cielených finančných stimulov.

- **Medzisektorová spolupráca a harmonizácia postupov**

Dekarbonizácia stavebníctva predstavuje komplexnú výzvu, ktorú nie je možné riešiť izolovane v rámci jedného sektora. Rastúci význam preto nadobúdajú partnerstvá medzi verejným a súkromným sektorom, ktoré umožňujú efektívnejšie zdieľanie odborných poznatkov, technológií a finančných zdrojov.

Príkladom úspešnej medzinárodnej spolupráce je program Advancing Net Zero, koordinovaný organizáciou World Green Building Council, ktorý prepája národné rady pre zelené budovy s cieľom podporovať výmenu dát, metodík a osvedčených postupov v oblasti dekarbonizácie.

Súčasne narastá význam harmonizácie metodických rámcov a ukazovateľov. Príkladom je iniciatíva Net Zero Carbon Buildings Standard vo Veľkej Británii, ktorej cieľom je vytvoriť jednotný prístup k hodnoteniu prevádzkového aj zabudovaného uhlíka. Zavedenie štandardizovaných metodík umožňuje porovnateľnosť výsledkov, zvyšuje transparentnosť a podporuje efektívnejšie riadenie procesu dekarbonizácie na národnej aj medzinárodnej úrovni.

5.5 Inovácie a rozvoj pracovnej sily ako predpoklad efektívnej dekarbonizácie

Podľa súčasných odhadov bude takmer polovica redukcí emisií skleníkových plynov potrebných na dosiahnutie klimateckej neutrality do roku 2050 závisieť od technológií, ktoré sa v súčasnosti nachádzajú v počiatočných fázach vývoja alebo komercializácie. Investície do výskumu, vývoja a inovácií preto predstavujú nevyhnutný predpoklad úspešnej dekarbonizácie stavebného sektora a energetických systémov.

Medzi perspektívne technologické oblasti patria najmä pokročilé systémy akumulácie energie, ktoré umožňujú efektívnejšiu integráciu prerušovaných obnoviteľných zdrojov energie, technológie priameho zachytávania oxidu uhličitého z atmosféry (Direct Air Capture – DAC) určené na odstraňovanie reziduálnych emisií a inteligentné elektrické siete, ktoré podporujú efektívne riadenie decentralizovaných zdrojov energie a spotrebiteľského dopytu.

Samotný technologický pokrok však nezaručuje úspešnú transformáciu smerom k nízkouhlíkovému hospodárstvu. Rozsiahle zavádzanie inovatívnych riešení si vyžaduje kvalifikovanú pracovnú silu schopnú navrhovať, inštalovať, prevádzkovať a udržiavať moderné energetické systémy. Dostupnosť odborných kapacít významne ovplyvní nielen tempo dekarbonizácie, ale aj jej sociálnu spravodlivosť a regionálnu dostupnosť.

Príkladom systematického prístupu k rozvoju odborných zručností je spolupráca spoločnosti San Diego Gas & Electric s miestnymi vzdelávacími inštitúciami, zameraná na prípravu pracovníkov v oblastiach inštalácie fotovoltických systémov, elektrifikácie budov a energetickej efektívnosti. Osobitný dôraz sa pritom kladie na zapájanie nedostatočne zastúpených skupín obyvateľstva, čím sa podporuje inkluzívny charakter transformácie a vytvárajú sa predpoklady na spravodlivé rozdelenie jej ekonomických a spoločenských prínosov.

6 ANALÝZA DEKARBONIZAČNÝCH STRATÉGIÍ VYBRANÝCH EURÓPSKÝCH KRAJÍN V OBLASTI STAVEBNÝCH MATERIÁLOV

Analýza dekarbonizačných stratégií vybraných európskych krajín v oblasti stavebných materiálov ukazuje spoločný smer transformácie stavebného sektora založený na postupnom zavádzaní hodnotenia uhlíka počas celého životného cyklu stavebných výrobkov a budov (Whole Life Carbon), podpore nízkouhlíkových materiálov, princípoch obehového hospodárstva a digitalizácii environmentálnych údajov.

Francúzsko prostredníctvom environmentálnej regulácie RE2020 zaviedlo od roku 2022 povinné hodnotenie uhlíka počas celého životného cyklu nových budov a postupne sprísňuje limitné hodnoty zabudovaného uhlíka (lc construction). Napríklad pri rodinných domoch sa limit znižuje zo 640 kg CO_{2eq}/m² (2022) na 530 kg CO_{2eq}/m² (2025), 475 kg CO_{2eq}/m² (2028) a 415 kg CO_{2eq}/m² (2031), zatiaľ čo pri bytových budovách sa znižuje zo 740 na 650, 580 a 490 kg CO_{2eq}/m². Tento postupný systém motivuje projektantov a výrobcov k využívaniu stavebných materiálov s nižšou uhlíkovou stopou, optimalizácii materiálových riešení a rozvoju inovatívnych nízkouhlíkových technológií [1].

Dánsko ako prvá severská krajina zaviedlo od 1. januára 2023 povinné hodnotenie životného cyklu (LCA) pre všetky nové budovy, pričom budovy s podlahovou plochou nad 1 000 m² museli zároveň spĺňať limit uhlíkovej stopy 12 kg CO_{2eq}/m² /rok počas referenčného obdobia 50 rokov. Od 1. júla 2025 boli požiadavky významne sprísnené – limitné hodnoty sa rozšírili na väčšinu nových budov, zaviedli sa diferencované limity podľa typu budovy s priemernou hodnotou približne 7,1 kg CO_{2eq}/m²/rok a samostatný limit 1,5 kg CO_{2eq}/m²/rok pre emisie vznikajúce počas výstavby (fázy A4–A5). Tento prístup systematicky podporuje využívanie stavebných materiálov s nižšou uhlíkovou stopou a optimalizáciu návrhu budov už v počiatočných fázach projektovania [2].

Holandsko patrí medzi priekopníkov hodnotenia environmentálnych dopadov stavebných materiálov prostredníctvom národnej databázy LCA (Nationale Milieudatabase – NMD), ktorá obsahuje overené environmentálne údaje o stavebných výrobkoch a slúži ako základ pre výpočet environmentálnej výkonnosti budov. Od roku 2018 je pri nových obytných budovách a kancelárskych budovách väčších ako 100 m² povinné hodnotenie environmentálnej výkonnosti prostredníctvom indikátora MilieuPrestatie Gebouwen (MPG). Tento systém využíva údaje z environmentálnych produktových deklarácií (EPD) a metodiky LCA na podporu výberu stavebných materiálov s nižšími environmentálnymi dopadmi a predstavuje jeden z najrozvinutejších národných systémov hodnotenia udržateľnosti stavebných materiálov v Európe [3].

Fínsko vytvorilo národnú emisnú databázu CO2data.fi, ktorá obsahuje referenčné údaje o uhlíkovej stope stavebných výrobkov, stavebných procesov a energetických systémov. Databáza predstavuje základ pre hodnotenie uhlíkovej stopy budov počas celého životného cyklu a je súčasťou pripravovaného systému regulácie uhlíkovej stopy nových budov [4].

Švédsko zaviedlo od roku 2022 povinné klimatické deklarácie (Climate Declarations) pre nové budovy a na ich podporu vytvorilo národnú klimatickú databázu (Climate Database), ktorá poskytuje referenčné emisné faktory pre najčastejšie používané stavebné materiály. V ďalšej etape sa predpokladá zavedenie limitných hodnôt zabudovaného uhlíka pre nové budovy, pričom ich implementácia je plánovaná približne od roku 2027 [5].

Nórsko podporuje nízkouhlíkové stavebníctvo prostredníctvom klimatických rozpočtov a klimatických požiadaviek pri verejných stavebných projektoch, systematickej podpory využívania drevených konštrukcií vo viacpodlažných budovách, uplatňovania princípov obehového hospodárstva a rozvoja nízkoemisného verejného obstarávania. Významným

nástrojom je aj využívanie environmentálnych produktových deklarácií (EPD) a hodnotenia životného cyklu (LCA) pri navrhovaní a realizácii verejných stavieb [6].

Nemecko podporuje dekarbonizáciu stavebníctva prostredníctvom systému kvality QNG (Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude), programov Klimafreundlicher Neubau (KFN) a Klimafreundlicher Neubau im Niedrigpreissegment (KNN), ktoré podmieňujú verejnú finančnú podporu splnením požiadaviek na hodnotenie životného cyklu budov (LCA) a limitné hodnoty emisií skleníkových plynov. Súčasne podporuje výskum a inovácie zamerané na vývoj nízkouhlíkových stavebných materiálov, materiálovú efektívnosť, digitalizáciu stavebníctva a princípy obehového hospodárstva prostredníctvom federálnych výskumných programov a novozriadeného Federálneho centra pre výskum udržateľnej výstavby (Bundesforschungszentrum für klimaneutrales und ressourceneffizientes Bauen – BFZ) [7, 8, 9].

Česká republika spracovala národnú stratégiu Zero Carbon Roadmap – Cesta ku klimaticky neutrálnym budovám v ČR, ktorá navrhuje komplexný rámec dekarbonizácie stavebného sektora do roku 2050. V oblasti stavebných materiálov odporúča zavedenie hodnotenia Whole Life Carbon, vytvorenie národnej databázy zabudovaných emisií stavebných materiálov, systematickú podporu environmentálnych produktových deklarácií (EPD), prípravu dekarbonizačných plánov výrobcov, podporu nízkouhlíkových a recyklovaných stavebných materiálov prostredníctvom technických noriem, verejného obstarávania a dotačných programov, ako aj rozvoj výpočtových nástrojov LCA a výskumu v oblasti nízkouhlíkových stavebných technológií [10].

Maďarsko prostredníctvom Hungary Green Building Council spracovalo stratégiu *Hungary Zero Carbon Roadmap 2050*, ktorá predstavuje komplexný plán dekarbonizácie stavebného sektora počas celého životného cyklu budov. Roadmap odporúča zavedenie hodnotenia Whole Life Carbon, širšie využívanie metodiky LCA a environmentálnych produktových deklarácií (EPD), podporu nízkouhlíkových stavebných materiálov, princípov obehového hospodárstva, digitalizácie údajov a postupné začlenenie uhlíkových kritérií do projektovania, verejného obstarávania a stavebnej legislatívy [11].

Spoločným menovateľom týchto stratégií je postupný prechod od dobrovoľného vykazovania environmentálnych parametrov prostredníctvom LCA a EPD k záväzným požiadavkám na zabudovaný uhlík, podpore digitálnych nástrojov vrátane Digitálneho pasu stavebných výrobkov a cielenej podpore inovatívnych nízkouhlíkových materiálov. Tento prístup predstavuje vhodný model aj pre Slovenskú republiku pri tvorbe národnej stratégie dekarbonizácie stavebných materiálov.

Takmer všetky krajiny postupujú rovnakou postupnosťou, ktorá je dnes považovaná za "best practice":

- národná metodika LCA,
- národná databáza stavebných materiálov,
- EPD ako hlavný zdroj dát,
- povinné vykazovanie (reporting),
- stanovenie limitov Whole Life Carbon,
- sprísňovanie limitov približne každých 3–5 rokov,
- Digitálny pas stavebných výrobkov a digitalizácia údajov,
- prepojenie s verejným obstarávaním a financovaním.

Na rozdiel od viacerých európskych krajín, ako sú Česká republika, Maďarsko, Francúzsko či Dánsko, Slovenská republika zatiaľ nemá spracovanú národnú roadmapu dekarbonizácie

stavebníctva alebo stavebných materiálov založenú na princípoch Whole Life Carbon. Hoci existujú strategické dokumenty, ako je Nízkouhlíková stratégia rozvoja SR do roku 2030 s výhľadom do roku 2050 a Integrovaný národný energetický a klimatický plán, tieto dokumenty neriešia komplexne problematiku dekarbonizácie stavebných materiálov, hodnotenia zabudovaného uhlíka, environmentálnych produktových deklarácií (EPD), digitálnych pasov stavebných výrobkov ani princípov cirkulárnej ekonomiky v rozsahu, ktorý je dnes uplatňovaný v najvyspelejších európskych krajinách. Z tohto dôvodu môžu výsledky predkladanej publikácie predstavovať odborný základ pre prípravu budúcej národnej stratégie dekarbonizácie stavebných materiálov na Slovensku.

Na základe výsledkov prezentovaných v tejto publikácii a analýzy zahraničných prístupov možno pre Slovenskú republiku formulovať nasledujúce strategické odporúčania v oblasti dekarbonizácie stavebných materiálov:

1. Pripraviť podmienky na implementáciu Digitálneho pasu stavebných výrobkov a hodnotenia Whole Life Carbon.

Slovenská republika by mala vytvoriť odborné, technické a legislatívne podmienky na implementáciu Digitálneho pasu stavebných výrobkov (Digital Product Passport – DPP) podľa Nariadenia (EÚ) 2024/3110. Súčasťou tejto prípravy by mala byť harmonizácia metodiky hodnotenia životného cyklu podľa EN 15804 a EN 15978, prepojenie údajov s BIM modelmi a zavedenie hodnotenia Whole Life Carbon pri navrhovaní a povoľovaní stavieb. Slovenská republika disponuje významným odborným potenciálom aj v oblasti digitalizácie environmentálnych údajov o stavebných výrobkoch. Príkladom je medzinárodná platforma EPDsquare, vyvinutá na Slovensku, ktorá predstavuje jeden z etablovaných systémov registrácie a publikovania environmentálnych vyhlásení o produkte. Skúsenosti získané pri jej budovaní a prevádzke môžu významne podporiť implementáciu Digitálneho pasu stavebných výrobkov podľa nového Nariadenia CPR a vytvoriť predpoklady pre efektívne zapojenie slovenských výrobcov do pripravovaného európskeho digitálneho ekosystému.

2. Prioritizovať dekarbonizáciu stavebných materiálov podľa ich potenciálu znižovania emisií

Stratégia dekarbonizácie stavebných materiálov na Slovensku by mala vychádzať z princípu prioritizácie jednotlivých materiálových tokov podľa ich príspevku k emisiám skleníkových plynov a podľa technického potenciálu ich znižovania. Výsledky tejto publikácie potvrdzujú, že rozhodujúci význam majú najmä cement, betón, oceľ a hliník, ktoré predstavujú materiály s najvyššou uhlíkovou náročnosťou výroby, zatiaľ čo pri kamenive, tehliach, skle, plastoch a dreve zohrávajú významnejšiu úlohu optimalizácia výrobných procesov, zvyšovanie materiálovej efektívnosti a princípy obehového hospodárstva.

V prípade cementu a betónu by mala stratégia podporovať najmä znižovanie podielu portlandského slínku, širšie využívanie doplnkových cementárskych materiálov (SCM), implementáciu technológií zachytávania, využívania a ukladania oxidu uhličitého (CCUS), karbonatáciu betónu, využívanie alternatívnych palív a elektrifikáciu výrobných procesov. Pri výrobe ocele je potrebné vytvárať podmienky na zvyšovanie podielu recyklovaného oceľového šrotu, rozvoj elektrických oblúkových pecí, využívanie nízkouhlíkovej elektriny a postupné zavádzanie technológií využívajúcich obnoviteľný vodík. V prípade hliníka predstavujú hlavné priority zvyšovanie miery recyklácie, efektívna separácia zliatin, dekarbonizácia dodávok elektrickej energie a implementácia nízkoemisných výrobných technológií.

Pri ostatných stavebných materiáloch by sa stratégia mala zamerať predovšetkým na znižovanie spotreby primárnych surovín, rozvoj regionálnych dodávateľských reťazcov, podporu recyklácie, efektívnejšie využívanie vedľajších produktov priemyslu a využívanie alternatívnych materiálov vrátane recyklovaných stavebných hmôt a dnových sedimentov. Významným opatrením je tiež podpora dreva ako obnoviteľného konštrukčného materiálu pri súčasnom zabezpečení princípov udržateľného obhospodarovania lesov.

3. Podporovať udržateľný výber stavebných materiálov na základe hodnotenia ich environmentálnych vlastností počas celého životného cyklu.

Pri rozhodovaní o výbere stavebných materiálov by sa popri ekonomických kritériách mali systematicky zohľadňovať aj environmentálne aspekty, predovšetkým uhlíková stopa počas celého životného cyklu. V prípade cementov a betónov je potrebné podporovať využívanie cementov s nižším obsahom slinku, alternatívnych spojív, doplnkových cementárskych materiálov (SCM), recyklovaných zložiek betónu a technológií zachytávania a využívania CO₂. Pri výrobe ocele by sa stratégia mala zamerať na zvyšovanie podielu recyklovaného oceľového šrotu, využívanie elektrických oblúkových pecí, nízkouhlíkovej elektriny a postupnú implementáciu vodíkových technológií. Výsledky publikácie zároveň potvrdzujú, že pri kamenive predstavuje dominantný zdroj emisií doprava, preto je vhodné podporovať regionálne zdroje surovín, efektívnejšiu logistiku, železničnú dopravu a využívanie recyklovaného kameniva. Pri tehľách, skle a plastoch by sa stratégia mala zamerať na zvyšovanie podielu recyklovaných surovín, zvyšovanie energetickej efektívnosti a elektrifikáciu výrobných procesov. V prípade dreva je potrebné podporovať jeho efektívne a dlhodobé využívanie v stavebníctve pri súčasnom zabezpečení udržateľného obhospodarovania lesov.

4. Podporovať integrovanú dekarbonizáciu energeticky náročných výrobných procesov.

Stratégia dekarbonizácie stavebných materiálov by mala byť založená na kombinácii vzájomne sa dopĺňajúcich opatrení, keďže jednotlivé technológie samostatne neumožnia dosiahnuť klimatickú neutralitu. V prípade cementárskeho, hutníckeho a hliníkárskeho priemyslu je potrebné podporovať elektrifikáciu výrobných procesov tam, kde je technicky realizovateľná, využívanie nízkouhlíkovej elektriny z obnoviteľných zdrojov, zvyšovanie energetickej efektívnosti vrátane rekuperácie odpadového tepla a postupné zavádzanie technológií zachytávania, využívania a ukladania oxidu uhličitého (CCUS). Tento prístup je v súlade s odporúčaniami Medzinárodnej energetickej agentúry (IEA), ktorá vo svojich sektorových technologických mapách (Technology Roadmaps) a iniciatíve Breakthrough Agenda identifikuje elektrifikáciu, dekarbonizáciu dodávok elektrickej energie, materiálovú efektívnosť, obehové hospodárstvo a technológie CCUS ako kľúčové piliere transformácie energeticky náročných priemyselných odvetví do roku 2050.

5. Posilniť uplatňovanie princípov obehového hospodárstva v stavebníctve.

Výsledky publikácie potvrdzujú význam využívania druhotných surovín, recyklovaných stavebných materiálov a dnových sedimentov ako perspektívnych zdrojov pre nízkouhlíkové stavebníctvo. Stratégia Slovenskej republiky by preto mala podporovať selektívnu demoláciu stavieb, zvyšovanie kvality triedenia stavebného a demolačného odpadu, rozvoj trhu s recyklovanými stavebnými materiálmi a materiálové zhodnocovanie vhodných odpadových tokov vrátane dnových sedimentov tam, kde je ich využitie technicky, environmentálne a zdravotne bezpečné. Takýto prístup prispeje k znižovaniu spotreby primárnych prírodných zdrojov, obmedzeniu emisií spojených s ich ťažbou a dopravou a zároveň podporí materiálovú efektívnosť a cirkulárnu ekonomiku v stavebnom sektore.

6. Posilniť prepojenie výskumu, inovácií, vzdelávania a aplikačnej praxe.

Úspešná dekarbonizácia stavebného sektora si vyžaduje systematickú spoluprácu medzi výskumnými organizáciami, univerzitami, výrobcami stavebných materiálov, projektantmi, zhotoviteľmi stavieb a verejnou správou. Stratégia Slovenskej republiky by mala podporovať aplikovaný výskum a pilotné projekty zamerané na overovanie nízkouhlíkových materiálov a technológií, rozvoj metodík LCA a ich integráciu do BIM a digitálneho stavebníctva, ako aj vzdelávanie odborníkov v oblasti udržateľného navrhovania a hodnotenia životného cyklu stavieb. Súčasne je potrebné vytvárať podmienky na efektívny prenos výsledkov výskumu do stavebnej praxe a ich implementáciu do technických predpisov, noriem a verejného obstarávania.

Literatúra:

1. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/reglementation-environnementale-re2020>
2. Nordic Sustainable Construction. Danish Political Agreement Tightens the Limit Values for New Buildings and Extends the Impact. 2024. Dostupné na: <https://www.nordicsustainableconstruction.com/news/2024/june/tillaegsaftale-paa-engelsk>
3. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). Berekening Milieuprestatie Gebouwen (MPG). Dostupné na: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-en-regels-gebouwen/milieuprestatie-gebouwen-mpg>
4. Finnish Environment Institute (SYKE). CO2data.fi – National Emissions Database. <https://co2data.fi/>
5. Boverket. Climate Declarations for Buildings (Klimatdeklaration). <https://www.boverket.se/en/start/building-in-sweden/developer/climate-declarations/>
6. Norwegian Directorate for Public Construction and Property (Statsbygg). Climate Budget in State Building Projects.
7. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). *Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG)*. <https://www.qng.info/>
8. Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). *Klimafreundlicher Neubau (KFN)*. <https://www.kfw.de/>
9. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). *Bundesforschungszentrum für klimaneutrales und ressourceneffizientes Bauen (BFZ)*. <https://www.bmwsb.bund.de/>
10. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. 2024. Představení Zero Carbon Roadmap udržitelného stavebnictví. Dostupné na: <https://mpo.gov.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/strategicke-dokumenty-pro-udrzitelne-stavebnictvi/predstaveni-zero-carbon-roadmap-udrzitelneho-stavebnictvi--279905/>
11. Hungary Green Building Council (HuGBC). Hungary Zero Carbon Roadmap 2050. Budapest, 2025

7 ZÁVER

Predložená publikácia poskytuje komplexný pohľad na problematiku dekarbonizácie stavebných materiálov ako jednej z rozhodujúcich podmienok transformácie stavebného sektora smerom ku klimatickej neutralite. Výsledky spracované v jednotlivých kapitolách potvrdzujú, že dekarbonizáciu stavebníctva nemožno smerovať iba na znižovanie energetickej náročnosti prevádzky budov. S postupnou dekarbonizáciou energetiky rastie význam tzv. zabudovaného uhlíka (embodied carbon), ktorý vzniká počas ťažby surovín, výroby stavebných materiálov, dopravy, výstavby, údržby a ukončenia životnosti stavebných objektov. Preto bude výber stavebných materiálov a optimalizácia ich životného cyklu jedným z rozhodujúcich faktorov úspešného dosiahnutia klimatickej neutrality do roku 2050. Publikácia zároveň potvrdzuje, že budovy a stavebníctvo sa podieľajú približne 40% na globálnych emisiách CO₂ spojených s využívaním energie, pričom približne 70% predstavujú prevádzkové emisie a už približne 30% tvoria zabudované emisie, ktorých význam bude v budúcnosti ďalej narastať. Na dosiahnutie cieľov Parížskej dohody bude potrebné znížiť emisie stavebného sektora približne o polovicu do roku 2030 a dosiahnuť uhlíkovú neutralitu do roku 2050.

Významným prínosom publikácie je systematické spracovanie metodických prístupov hodnotenia environmentálnych vplyvov stavebných materiálov. Zdôraznená je potreba uplatňovania medzinárodných noriem ISO 14040, ISO 14044, ISO 14067 a EN 15804 pri hodnotení uhlíkovej stopy stavebných výrobkov. Publikácia zároveň poukazuje na rastúci význam digitálnych nástrojov LCA, BIM prostredia a environmentálnych vyhlásení o produkte (EPD), ktoré predstavujú základ transparentného porovnávania stavebných výrobkov a budú nevyhnutnou súčasťou pripravovaných legislatívnych požiadaviek Európskej únie na hodnotenie celého životného cyklu stavieb.

Rozsiahla **analýza kľúčových stavebných materiálov** potvrdila, že potenciál dekarbonizácie jednotlivých odvetví je veľmi rozdielny a závisí od technologických možností výroby, energetického mixu, úrovne recyklácie aj dostupnosti alternatívnych surovín. Cement a betón zostávajú dominantným zdrojom emisií stavebníctva, pričom samotná výroba cementu predstavuje približne 7% - 8% svetových emisií CO₂. Analýza zároveň ukázala, že samotné opatrenia energetickej efektívnosti môžu znížiť emisie cementárskeho priemyslu iba približne o 4% - 8%, keďže podstatná časť emisií vzniká priamo počas kalcinácie slinku. Významný potenciál preto predstavuje kombinácia znižovania obsahu slinku, využívania alternatívnych spojív, karbonatácie betónu, zachytávania a využívania CO₂ (CCUS), digitalizácie výroby a efektívnejšieho využívania odpadového tepla, pričom približne 35% - 40% energie dodanej do výroby cementu sa dnes stráca vo forme nevyužitého tepla.

Publikácia prináša aj rozsiahle spracovanie environmentálnych vyhlásení o produkte pre jednotlivé skupiny stavebných materiálov. Prínosom je analýza približne 80 EPD **kamenív** z rôznych krajín, ktorá umožnila porovnať hodnoty indikátora GWP-GHG a identifikovať hlavné faktory ovplyvňujúce uhlíkovú stopu kameniva. Priemerná hodnota GWP-GHG dosiahla 2,88 kg CO_{2eq}/t, pričom dominantným zdrojom emisií sa ukázala doprava materiálu, nasledovaná procesmi ťažby a spracovania. Výsledky jednoznačne potvrdzujú význam regionálnych dodávateľských reťazcov, optimalizácie logistiky a zvyšovania podielu recyklovaného kameniva ako efektívnych opatrení na znižovanie emisií stavebníctva.

Spracovanie a vyhodnotenie 365 EPD **cementov**, ktoré poskytlo obraz o uhlíkovej náročnosti výroby cementu v medzinárodnom kontexte. Priemerná hodnota indikátora GWP-GHG dosiahla 693 kg CO_{2eq}/t, pričom rozsah hodnôt od približne 290 do 1 363 kg CO_{2eq}/t poukazuje na výrazný vplyv výrobnej technológie, energetického mixu, podielu slinku a využívania cementových prímiesí. Výsledky zároveň potvrdzujú, že znižovanie obsahu slinku prostredníctvom využitia vysokopečnej trosky alebo vápenca predstavuje jeden z kľúčových prístupov k dekarbonizácii výroby cementu, pričom jeho účinnosť závisí od typu náhradného materiálu, miery substitúcie a jeho dostupnosti. Ďalšie významné opatrenia zahŕňajú

využívanie alternatívnych palív, zvyšovanie energetickej efektívnosti výroby a technológie zachytávania, využitia alebo ukladania CO₂ (CCUS)..

Analýza EPD **betónov** preukázala, že priemerná hodnota GWP-GHG predstavuje 232 kg CO_{2eq}/m³, pričom rozhodujúcim faktorom uhlíkovej stopy zostáva množstvo a typ použitého cementu. Výsledky poukazujú na význam optimalizácie receptúr betónov, využívania nízkoslinkových cementov, minerálnych prímiesí a recyklovaných zložiek, ktoré umožňujú významne znížiť zabudovaný uhlík bez negatívneho ovplyvnenia požadovaných technických vlastností betónových konštrukcií.

Publikácia prináša rozsiahlu analýzu 678 EPD **oceľových výrobkov**, ktorá potvrdila, že oceľ patrí medzi materiály s najvyššou uhlíkovou stopou v stavebníctve. Priemerná hodnota indikátora GWP-GHG dosiahla 2061 kg CO_{2eq}/t, pričom rozhodujúci podiel environmentálnych dopadov je spojený s energeticky náročnou primárnou výrobou. Výsledky zdôrazňujú význam zvyšovania podielu recyklovaného oceľového šrotu, rozvoja elektrických oblúkových pecí, elektrifikácie výroby a využívania nízkouhlíkových zdrojov energie ako základných pilierov dekarbonizácie hutníckeho priemyslu.

Významným prínosom je vyhodnotenie aj 250 EPD **hliníkových výrobkov**, ktoré dokumentuje vysokú variabilitu environmentálnych parametrov hliníka v závislosti od podielu recyklovaného materiálu, energetického mixu a použitej výrobnéj technológie. Priemerná hodnota GWP-GHG dosiahla 6,72 kg CO_{2eq}/kg, pričom analyzované údaje potvrdili mimoriadny význam recyklácie hliníka, dekarbonizácie výroby elektrickej energie, elektrifikácie procesov a zavádzania technológií CCUS pre budúce znížovanie emisií tohto strategického stavebného

Analýza výroby stavebného **skla** potvrdila, že rozhodujúcimi faktormi jeho uhlíkovej stopy sú vysokoteplotné tavné procesy, spotreba energie a podiel recyklovaného skla vo vstupných surovinách. Výsledky poukazujú na význam elektrifikácie sklárskych pecí, využívania obnoviteľných zdrojov energie a zvyšovania podielu sklárskych črepov ako hlavných nástrojov znížovania emisií a energetickej náročnosti sklárskeho priemyslu.

Vyhodnotenie uhlíkovej stopy výroby **pálených tehál** na Slovensku preukázalo priemernú hodnotu 81,7 kg CO_{2eq}/t, pričom rozdiely medzi jednotlivými výrobkami sú spôsobené najmä technologickými podmienkami výpalu a energetickou náročnosťou výroby. Výsledky zároveň ukázali vysoký potenciál elektrifikácie výrobných procesov, keď modelové scenáre predpokladajú zníženie emisií až o 90,8% do roku 2030 a 95,4% do roku 2050 pri dekarbonizovanom energetickom mixe.

Publikácia zahŕňa analýzu 80 EPD **plastových výrobkov**, ktorá potvrdila výraznú variabilitu uhlíkovej stopy plastov v závislosti od typu polyméru, podielu recyklovaného materiálu, energetického mixu a výrobných technológií. Priemerná hodnota indikátora GWP-GHG dosiahla 3,48 kg CO_{2eq}/kg, pričom výsledky jednoznačne potvrdzujú, že rozvoj recyklácie plastov, znížovanie spotreby primárnych polymérov a efektívnejšie materiálové toky predstavujú kľúčové opatrenia na dekarbonizáciu plastových výrobkov používaných v stavebníctve.

Analýza **drevených materiálov** potvrdila ich výnimočné postavenie medzi stavebnými materiálmi z hľadiska dekarbonizácie, keďže drevo počas svojho rastu viaže atmosférický uhlík a umožňuje jeho dlhodobé ukladanie v stavebných konštrukciách. Výsledky zároveň poukazujú na význam udržateľného lesného hospodárstva, efektívneho spracovania dreva, predlžovania životnosti drevených výrobkov a ich opätovného materiálového využitia ako základných predpokladov ďalšieho znížovania uhlíkovej stopy stavebníctva.

Samostatnú časť publikácie tvorí hodnotenie **dekarbonizačných možností** výroby ocele, hliníka, skla, tehál, plastov a dreva. Vo všetkých prípadoch bolo potvrdené, že najvyšší potenciál znížovania emisií spočíva v kombinácii elektrifikácie výrobných procesov, využívania

obnoviteľných zdrojov energie, rozvoja recyklácie, zvyšovania materiálovej efektívnosti a uplatňovania princípov cirkulárnej ekonomiky. Významnú úlohu budú zohrávať aj nové technológie, ako sú zelený vodík, CCUS, digitálne dvojčatá výrobných procesov, inteligentné riadenie výroby a rozvoj trhu s nízkouhlíkovými stavebnými materiálmi. Súčasne sa ukazuje, že technologické opatrenia musia byť sprevádzané vhodnými regulačnými nástrojmi, environmentálnym oceňovaním uhlíka a podporou výskumu a inovácií.

Významným vedeckým prínosom publikácie sú výsledky vlastného experimentálneho výskumu zameraného na **vývoj inovatívnych nízkouhlíkových stavebných materiálov**. Experimentálne overovanie **ľahkých stavebných hmôt na báze recyklovaných surovín** preukázalo možnosť výroby materiálov s objemovou hmotnosťou nižšou ako 2000 kg/m³ pri zachovaní pevností porovnateľných s bežnými betónmi. Dosiahnuté výsledky zároveň potvrdili priaznivý vplyv využitia recyklovaných materiálov na štruktúru kompozitov a ich potenciál pre výrobu ľahkých stavebných prvkov.

Analýza využitia **dnových sedimentov** ako alternatívnej suroviny pre stavebníctvo ukázala, že sedimenty predstavujú nielen riešenie environmentálnych problémov spojených so zanášaním vodných nádrží, ale zároveň významný sekundárny zdroj materiálov. Výsledky potvrdili, že využitie sedimentov ako náhrady cementu predstavuje efektívnejší nástroj na znižovanie uhlíkovej stopy betónu, zatiaľ čo ich využitie ako náhrady kameniva prináša významné prínosy predovšetkým z pohľadu ochrany prírodných zdrojov, obmedzenia ťažby kameniva, riešenia globálnej pieskovej krízy a podpory princípov cirkulárnej ekonomiky. Takýto prístup predstavuje synergické riešenie environmentálnych, ekonomických aj klimatických výziev súčasného stavebníctva.

Výsledky prezentované v publikácii zároveň potvrdzujú, že budúca transformácia stavebníctva nebude založená na jednom technologickom riešení, ale na vzájomne prepojenom systéme opatrení zahŕňajúcom hodnotenie uhlíkovej stopy počas celého životného cyklu stavieb (Whole Life Carbon), rozvoj nízkouhlíkových materiálov, elektrifikáciu výroby, efektívne využívanie druhotných surovín, digitalizáciu stavebníctva, rozvoj cirkulárnej ekonomiky, podporu výskumu a vytváranie nových odborných kompetencií. Práve synergické pôsobenie týchto opatrení predstavuje realistickú cestu k dosiahnutiu klimatickej neutrality stavebného sektora.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY