



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 5. Publikácia - prevádzka budovy

k projektu s názvom „Výskum a inovácie pre dekarbonizáciu stavebnej činnosti prostredníctvom nízkoemisných stavebných procesov a materiálov v cirkulárnej ekonomike“
v rámci pracovného balíka KPB3 s názvom Prevádzka budov

PREVÁDZKA BUDOVY

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 ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Obsah

1.	Dekarbonizácia prevádzky budov - súčasný stav poznatkov	10
1.1	Zastavané prostredie	10
1.2	Uhlíková stopa (Carbon footprint).....	10
1.3	Definícia budov s nulovými emisiami uhlíka v prevádzke	12
1.3.1	<i>Definícia čistého nulového stavu v prevádzke</i>	<i>12</i>
1.3.2	<i>Definícia nulových emisií v prevádzke</i>	<i>14</i>
1.3.3	<i>Definícia čistého nulového stavu v prevádzke</i>	<i>19</i>
1.3.4	Definícia nulových emisií v prevádzke.....	21
2.	Posudzovanie nulových čistých emisií	24
3.	Dosiahnutie nulových emisií	27
3.1	Projektovanie a výstavba	27
3.1.1	Stručný popis	28
3.1.2	Proces návrhu	28
3.1.3	Digitálna stratégia.....	28
3.1.4	Stavba a uvedenie do prevádzky	28
3.1.5	Odobzovanie a vybavenie.....	29
3.2	Odobzovanie a prevádzka (Handover and operation).....	29
3.2.1	Obstarávanie správcov budov	29
3.2.2	Lízing.....	30
3.2.3	Optimalizácia budov	30
4.	Obstarávanie obnoviteľnej energie s nulovými emisiami uhlíka.....	32
5.	Kompenzácia uhlíka (Carbon offsetting)	34
6.	Prehľad pokroku v jednotlivých regiónoch.....	36
6.1	Prechod na nulové emisie uhlíka v prevádzke – ponuka a dopyt	36
6.2	Prechod na nulové čisté emisie uhlíka v praxi – ponuka a dopyt	37
7.	Prehľad dostupných technológií pre budovy s nulovými emisiami uhlíka a energetickou bilanciou.....	39

7.1	Obnoviteľné zdroje energie.....	39
7.2	Skladovanie energie.....	42
7.3	Kategorizácia budov podľa energetickej náročnosti a jej výpočet	44
8.	Prípadové štúdie.....	47
8.1	Kvantifikácia prevádzkových GHG emisií administratívnych budov – porovnanie biosolárnej strechy s konvenčnou strechou.....	47
8.1.1	Metodika	47
8.1.2	Výsledky a diskusia	50
8.1.3	Analýza scenárov.....	52
8.1.4	Záver	54
8.2	Porovnanie vypočítanej a skutočnej spotreby energie v budovách v kontexte analýzy životného cyklu	56
8.2.1	Materiály a metódy	56
8.2.2	Štatistická analýza	61
8.2.3	Inventarizačná analýza životného cyklu	63
8.2.4	Posúdenie vplyvu počas životného cyklu	65
8.2.5	Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov LCA	66
8.2.6	Hodnotenie vplyvu dodávateľského reťazca na biodiverzitu	70
8.2.7	Cirkularita materiálov	72
8.2.8	Komplexné vyhodnotenie ekonomických indikátorov LCC	74
8.2.9	Multikriteriálna analýza	76
8.2.10	Metodika a vývoj emisných faktorov GWP pre výrobu elektriny a tepla v SR (scenár REF2020) 79	
8.2.11	Diskusia a záver	80
9.	Kvantifikácia CO ₂ e pre spotrebu energie za jednotlivé roky pre mesto Košice	88

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Odhadované rozdelenie emisii uhlíka podľa fázy životného cyklu budovy (Zo správy WBCSD z roku 2021 Buildings Net Zero: Where Do We Stand?)	11
Obr. 2 Podiel budov na celosvetových emisiách z energie a procesov v roku 2021 (Zo správy Global Status Report pre budovy a stavebníctvo (Buildings-GSR) za rok 2022, ktorú vypracovala Globálna aliancia pre budovy a stavebníctvo (GlobalABC) pod gesciou Programu OSN pre životné prostredie (UNEP)	11
Obr. 3 Rovnováha uhlíka počas životného cyklu.....	12
Obr. 4 Integrovaný plán prechodu na ekonomiku s nulovými čistými emisiami.....	15
Obr. 5 Trajektória CRREM 2023 pre administratívne budovy	17
Obr. 6 Globálne legislatívne rámce	20
Obr. 7 Vládne nelegislatívne opatrenia – súčasné a budúce	22
Obr. 8 Priemyselné organizácie – normy a budúce trendy.....	23
Obr. 9 Vzorové porovnanie medzinárodných certifikácií nulových čistých emisií	24
Obr. 10 Systémy hodnotenia čistých emisií	25
Obr. 11 Navrhovací štandard	26
Obr. 12 Prehľad o stave prechodu budov na nulové emisie uhlíka z hľadiska dopytu aj ponuky .	36
Obr. 13 Ilustrácia domu s obnoviteľnými zdrojmi energie	39
Obr. 14 Hranice systému zahrnuté do analýzy LCA	48
Obr. 15 Pohľady na vybrané administratívne budovy	49
Obr. 16 Výsledky v percentách pre ukazovatele GWP	51
Obr. 17 Vplyv zmeny životnosti budov na GWP-fosílny	53
Obr. 18 Vplyv zmeny životnosti budov na GWP-biogénny.....	54
Obr. 19 Hranice systému životného cyklu (A1–D) posudzovaných budov	59
Obr. 20 Hranice systému pre náklady životného cyklu (A0–C4) posudzovaných budov	59
Obr. 21 Výsledky LCA hodnotených budov	70
Obr. 22 Výsledky pre klimatickú zmenu hodnotených budov	72
Obr. 23 Výsledky cirkularity hodnotených budov.....	73
Obr. 24 Výsledky LCC hodnotených budov	75
Obr. 25 Výsledky GWP hodnotených budov po zohľadnení emisného faktora podľa REF2020 ...	80
Obr. 26 Emisie CO ₂ e pre administratívno-kancelárske činnosti	90
Obr. 27 Emisie CO ₂ e pre obytné budovy	90
Obr. 28 Emisie CO ₂ e pre školstvo	90
Obr. 29 Emisie CO ₂ e pre verejnú správu	91

Obr. 30 Emisie CO ₂ e pre maloobchod	91
Obr. 31 Emisie CO ₂ e pre veľkoobchod	91
Obr. 32 Emisie CO ₂ e pre hotely a ubytovanie	92
Obr. 33 Emisie CO ₂ e pre sociálnu starostlivosť a sociálne služby	92
Obr. 34 Emisie CO ₂ e pre zdravotníctvo	92
Obr. 35 Emisie CO ₂ e pre stravovanie	93
Obr. 36 Emisie CO ₂ e pre poštové služby	93
Obr. 37 Emisie CO ₂ e pre služby kadernícke, pohrebné, tlač, médiá a iné	93
Obr. 38 Emisie CO ₂ e pre architektonické a geodetické inžinierstvo	94
Obr. 39 Emisie CO ₂ e pre výstavbu a projektovanie budov	94
Obr. 40 Emisie CO ₂ e pre stavebné práce – ostatné	94
Obr. 41 Emisie CO ₂ e pre výrobu kovových, drevených a iných výrobkov	95
Obr. 42 Emisie CO ₂ e pre telekomunikácie	95
Obr. 43 Emisie CO ₂ e pre pozemnú dopravu	95
Obr. 44 Emisie CO ₂ e pre nakladanie s odpadom	96
Obr. 45 Emisie CO ₂ e pre iné odvetvia	96
Obr. 46 Podiel emisií CO ₂ e v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2019	97
Obr. 47 Podiel emisií CO ₂ e v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2020	98
Obr. 48 Podiel emisií CO ₂ e v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2021	99
Obr. 49 Podiel emisií CO ₂ e v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2022	100
Obr. 50 Podiel emisií CO ₂ e v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2023	101
Obr. 51 Podiel odvetví na emisiách CO ₂ e v sledovanom období	104

Zoznam tabuliek

Tab. 1 SWOT analýza technológií obnoviteľných zdrojov energie.....	41
Tab. 2 Materiály použité v administratívnych budovách.....	49
Tab. 3 Výsledky indikátorov vplyvov na 1 m ² podlahovej plochy	50
Tab. 4 Kľúčové charakteristiky prevádzkovej energie hodnotených administratívnych budov	64
Tab. 5 Pohľady na hodnotené administratívne budovy.....	64
Tab. 6 Výsledky MCA pre navrhované scenáre	78
Tab. 7 Emisie CO ₂ e za jednotlivé roky	88
Tab. 8 Podiel odvetvia „Výroba kovových, drevených, elektrotechnických, plastových a iných výrobkov“ na celkových dopadoch	101

Zoznam skratiek

ADP-E	Abiotic Depletion Potential of Elements	Potenciál abiotického vyčerpania nefosílnych zdrojov (prvkov)
ADP-FF	Abiotic Depletion Potential of Fossil Fuels	Potenciál abiotického vyčerpania fosílnych palív
AP	Acidification Potential	Potenciál okysľovania (acidifikácie)
CDA	Concordance Discordance Analysis	Analýza zhody a nezhody (metóda MCA)
CE	Circular Economy	Obehové hospodárstvo / Cirkulárna ekonomika
CML	Centre of Environmental Science	Centrum environmentálnych vied
CO ₂	Carbon Dioxide	Oxid uhličitý
CO ₂ e	Carbon Dioxide equivalent	Ekvivalent oxidu uhličitého (CO ₂ -ekv.)
EP	Eutrophication Potential	Potenciál eutrofizácie (obohacovania vôd o živiny)
EP-AF	Eutrophication Potential of Aquatic Freshwater	Potenciál eutrofizácie sladkovodných ekosystémov
EP-AM	Eutrophication Potential of Aquamarine	Potenciál eutrofizácie morských ekosystémov
EP-T	Eutrophication Potential Terrestrial	Potenciál eutrofizácie suchozemských ekosystémov
EPS	Expanded Polystyrene	Expandovaný (penový) polystyrén
EoL	End of Life	Koniec životného cyklu / Koniec životnosti
EPD	Environmental Product Declarations	Environmentálne vyhlásenie o produkte
FU	Functional unit	Funkčná jednotka
GHG	Greenhouse Gas	Skleníkové plyny
GWP	Global Warming Potential	Potenciál globálneho otepľovania
GWP-bio	Global Warming Potential Biogenic	Biogénny potenciál globálneho otepľovania
GWP-fosílny	Global Warming Potential Fossil	Fosílny potenciál globálneho otepľovania
GWP-LULUC	Global Warming Potential Land Use and Land Use Change	Potenciál globálneho otepľovania z využívania a zmeny využívania pôdy
GWP-celkový	Global Warming Potential Total	Celkový potenciál globálneho otepľovania
LCA	Life Cycle Assessment	Posudzovanie / Analýza životného cyklu
LCI	Life Cycle Inventory	Inventarizačná analýza životného cyklu (zber dát)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment	Hodnotenie vplyvov na životné prostredie v rámci LCA
LCC	Life Cycle Cost	Náklady životného cyklu / Analýza nákladov životného cyklu
MCA	Multicriterial Analysis	Viackriteriálna analýza
OCL	OneClickLCA	Špecializovaný softvér One Click LCA
ODP	Ozone Depletion Potential	Potenciál poškodzovania ozónovej vrstvy
PE	Polyethylene	Polyetylén
PEF	Environmental Footprint of the Product	Environmentálna stopa produktu
PIR	Polyisocyanurate foam	Polyizokyanurátová pena (izolačný materiál)

POCP	Photochemical Ozone Creation Potential	Potenciál tvorby fotochemického (troposférického) ozónu
R	Thermal resistance	Tepelný odpor
RN	Thermal resistance standard	Normová (požadovaná) hodnota tepelného odporu
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution	Metóda poradia preferencií podľa podobnosti s ideálnym riešením
U	Heat transfer coefficient	Súčiniteľ prechodu tepla
UN	Heat transfer coefficient standard	Normová (požadovaná) hodnota súčiniteľa prechodu tepla
UNEP	UN Environment Programme	Program OSN pre životné prostredie
US EPA	United States Environmental Protection Agency	Agentúra na ochranu životného prostredia USA
WD	Water Deprivation	Nedostatok vody / Vyčerpávanie vodných zdrojov
WSA	Weighted Sum Model (Approach)	Metóda váženého sumára
XPS	Extruded Polystyrene	Extrudovaný polystyrén

1. Dekarbonizácia prevádzky budov - súčasný stav poznatkov

Rastúce environmentálne výzvy a legislatívne záväzky EÚ zvyšujú tlak na znižovanie uhlíkovej stopy budov počas celého životného cyklu. Keďže budovy významne prispievajú k spotrebe energie a emisiám skleníkových plynov, je potrebné hodnotiť ich udržateľnosť komplexne – nielen z pohľadu prevádzky, ale aj výroby, údržby a likvidácie stavebných prvkov.

1.1 Zastavané prostredie

Celkový prechod na nulové emisie v prevádzke si vyžaduje pokrok na úrovni budov (strana dopytu) – odstránenie fosílnych palív a podstatné zlepšenie energetickej účinnosti – ako aj na úrovni infraštruktúry (strana ponuky) – rýchla dekarbonizácia výroby energie rozšírením kapacity obnoviteľných zdrojov. Pre mnohé organizácie sú budovy významnou súčasťou ich priamej uhlíkovej stopy. Preto prechod budov na nulovú uhlíkovú stopu zohráva dôležitú úlohu v pláne prechodu celých podnikov na uhlíkovo neutrálné podniky.

1.2 Uhlíková stopa (Carbon footprint)

„Emisie CO₂ z prevádzky budov dosiahli historické maximum okolo 10 GtCO₂, čo predstavuje približne 5-percentný nárast oproti roku 2020 a o 2 percentá viac ako predchádzajúci vrchol v roku 2019.“

Globálny kontext – zastavané prostredie

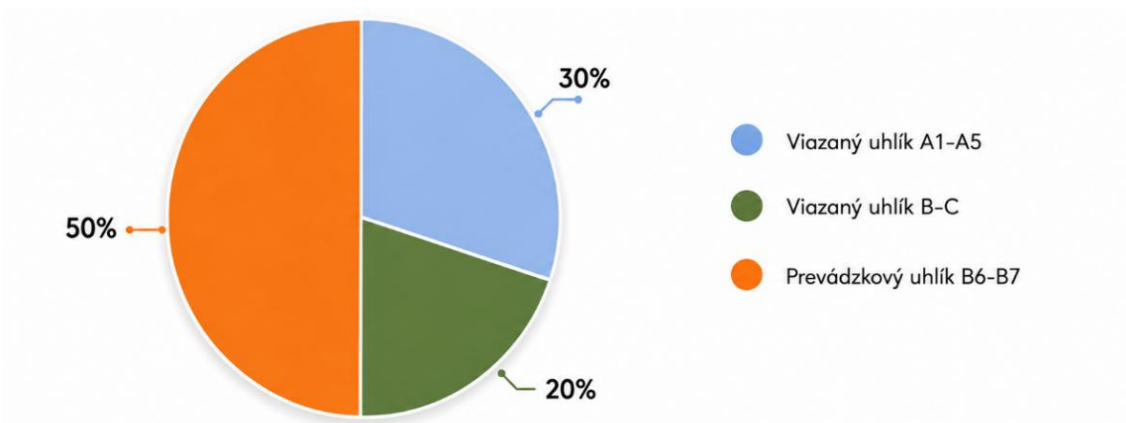
Cieľom dekarbonizačných trajektórií, ktoré sú v súlade s Parížskou dohodou o 1,5 °C, je znížiť globálne emisie uhlíka na polovicu do roku 2030 a dosiahnuť nulové emisie do roku 2050. Marrákešské partnerstvo pre globálne opatrenia v oblasti klímy, podporované Organizáciou Spojených národov, zverejnilo plán opatrení v oblasti klímy, ktorý odráža potrebu znížiť emisie v zastavanom prostredí na polovicu do roku 2030.⁸ Na dosiahnutie týchto náročných cieľov do roku 2030 je nevyhnutné dosiahnuť masovú transformáciu zastavaného prostredia na nulové čisté emisie.

Globálny kontext – uhlík počas celého životného cyklu

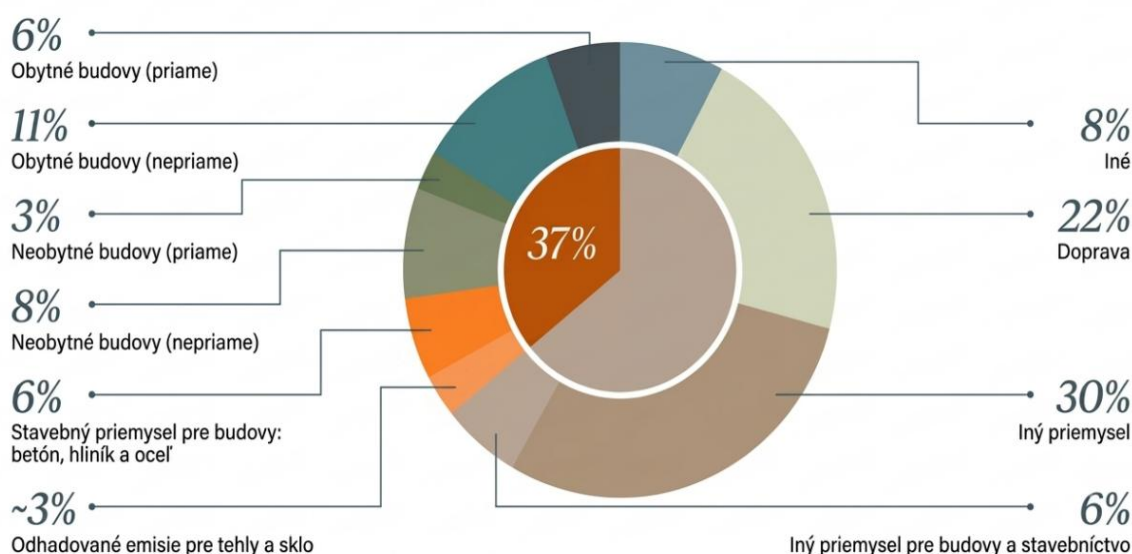
Prelomové ciele programu OSN pre klímu na vysokej úrovni do roku 2030 stanovujú, že všetky nové a zrekonštruované budovy musia mať do roku 2030 nulové prevádzkové emisie. Vzhľadom na to, že budovy v prevádzke predstavujú 28 % globálnych emisií CO₂, je zrejmé, že táto transformácia je nevyhnutná, ak má globálna ekonomika splniť celkovú výzvu zmiernenia najhorších dôsledkov zmeny klímy. Je však tiež zrejmé, že vzhľadom na súčasné tempo pokroku je to významná výzva pre sektor nehnuteľností.

Zatiaľ čo prevádzkový uhlík z budov tvorí významnú časť globálnych emisií uhlíka, dôležitý je aj zabudovaný uhlík v materiáloch a konštrukcii, ktorý predstavuje ďalšiu kľúčovú súčasť uhlíkovej

stopy celej životnosti budovy. Tento dokument je jedným zo série publikovaných organizáciou WBCSD, ktorá skúma emisie uhlíka z budov a prechod na nulové čisté emisie uhlíka z budov, pričom predchádzajúca publikácia s názvom Nulové čisté emisie budovy: Zníženie emisií zo stavebníctva na polovicu dnes, skúma vplyv zabudovaného uhlíka.



Obr. 1 Odhadované rozdelenie emisií uhlíka podľa fázy životného cyklu budovy (Zo správy WBCSD z roku 2021 *Buildings Net Zero: Where Do We Stand?*)

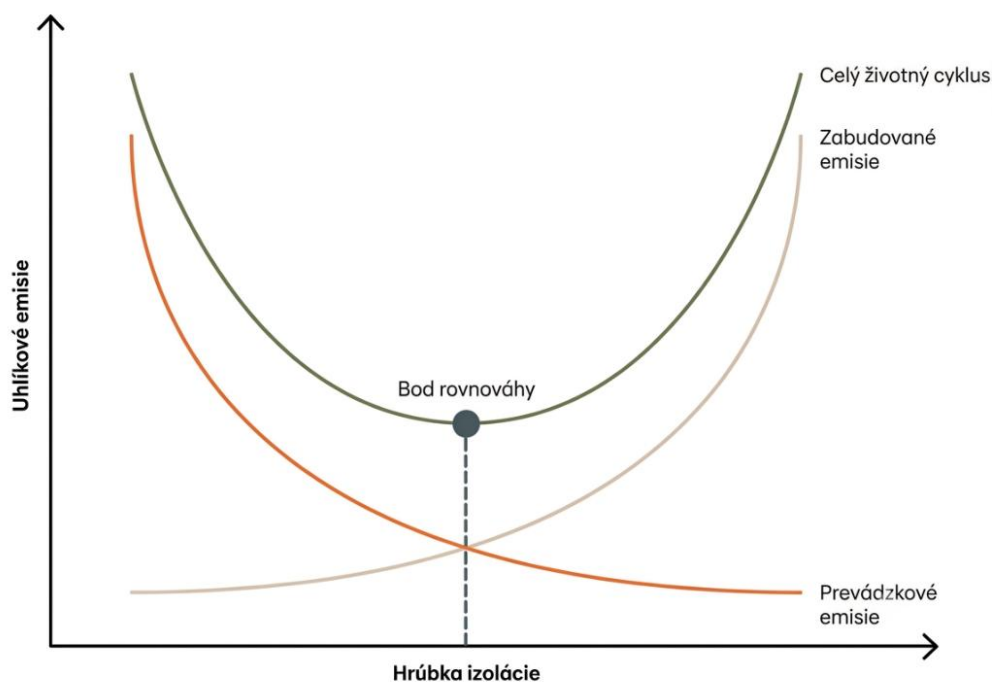


Obr. 2 Podiel budov na celosvetových emisiách z energie a procesov v roku 2021 (Zo správy *Global Status Report pre budovy a stavebníctvo (Buildings-GSR)* za rok 2022, ktorú vypracovala Globálna aliancia pre budovy a stavebníctvo (*GlobalABC*) pod gesciou Programu OSN pre životné prostredie (*UNEP*) [1]

Optimalizácia uhlíka počas celého životného cyklu (*Optimizing whole-life carbon*)

Je dôležité mať na pamäti, že prevádzková uhlíková stopa predstavuje polovicu alebo často menej ako polovicu celkového vplyvu budovy počas jej životnosti, pričom zvyšok tvoria vplyvy zahrnuté

v rôznych fázach životného cyklu. Spoločnosti musia zohľadňovať cieľ nulových emisií uhlíka v prevádzke v kontexte celkovej uhlíkovej stopy budovy, aby sa vyhli nežiaducim dôsledkom. Táto rovnováha medzi prevádzkovými a zabudovanými vplyvmi sa v rôznych častiach sveta prejavuje odlišne v dôsledku zmeny klímy a faktorov uhlíkovej intenzity (pre energiu a materiály). Situácia sa neustále mení. Najlepšou praxou sa stáva užšia integrácia medzi prevádzkovou a zabudovanou energiou/analýzou uhlíka, aby odvetvie pochopilo a analyzovalo kompromisy medzi týmito dvoma faktormi v kontexte celého projektu aj jednotlivých kľúčových rozhodnutí.



Obr. 3 Rovnováha uhlíka počas životného cyklu

1.3 Definícia budov s nulovými emisiami uhlíka v prevádzke

1.3.1 Definícia čistého nulového stavu v prevádzke

Hoci spoločnosti chápu všeobecné zásady, existujú medzery a nekonzistencie v definíciách budov s nulovými emisiami, ktoré sa používajú po celom svete, a tieto brzdia rozvoj tohto sektora. Vytvorenie účinných stimulov na ich výstavbu si vyžaduje väčšiu jasnosť v tom, čo by mala budova s nulovými emisiami byť schopná robiť. Kľúčové pre definíciu je kombinácia výkonu budovy a výkonu infraštruktúry, ku ktorej je pripojená.

Prechod na strane dopytu - Transformácia budov

Budova s nulovými emisiami uhlíka v prevádzke je relatívne ľahko definovateľná: budova, ktorá je na 100 % napájaná vlastnou obnoviteľnou energiou vyrobenou na mieste. Pre veľkú väčšinu budov po celom svete však nie je tento výsledok realizovateľný a cieľom je dosiahnuť budovu s nulovými emisiami, čo je výsledok, ktorý zahŕňa ako budovu, tak aj energetickú infraštruktúru,

ktorá ju zásobuje. Preto je v prípade budovy s nulovými emisiami nevyhnutné rozlišovať medzi požiadavkami samotnej budovy a infraštruktúrou, ku ktorej je pripojená. Budova, ktorá spĺňa požadované charakteristiky budovy s nulovými emisiami, je „pripravená na nulové emisie“.

Aby bola budova pripravená na nulovú bilanciu emisií, musí:

- ✓ dostatočne znížiť svoju spotrebu energie, aby bola v súlade s prechodom na 100 % obnoviteľné zdroje energie na trhu, na ktorom pôsobí;
- ✓ byť schopná fungovať na 100 % obnoviteľných zdrojoch energie (elektrická/tepelná energia).

Kľúčovým princípom budovy pripravenej na nulovú bilanciu emisií je nielen to, že ročne nevyprodukuje žiadne emisie uhlíka, ale aj to, že dostatočne zníži dopyt po obnoviteľnej energii, aby sa mohla prispôbiť ekonomike, v ktorej sa nachádza. To znamená, že ak by všetky budovy fungovali na tejto úrovni, dlhodobá dostupná kapacita obnoviteľných zdrojov by bola dostatočná na pokrytie dopytu. Najlepšia globálne konzistentná definícia úrovne energetickej účinnosti potrebnej na dosiahnutie nulovej bilancie emisií v rôznych ekonomikách po celom svete pochádza z CRREM pathways.

Prechod na strane ponuky - Transformácia infraštruktúry

V konečnom dôsledku by budova s nulovými emisiami bola napojená na zdroj energie bez fosílnych palív – so 100 % obnoviteľnou energiou. Hoci sa však úroveň emisií uhlíka v elektrickej sieti po celom svete líši, žiadna krajina zatiaľ neprešla na 100 % obnoviteľnú energiu.

Existujú dva spôsoby, ako môže budova dosiahnuť nulové prevádzkové emisie v tejto fáze prechodu infraštruktúry:

- ✓ Nakupujte 100 % energie z obnoviteľných zdrojov prostredníctvom tarify (záruka pôvodu) alebo zmluvy o nákupe energie (PPA), ktorá je preukázateľne doplnkom k národným povinnostiam v oblasti obnoviteľných zdrojov energie;
- ✓ Na rozvíjajúcich sa trhoch, kde nie je možné vykonávať vyššie uvedené opatrenia, nakupujte kompenzácie uhlíka, ktoré spĺňajú uznaný medzinárodný štandard, aby ste vyrovnali 100 % zvyškových emisií na ceste k nulovým emisiám.

„Nová alebo zrekonštruovaná budova s nulovou bilanciou emisií je vysoko energeticky efektívna, neprodukuje žiadne emisie skleníkových plynov z fosílnych palív a výrazne znižuje množstvo uhlíka obsiahnutého v materiáloch. Využíva obnoviteľnú energiu, najlepšie vyrobenú na mieste,

ak je to technicky realizovateľné, a/alebo mimo miesta, aby úplne pokryla svoju zostávajúcu, veľmi nízku spotrebu energie.“

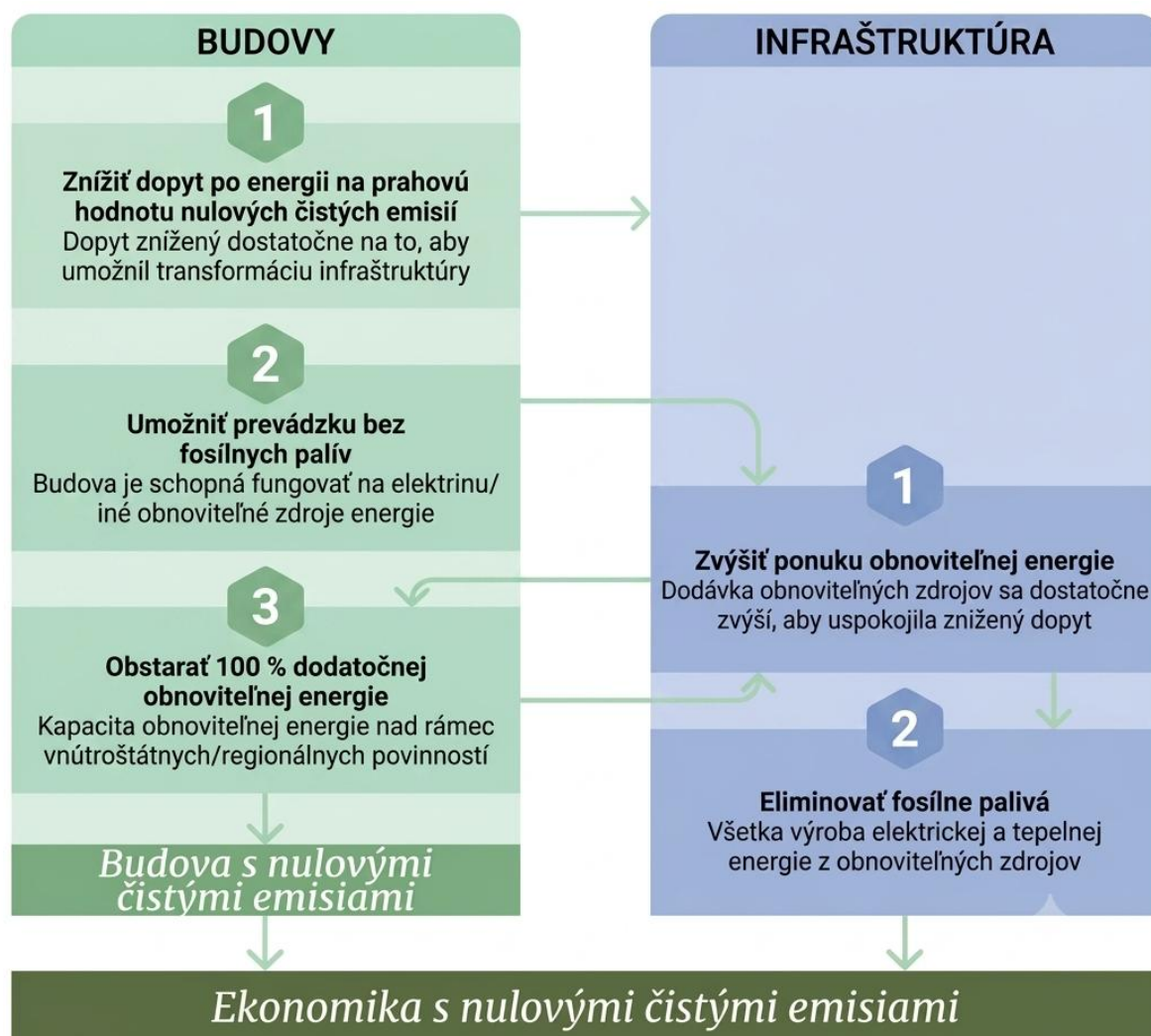
Partnerstvo pre finančné účtovníctvo uhlíka (PCAF)

Usmernenia k financovaniu prechodu európskych budov na nulovú spotrebu energie. „Ako zlaté pravidlo dosiahnutia nulovej spotreby energie sa vždy uprednostňujú opatrenia, ktoré pomáhajú znižovať dopyt po energii, aby sa zabezpečila vysoká energetická účinnosť budov. Spôsob dodávania energie na pokrytie zostávajúceho dopytu sa líši. Napríklad, ak je 100 % dopytu po energii pokryté obnoviteľnou energiou na mieste, môže sa to nazvať budovou s nulovou spotrebou energie. V skutočnosti to však nemusí byť možné vo všetkých typoch budov a lokalitách. Ak sa obnoviteľná energia dováža mimo miesta, aby sa dosiahla rovnováha, môže sa to nazvať prevádzkou s nulovými emisiami uhlíka.“

1.3.2 Definícia nulových emisií v prevádzke

Cesta transformácie (Transformation pathway)

Medzivládny panel pre zmenu klímy (IPCC) definuje čistú nulovú uhlíkovú stopu ako rovnováhu emisií uhlíka a odstraňovania uhlíka počas určitého časového obdobia. Na svete neexistuje žiadny trh, ktorý by tento cieľ dosiahol. Prechod však už začal a na rôznych trhoch postupuje rôznou rýchlosťou. Dosiahnutie úplného prechodu na nulové emisie si vyžaduje transformáciu budov a infraštruktúry. Tieto dve oblasti sú vzájomne závislé. Obrázok 4 ilustruje vzájomné prepojenie – 100 % obnoviteľná infraštruktúra je možná len v prípade, ak sa dostatočne zníži dopyt budov. Zároveň budova môže nakoniec dosiahnuť nulové emisie len vtedy, ak je pripojená k 100 % obnoviteľnej infraštruktúre.



Obr. 4 Integrovaný plán prechodu na ekonomiku s nulovými čistými emisiami

Budova vs. portfólio vs. Spoločnosť (Building vs. portfolio vs. Corporate)

Mnohé organizácie definujú nulové emisie predovšetkým ako firemný cieľ, pričom ciele sú vyjadrené buď ako „nulové emisie do dátumu x“, alebo prostredníctvom stanovenia vedecky podloženého cieľa overeného iniciatívou Science Based Targets (SBTi). Prvý prístup vyžaduje doplňujúcu definíciu rozsahu, aby bol účinný, zatiaľ čo druhý stanovuje trajektóriu cieľa, zvyčajne v súlade s trajektóriou 1,5 °C, ktorá vyžaduje marginálne zlepšenia na ročnej báze, a nie absolútnu hodnotu za určitý počet rokov.

✓ **Úroveň budovy**

Definícia budovy s nulovými emisiami uhlíka v prevádzke má dve zložky – „nulové emisie“ zahŕňa elimináciu fosílnych palív na mieste a zlepšenie energetickej účinnosti s cieľom dosiahnuť miestnu hranicu nulových emisií. Spoločnosti čoraz častejšie používajú nástroje ako CRREM na

porovnanie energetickej/uhlíkovej výkonnosti budov s trajektóriami dekarbonizácie trhu, aby vyhodnotili riziko uhlíkového strádania (podrobnejšiu definíciu CRREM nájdete v nasledujúcej časti o trajektóriách znižovania dopytu).

Okrem vyššie uvedeného bude budova na dosiahnutie nulových emisií potrebovať využívať 100 % obnoviteľnej energie. Hoci energetické trhy zostávajú čiastočne závislé od fosílnych palív, obnoviteľná energia pre budovu s nulovými emisiami musí preukázať adicionalitu, čo znamená, že súvisiaca výrobná kapacita musí byť dodatočná k tej, ktorú vyžadujú miestne/národné predpisy na pridelenie konkrétne pre túto budovu.

✓ **Úroveň podnikov**

Mnohé podniky si stanovili vedecky podložený cieľ, ako prostriedok na vyjadrenie celkového prístupu k zmierňovaniu zmeny klímy. K dnešnému dňu to však nebolo dostatočné na to, aby sa budovy alebo portfólio nehnuteľností dostali na trajektóriu smerujúcu k nulovým emisiám, ako je to definované v tomto dokumente. Je to preto, že zatiaľ čo SBTi vyžaduje absolútnu trajektóriu znižovania pre rozsah 1 (fosílna palivá na mieste), hodnotenie rozsahu 2 (energia dodávaná zo siete) môže byť založené na trhu. Preto možné obstaranie 100 % obnoviteľnej energie znižuje motiváciu k zlepšovaniu energetickej účinnosti. To je pochopiteľné v prípade vedecky podložených cieľov, ktoré sa môžu vzťahovať na organizácie v akejkoľvek sektore. Preto nie je realisticky možné absolútne posudzovať požadovanú úroveň energetickej efektívnosti na dosiahnutie prechodu na čisté nulové emisie. Táto situácia sa však mení. SBTi v máji 2023 uverejnila návrh usmernení pre sektor budov.

Tieto usmernenia sa vzťahujú na organizácie v sektore nehnuteľností, konkrétne na vlastníkov budov, developerov, správcov nehnuteľností, významných nájomcov a finančné inštitúcie, a preto sa viac zameriavajú na vývoj a výkonnosť budov. V návrhu dokumentov, ktoré boli zverejnené v rámci procesov zapájania zainteresovaných strán SBTi, SBTi skúma možnosti, ako klásť väčší dôraz na energetickú efektívnosť ako prioritu v procese dekarbonizácie odvetvia.

Trajektórie znižovania dopytu

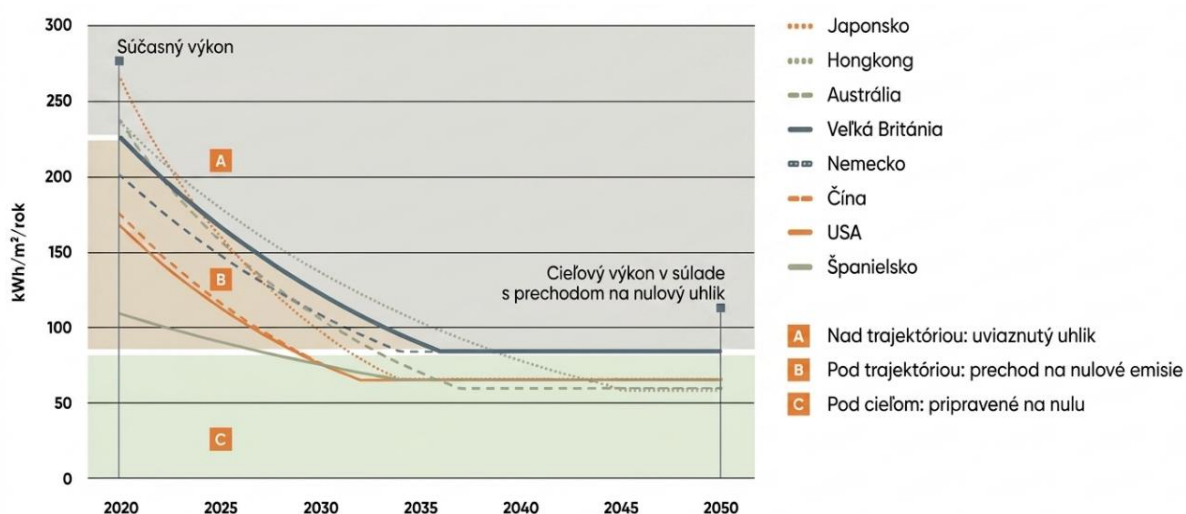
Projekt Carbon Risk Real Estate Monitor (CRREM) ponúka najkomplexnejší zdroj informácií o globálnych trajektóriách dekarbonizácie nehnuteľností. Pôvodne vyvinutý pre krajiny Európskej únie, CRREM sa odvtedy rozšíril aj na kľúčové svetové ekonomiky. Program zosúladenia medzi SBTi a CRREM priniesol aktualizáciu trajektórií v roku 2023. Trajektórie sú k dispozícii pre väčšinu hlavných svetových ekonomík a celý rad tried aktív. Ako také predstavujú najlepší prostriedok na konzistentné hodnotenie prechodu budov na nulové emisie po celom svete. Trajektórie energie znázorňujú cestu od súčasnej priemerná energetickej náročnosti trhu pre každú triedu aktív na

vybranom trhu až po dopyt, ktorý je v súlade s dosiahnutím nulových emisií pre danú ekonomiku. Konečná energetická náročnosť sa líši medzi ekonomikami na základe rovnováhy dopytu a ponuky obnoviteľných zdrojov v danej lokalite.

Z hľadiska energetickej účinnosti by budova musela dosahovať výkon pod konečnou úrovňou energetickej náročnosti pre príslušný trh a triedu aktív, aby bola považovaná za budovu s nulovými emisiami. Budova nad konečnou úrovňou energetickej náročnosti, ale pod trajektóriou pre daný rok, by bola považovaná za budovu v prechode na nulové emisie, zatiaľ čo budova nad trajektóriou by bola považovaná za budovu s uhlíkovou stopou.

Uviaznutie uhlíka (*Carbon stranding*)

Globálny trh s investíciami do nehnuteľností stále viac uznáva definíciu CRREM uviaznutia uhlíka, čiastočne vďaka jej zaradeniu do globálneho referenčného rámca udržateľnosti nehnuteľností Benchmark (GRESB). Uhlíkové stratové náklady sú kľúčovým motorom zmien v sektore komerčných nehnuteľností.



Obr. 5 Trajektória CRREM 2023 pre administratívne budovy [2]

Vytvorením priameho prepojenia medzi hodnotou nehnuteľnosti a prevádzkovou energetickou výkonnosťou a zakotvením potreby neustáleho zlepšovania vytvára priame prepojenie medzi hodnotou nehnuteľnosti a trajektóriou dekarbonizácie v súlade s parížskou dohodou o 1,5 °C. Ako ukazuje obrázok 5, na väčšine globálnych trhov cieľové trajektórie dosiahnu konečnú energetickú intenzitu do roku 2035 alebo skôr. Preto v priebehu nasledujúcich 10 – 12 rokov bude musieť veľká väčšina globálnych aktív dosiahnuť energetickú intenzitu zlučiteľnú s čistými nulovými emisiami, inak budú považované za uhlíkové stratové.

Definície po celom svete

Na základe výskumu vykonaného na podporu tejto publikácie sme zistili, že neexistuje žiadna vládna legislatíva, ktorá by úplne definovala budovu s nulovými emisiami uhlíka, a neexistujú žiadne príklady regulácie uhlíka obsiahnutého v budovách.

Národné a regionálne politiky však v mnohých prípadoch zvyšujú prevádzkové energetické požiadavky vzhľadom na potrebu prechodu na nulové emisie. Tieto legislatívne definície, ako napríklad EÚ ZEB (budova s nulovou spotrebou energie) a japonská politika budov s nulovou spotrebou energie, sú dôležité pre informovanie o budúcich cieľoch zníženia prevádzkovej energie v týchto lokalitách, ale nedefinujú, čo je budova s nulovými emisiami uhlíka. Transparentnosť môže byť dôležitým činiteľom zmien na trhoch tým, že zvyšuje dopyt po vysoko výkonných aktívach, čo sa prejavuje najmä v Austrálii, kde miestne predpisy vyžadujú minimálne hodnotenie NABERS. Hoci to ešte nie je rozšírené, vlády začínajú vydávať nelegislatívne definície alebo rámce týkajúce sa emisií s nulovým čistým dopadom. V EÚ taxonómia udržateľných činností spája energetickú výkonnosť s jasnou definíciou minimálnych požiadaviek na udržateľné financovanie. Ide o dôležitý prvý pokus o zavedenie štandardizácie na trhu zeleného alebo udržateľného financovania, ktorý v posledných rokoch rýchlo rástol, ale stále sa podobá „divokému západu“ kvôli nedostatku konzistentnosti v definícii toho, čo v tomto kontexte predstavuje „zelené“ alebo „udržateľné“. Prepojená povaha finančného trhu znamená, že tento štandard už má vplyv aj mimo EÚ. Existuje všeobecné očakávanie, že v priebehu času budú ďalšie jurisdikcie nasledovať tento príklad a zavedú podobné rámce definícií ako prostriedok na využitie potenciálu zeleného financovania ako činiteľa zmien. V Číne a USA existujú definície energie s nulovými emisiami, ktoré podporujú podstatné zníženie spotreby energie, ale bez cieľa alebo prepojenia s reguláciou. Napriek tomu ide o dôležitý krok vpred v objasnení definícií na týchto trhoch.

Zainteresované strany zverili náročnú úlohu WorldGBC a pridruženým miestnym radám pre zelené budovy (GBC), aby vytvorili pracovné definície toho, čo vlastne je budova s nulovými emisiami uhlíka.

V roku 2018 WorldGBC spustila program Advancing Net-Zero, ktorý vyzýva GBC po celom svete, aby pracovali na úplnej dekarbonizácii sektora do roku 2050. To znamená, že prevádzkové a zabudované emisie musia byť nulové pre všetky budovy. Organizácie môžu tohto cieľa dosiahnuť kombináciou zníženia emisií, nákupu energie z obnoviteľných zdrojov a kompenzácie uhlíka. Od tohto oznámenia jednotlivé GBC vyvinuli svoje vlastné rámce a definície na dosiahnutie tohto hlavného cieľa a stanovili si svoje vlastné priebežné ciele, s rozdielmi v tom, čo

každá krajina považuje za emisie s nulovým uhlíkovým dopadom, ako aj svoje vlastné požiadavky na nákup energie z obnoviteľných zdrojov a kompenzáciu uhlíka.

Na nasledujúcich stranách sú uvedené definície budov s nulovými emisiami, ktoré sme analyzovali pre kľúčové trhy relevantné pre členov WBCSD. Definície sme rozdelili na vládne (legislatívne a nelegislatívne) a dobrovoľné trhové definície navrhnuté mimovládnyimi organizáciami.

1.3.3 Definícia čistého nulového stavu v prevádzke

Globálne legislatívne rámce a mestské politiky v oblasti stavebníctva čoraz intenzívnejšie akcelerujú prechod k uhlíkovej neutralite prostredníctvom prísnych energetických noriem a emisných limitov. V severoamerickom kontexte smerujú kanadské Národné navrhované modelové kódexy (2020) k tomu, aby boli všetky nové budovy do roku 2030 postavené v štandarde Net-Zero Energy-Ready, teda s maximálnou energetickou úspornosťou, avšak nateraz bez požiadaviek na obsiahnutý uhlík či kompenzácie. Na komunálnej úrovni reaguje Mesto New York svojím miestnym zákonom 97, ktorý od roku 2024 ukladá budovám nad 25 000 štvorcových stôp povinnosť plniť ročné emisné limity s cieľom znížiť emisie budov o 40 % do roku 2030 a o 80 % do roku 2050.

Európska únia volí komplexný legislatívny tlak prostredníctvom balíka Fit for 55, ktorý od roku 2026 integruje sektor budov do systému obchodovania s emisiami (ETS) s plánom zníženia emisií o 43 % oproti roku 2005, čo priamo dopĺňajú aktualizácie smerníc EED a EPBD. Samotná smernica EPBD, ktorá do konca roka 2020 vyžadovala štandard takmer nulovej potreby energie (NZEB), zavádza od 1. januára 2030 pre všetky nové budovy povinný štandard budov s nulovou energetickou náročnosťou (ZEB). Tieto budovy nesmú produkovať žiadne lokálne emisie z fosílnych palív a ich zvyšková spotreba musí byť plne krytá z obnoviteľných zdrojov, čo výrazne zvýši budúci dopyt po zelených riešeniach naprieč Európou.



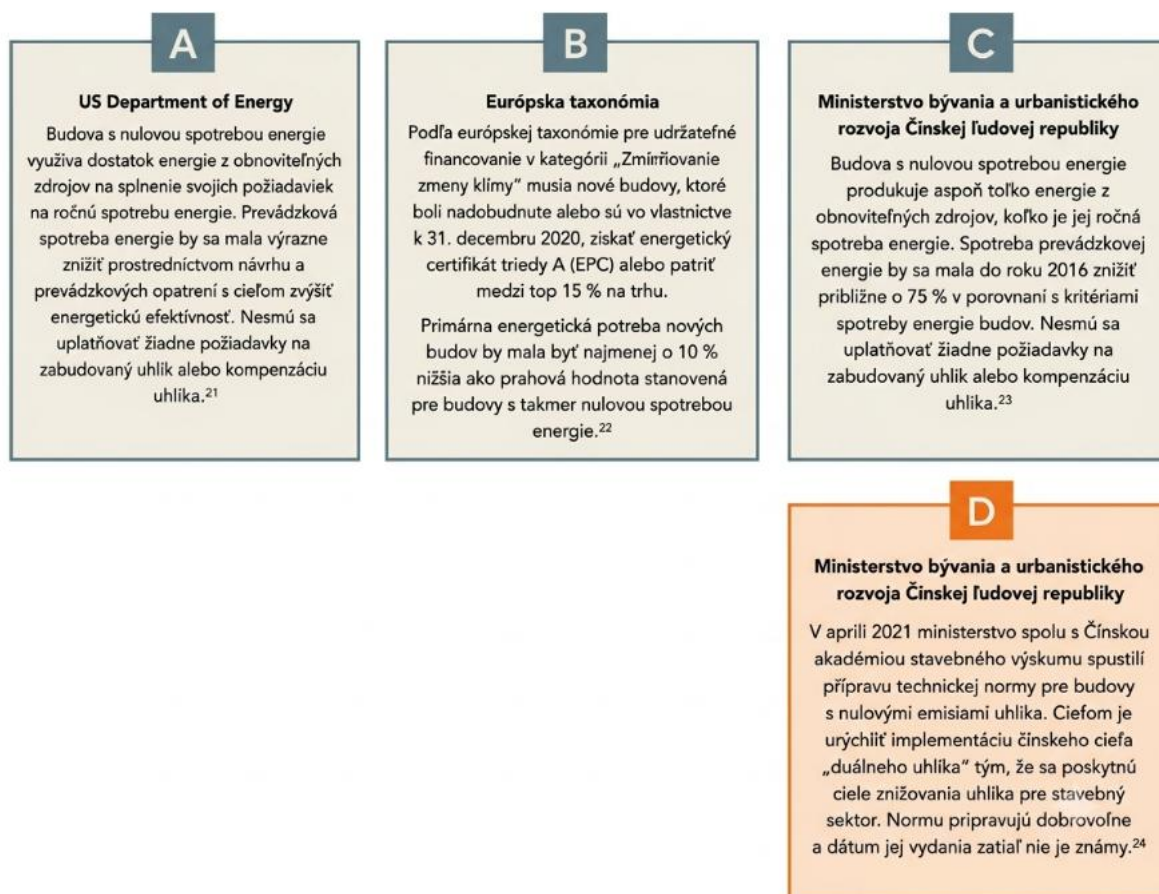
<p>A</p> <p>Ministerstvo energetiky USA Budova s nulovou spotrebou energie vyrába dosatok obnoviteľnej energie na pokrytie vlastnej ročnej spotreby energie. Prevádzková spotreba energie by sa mala výrazne znížiť prostredníctvom návrhových a prevádzkových opatrení na zvýšenie energetickej efektívnosti. Žiadne požiadavky na zabudovaný uhlík alebo kompenzáciu uhlíka.²¹</p>	<p>B</p> <p>Taxonómia EÚ Taxonómia EÚ o udržateľných financiách, kategória Zmierňovanie zmeny klímy. Nadobudnuté a vlastnené budovy postavené pred 31. decembrom 2020 musia mať certifikát energetickej hospodárnosti (EPC) triedy A alebo patriť medzi 15 % najlepších na trhu. Primárna energetická potreba nových budov by mala byť aspoň o 10 % nižšia ako prahová stanovená pre budovy s takmer nulovou spotrebou energie.²²</p>	<p>C</p> <p>Ministerstvo pre bývanie a rozvoj miest a vidieka Čínskej ľudovej republiky Budova s nulovou spotrebou energie vyrába aspoň toľko obnoviteľnej energie, koľko je jej vlastná ročná spotreba energie. Budova s takmer nulovou spotrebou energie (nearly ZEB) mala znížiť svoju prevádzkovú spotrebu energie o 75 % v porovnaní s kritériami spotreby energie pre budovy z roku 2016. Žiadne požiadavky na zabudovaný uhlík alebo kompenzáciu uhlíka.²³</p>
<p>Budova s nulovou spotrebou energie vyrába dosatok obnoviteľnej energie na pokrytie vlastnej ročnej spotreby energie. Prevádzková spotreba energie by sa mala výrazne znížiť prostredníctvom návrhových a prevádzkových opatrení na zvýšenie energetickej efektívnosti. Žiadne požiadavky na zabudovaný uhlík alebo kompenzáciu uhlíka.²¹</p>	<p>Taxonómia EÚ o udržateľných financiách, kategória Zmierňovanie zmeny klímy: Nadobudnuté a vlastnené budovy postavené pred 31. decembrom 2020 musia mať certifikát energetickej hospodárnosti (EPC) triedy A alebo patriť medzi 15 % najlepších na trhu. Primárna energetická potreba nových budov by mala byť aspoň o 10 % nižšia ako prahová hodnota stanovená pre budovy s takmer nulovou spotrebou energie.²²</p>	<p>D</p> <p>Ministerstvo pre bývanie a rozvoj miest a vidieka Čínskej ľudovej republiky V apríli 2021 ministerstvo a Čínska akadémia pre výskum budov spustili prípravu technickej normy pre budovy s nulovými emisiami. Cieľom je urýchliť implementáciu čínskeho cieľa „Dvojitý uhlík“ (Dual Carbon) poskytnutím cieľov na zníženie emisií uhlíka pre oblasť stavebníctva. Je to dobrovoľné a dátum vydania nie je známy.²⁴</p>

Obr. 6 Globálne legislatívne rámce

V ázijskom regióne uplatňuje Hongkong Vyhlášku o energetickej účinnosti budov (BEEO), ktorá pre nové stavby a veľké rekonštrukcie komerčných objektov definuje minimálne štandardy

účinnosti a ukladá povinnosť realizovať verejný energetický audit každých 10 rokov [3]. Japonská politika úspešne zaviedla cieľ nulovej spotreby energie pre nové vládne a verejné budovy do roku 2020, pričom do roku 2030 plánuje tento priemer rozšíriť na všetky nové verejné aj súkromné budovy pri súčasnom zachovaní vysokej kvality vnútorného prostredia. V pacifickej oblasti stanovuje austrálsky Národný stavebný kódex minimálne konštrukčné normy pre tepelnú obálku a účinnosť technických zariadení. Tieto národné limity lokálne sprísňuje Mestská rada v Sydney, kde musia nové kancelárie, hotely a nákupné centrá od januára 2023 spĺňať prísne energetické hodnotenie NABERS 5,5 a od roku 2026 povinne dosiahnuť úplne nulové emisie uhlíka v rámci svojej spotreby energie.

1.3.4 Definícia nulových emisií v prevádzke





Obr. 7 Vládne nelegislatívne opatrenia – súčasné a budúce

<p>A</p> <p>WorldGBC</p> <p>Iniciatíva WorldGBC <u>Net Zero Carbon Buildings Commitment</u> stanovuje, že všetky budovy musia do roku 2050 dosiahnuť čisté nulové emisie, vrátane prevádzkových a zabudovaných emisií.</p> <p>Do roku 2030 musia nové budovy a renovácie dosiahnuť aspoň 40 % zníženie zabudovaného uhlíka a všetky nové budovy musia počas prevádzky dosiahnuť čisté nulové prevádzkové emisie.</p> <p>Vyhlasenie o záväzku uvádza, že budovy v podnikoch vo vlastnej prevádzke by mali dosiahnuť čisté nulové prevádzkové emisie do roku 2030. Spoločnosti majú do roku 2030 kompenzovať všetky zostávajúce emisie.</p>	<p>C</p> <p>UKGBC</p> <p>UKGBC <u>Net Zero Whole Life Roadmap for the Built Environment</u> stanovuje, že nové budovy musia spĺňať energetické požiadavky na úrovne výkonnosti potrebné pre čisté nulové emisie. Stanovuje priemernú požadovanú úsporu energetickej náročnosti na úrovni 60 % pre kancelárske budovy, aby sa dosiahol cieľ „Paris Proof“ – dosiahnuť energetické hodnotenie s čistými nulovými emisiami do roku 2050.</p> <p>Jeho rámec zahŕňa kroky na dosiahnutie budov s čistými nulovými emisiami bez súvisiacich cieľov a podporuje podniky, aby sa pripojili k záväzku <i>WorldGBC Net Zero Carbon Buildings Commitment</i>.²⁶</p>	<p>E</p> <p>Dutch GBC</p> <p>Dutch GBC vyvinula <u>Paris Proof Commitment</u> pre signatárov, aby splnili ciele Parížskej dohody. Zahŕňa meranie skutočnej spotreby energie s cieľom dosiahnuť významné úspory energie a dosiahnuť uhlíkovú neutralitu.</p> <p>Signatári sa zaväzujú zabezpečiť, aby všetky existujúce a nové budovy v ich priamej kontrole dosiahli štandard Paris Proof do roku 2040 a sledovať pokrok. Tým je záväzok v súlade so záväzkom WorldGBC Net Zero Carbon Buildings Commitment.</p>
<p>B</p> <p>PCAF</p> <p>Podľa iniciatívy Partnership for Carbon Accounting Financials (PCAF) majú nové alebo zrekonštruované budovy s čistými nulovými emisiami vysokú energetickú efektivitu, neemitujú žiadne emisie skleníkových plynov na mieste z fosílnych palív a výrazne znižujú zabudovaný uhlík. Využívajú obnoviteľnú energiu, uprednostňujú energiu vyrobenú priamo na mieste alebo v jeho blízkosti, ak je to technicky možné, a mimo miesta, a plne pokrývajú svoju zostávajúcu, veľmi nízku spotrebu energie.²⁵</p>	<p>D</p> <p>Pracovná skupina Spojeného kráľovstva pre budovy s čistými nulovými emisiami</p> <p>UKGBC je jedným zo zainteresovaných subjektov vyvíjajúcich štandard Spojeného kráľovstva pre budovy s čistými nulovými emisiami. Očakáva sa, že bude spustený neskôr v roku 2023. Definuje ciele v súlade s čistými nulovými emisiami pre prevádzkové a zabudované emisie uhlíka naprieč širokým spektrom typov aktív.</p>	<p>F</p> <p>Dutch GBC</p> <p>Dutch GBC skúma prepojenie s Global Reporting Initiative (GRI) a GRESB, systémom, v ktorom správcovia fondov real estate podávajú správy prostredníctvom modulu CRREM. Okrem toho sa vytvorí prepojenie s metodikou na hodnotenie Environmentálnej výkonnosti budov (BREEAM).²⁷</p>

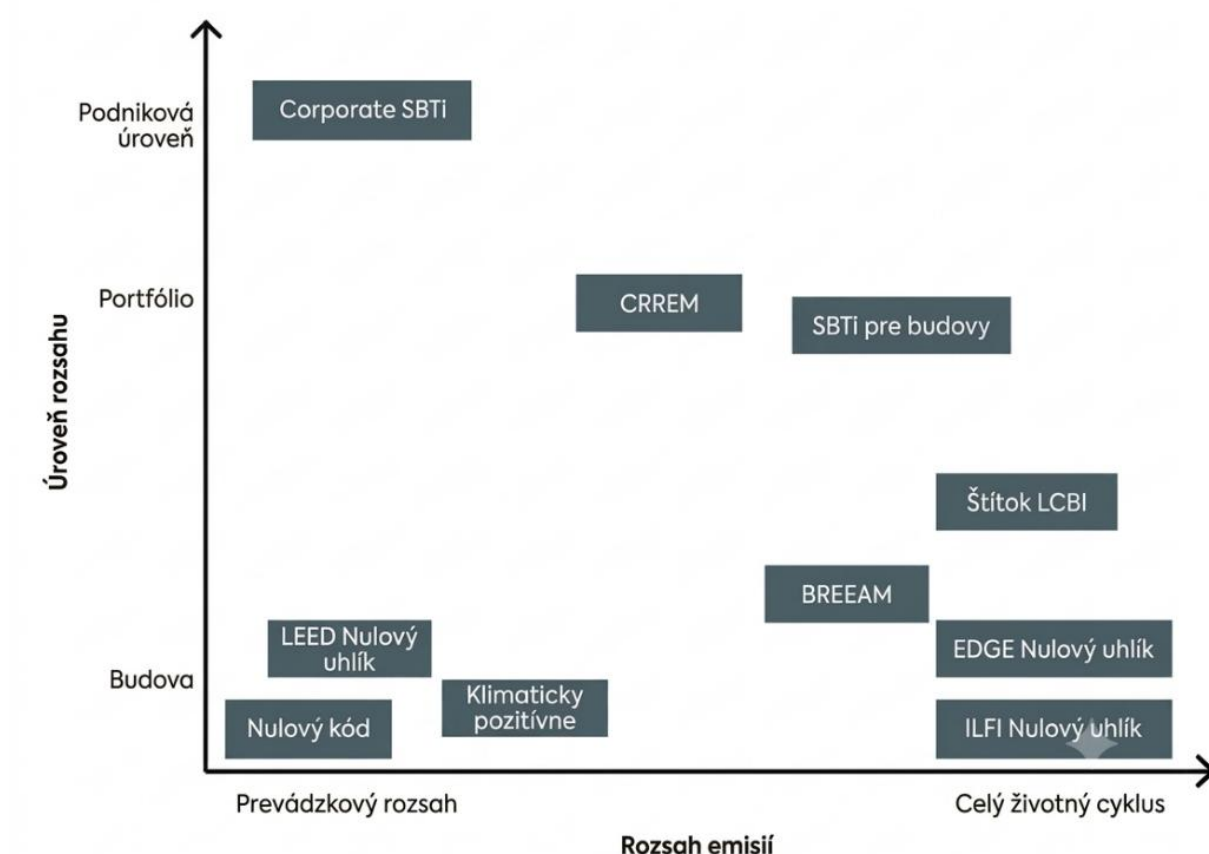


Obr. 8 Priemyselné organizácie – normy a budúce trendy

2. Posudzovanie nulových čistých emisií

Globálne/medzinárodné certifikácie nulových čistých emisií

Certifikáty o nulových emisiách uhlíka ponúkajú robustnú metodiku na posudzovanie rôznych aspektov nulových emisií a zároveň spôsob, ako priradiť trhové uznanie, a tým aj hodnoty k výsledku nulových emisií uhlíka.



Obr. 9 Vzorové porovnanie medzinárodných certifikácií nulových čistých emisií

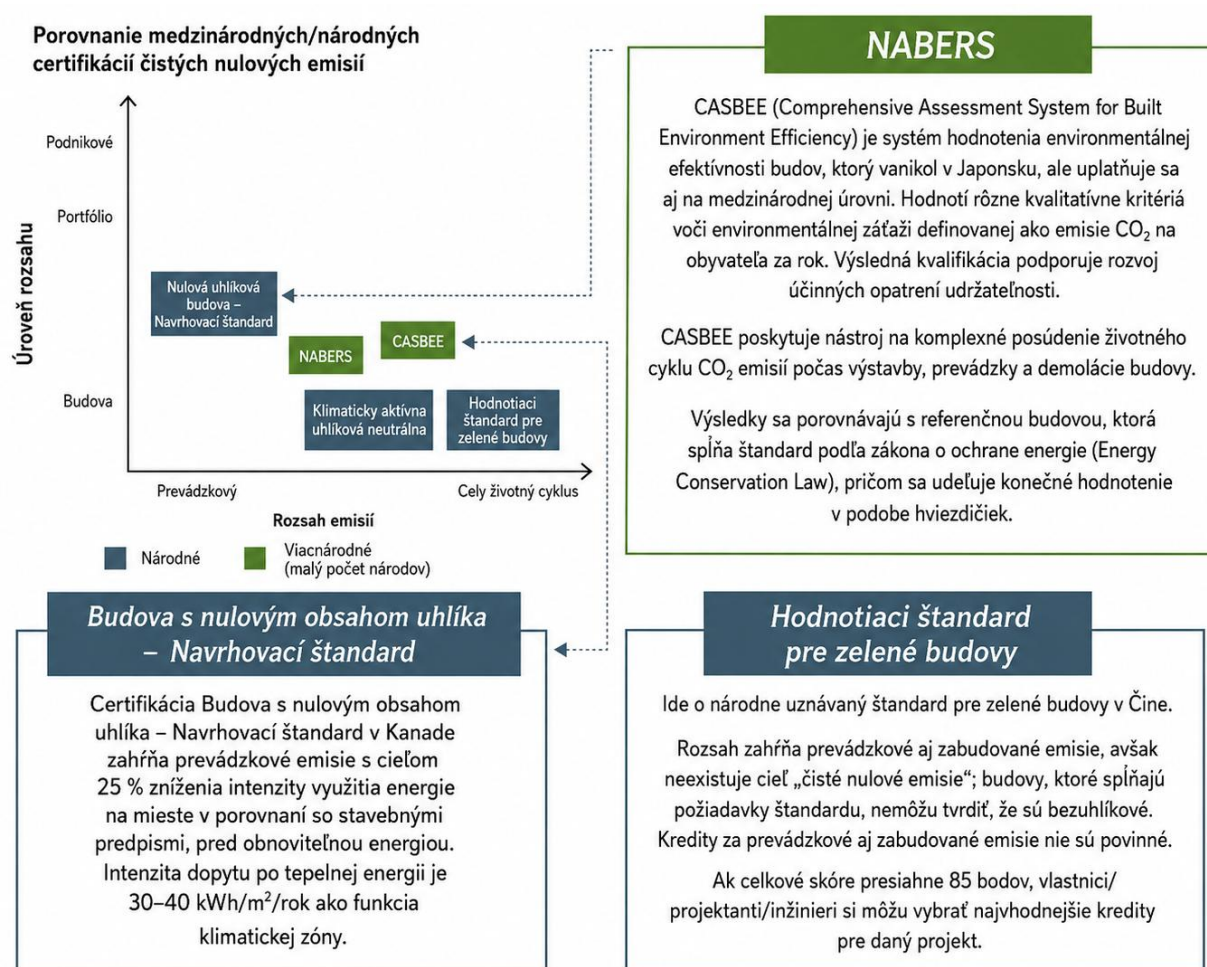
Certifikáty uvedené v tejto príručke sú buď globálne, alebo platné v širokej škále regiónov. Opísané certifikáty zahŕňajú certifikáty súvisiace s emisiami podnikov (nie len budovami), portfóliami budov a jednotlivými budovami. Náš výskum sa vo všeobecnosti zameriaval na trhy a geografické oblasti, ktoré sú relevantné pre členov WBCSD. Rozsah hodnotení aj miera dôkladnosti sa líšia, preto je dôležité pochopiť, ktoré hodnotenie alebo hodnotenia sú uplatniteľné na vaše konkrétne potreby. Systémy hodnotenia čistých emisií uvedené tu sú uplatniteľné na medzinárodnej úrovni.



Obr. 10 Systémy hodnotenia čistých emisií

Systémy hodnotenia čistých emisií uvedené v tejto tabuľke sú uplatniteľné buď na národnej úrovni, alebo v obmedzenom počte medzinárodných lokalít. Iniciatíva Science-Based Targets (SBTi) overuje ciele podnikov v oblasti znižovania emisií uhlíka, aby zabezpečila ich súlad so špecifikovanou trajektóriou dekarbonizácie (zvyčajne 1,5 °C). Podniky sú povinné dosiahnuť definované trajektórie znižovania emisií v rozsahu 1 a 2. V rozsahu 3 nie je zosúladenie trajektórie povinné, ale emisie musia byť vyhodnotené a musia byť stanovené ciele znižovania. Nástroj CRREM (Carbon Risk Real Estate Monitor) hodnotí uhlíkovú intenzitu jednotlivých aktív v porovnaní s predpokladanou trajektóriou dekarbonizácie trhu s nehnuteľnosťami (v súlade s 1,5

°C) a identifikuje rok, v ktorom sa prevádzková uhlíková intenzita aktíva posunie nad priemer trhu. Investičné spoločnosti ho čoraz častejšie využívajú ako prostriedok na hodnotenie prevádzkovej uhlíkovej výkonnosti v rámci portfólia. SBTi a CRREM nedávno zverejnili spoločný súbor nových trajektórií dekarbonizácie pre rôzne triedy aktív a trhy, ktoré by mali zlepšiť presnosť budúcich hodnotení. Ide o dôležitý krok smerom k zosúladieniu metrík používaných pri hodnotení uhlíka a metrík používaných na finančné hodnotenie jednotlivých aktív a portfólií. Stále však je potrebné urobiť niektoré kroky, najmä na úrovni certifikácie jednotlivých budov s nulovými emisiami.



Obr. 11 Navrhovací štandard

Na úrovni jednotlivých budov sú LEED Zero Carbon, Zero Code, EDGE Zero Carbon a ILFI Zero Carbon štyri schémy s nulovou uhlíkovou stopou, ktoré sú skutočne aplikovateľné na aktíva po celom svete; Climate Positive má skutočnú trakciu len v Nemecku a BREEAM v súčasnosti nezahŕňa cieľ nulovej uhlíkovej stopy; hoci sa to chystá v neznámom časovom horizonte. Štandard Zero Code nemá stanovený cieľ pre percentuálne zníženie prevádzkových emisií uhlíka a naviac sa nezdá, že by bol medzinárodne uznávaný. LEED Zero Carbon je nadväzujúca LEED

Zero Carbon je nadväzujúca certifikácia na medzinárodne uznávanú LEED, ale nekladie žiadne dodatočné špecifické požiadavky na prevádzkové ani zabudované uhlíkové emisie. Obe musia byť posudzované podľa LEED, ale aspekt výkonu je v oboch prípadoch obchodovateľným kreditom. LEED Zero Carbon jednoducho vyžaduje certifikáciu LEED pre dizajn, nákup zelenej energie a záväzok kompenzovať zvyškové emisie. Medzinárodný inštitút pre budúcnosť bývania (ILFI) sú najviac v súlade s CRREM a trajektóriou dekarbonizácie smerom k čistej nule zo všetkých certifikácií, pretože zahŕňa ako prevádzkové, tak aj zabudované emisné ciele. Na rozvíjajúcich sa trhoch, kde obmedzenia dodávateľského reťazca znemožňujú dosiahnutie cieľov ILFI, je EDGE Zero Carbon vhodnou alternatívou, pretože tiež zahŕňa prevádzkové a zabudované emisné ciele. EDGE bol vyvinutý Medzinárodnou Finančnou korporáciou (IFC) a zohľadňuje menší rozsah opatrení v oblasti udržateľnosti a je menej kompatibilný s čistou nulou ako ILFI kvôli povolení fosílnych palív. EDGE je tiež menej flexibilný ako ILFI, pretože má požiadavky na počiatočnú certifikáciu „EDGE standard“ a na úroveň obsadenosti.

Literatúra

1. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) a GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION (GlobalABC). 2026. Global Status Report for Buildings and Construction 2025–2026 [online]. Nairobi a Paríž: UNEP a GlobalABC, máj 2026 [cit. 2026-07-01].
2. CARBON RISK REAL ESTATE MONITOR (CRREM). 2023. CRREM Risk Assessment Reference Guide: User manual for the CRREM Risk Assessment Tool V2. Verzia 2 [online]. 20. marec 2023 [cit. 2026-07-01].
3. HONGKONG. 2012. Buildings Energy Efficiency Ordinance (Cap. 610) [online]. V znení neskorších predpisov (vrátane Buildings Energy Efficiency (Amendment) Ordinance 2025). Hongkong: Electrical and Mechanical Services Department (EMSD) [cit. 2026-07-01].

3. Dosiahnutie nulových emisií

3.1 Projektovanie a výstavba

Táto časť poskytuje prehľad niektorých nástrojov a techník, ktoré prispievajú k prechodu v praxi na budovy s nulovými emisiami v prevádzke. Prvou časťou prechodu na strane dopytu je odovzdávanie budov na konci výstavby, ktoré sú schopné fungovať s nulovými emisiami uhlíka. Či už ide o výstavbu nových alebo rekonštrukciu existujúcich budov, ide predovšetkým o proces

návrhu a výstavby. Emisie uhlíka sa zvyšujú v priebehu cyklu návrhu a výstavby, čo znamená, že zlepšenie rozhodovania v ranom štádiu vyžaduje agregované údaje odvodené z emisií vo fáze výstavby.

3.1.1 Stručný popis

Stručný popis návrhu, či už je definovaný pre budovu, generálny plán alebo portfólio, musí jasne stanoviť cieľ nulových emisií uhlíka v prevádzke, spolu s jasnou definíciou relevantnou pre konkrétne okolnosti (vrátane miestnej dostupnosti zdrojov obnoviteľnej energie) a vyjadrenou v termínoch výkonu (nie súladu). Okrem toho musia spoločnosti stanoviť kľúčové vstupné ciele v súlade s týmto cieľom, vrátane spotreby energie, výkonu stavebnej konštrukcie, vnútorných podmienok prostredia a kľúčovej efektívnosti systémov. Je dôležité, aby ciele v oblasti energie/uhlíka boli v súlade s ostatnými aspektmi výkonu, vrátane pohody a produktivity užívateľov.

3.1.2 Proces návrhu

V mnohých jurisdikciách sa proces návrhu zameriava predovšetkým na výsledky súladu s normami. Presun zamerania na skutočnú energetickú výkonnosť vyžaduje zmenu myslenia zo strany projektových tímov. Algoritmy riadenia a účinnosť za čiastkové zaťaženie na úrovni systému/komponentov sú príkladmi otázok, ktoré projektové normy často zanedbávajú, ale ktoré majú vplyv na skutočný výsledok.

3.1.3 Digitálna stratégia

Digitálne nástroje sú mocnou zbraňou v boji za dosiahnutie nulových emisií. Efektívne používateľské rozhrania a prístup k analytickým údajom môžu mať transformatívny vplyv na schopnosť používateľov a prevádzkovateľov budov riadiť energiu. Okrem toho má uplatňovanie umelej inteligencie (AI) na riadenie a optimalizáciu budov v reálnom čase v správnych podmienkach čoraz väčší potenciál prinášať transformatívne výsledky. Tieto nástroje a prístupy sú podstatne účinnejšie, ak sú začlenené do celého procesu návrhu, ako keby boli pridané na konci ako dodatočná myšlienka. Na strane ponuky môžu byť digitálne nástroje kľúčové pre odblokovanie flexibility siete potrebnej na vyrovnanie prerušovanej výroby energie z obnoviteľných zdrojov.

3.1.4 Stavba a uvedenie do prevádzky

Proces testovania a uvádzania budov do prevádzky sa postupne mení z dôrazu na kapacitu a komfort na testovanie energetickej účinnosti na úrovni komponentov a systémov. S touto zmenou prichádza aj uznanie, že nie je možné preukázať energetickú účinnosť v plnom rozsahu pred

nasťahovaním. Preto je potrebné proces uvedenia do prevádzky predĺžiť až po dokončenie stavby, čo vedie k procesu ladenia budovy, ktorý často trvá dva alebo tri roky prevádzky, kým sa dosiahne optimálny výkon. To zase vyžaduje odlišný prístup k obstarávaniu projektových a stavebných služieb, uznanie neustáleho zapojenia a zahrnutie komerčných kľúčových ukazovateľov výkonnosti (KPI) spojených s ukazovateľmi výkonnosti.

3.1.5 Odovzdanie a vybavenie

Vyššie opísaná zmena, pri ktorej projektanti a dodávatelia zostávajú zapojení do prevádzky budovy aj po jej dokončení, jasne naznačuje zmenu v spôsobe, akým sa budovy odovzdávajú do prevádzky, pričom celkovú kontrolu preberajú správcovia majetku a zariadení. Predĺžené prekryvanie sa s projektantmi a dodávateľmi poskytuje príležitosť na oveľa postupnejšie odovzdanie, čo zase umožňuje väčší prenos zručností na prevádzkový tím. Rovnako je nevyhnutná spolupráca medzi projektantmi a dodávateľmi základnej stavby a vybavenia, aby sa zabezpečilo, že zlatá niť projektového zámeru zostane nedotknutá.

Konečným cieľom je, aby odovzdanie budovy bolo dokončené až po tom, čo plne preukáže svoju prevádzkovú výkonnosť, takže zodpovednosťou prevádzkovateľa je potom udržiavať a, ak je to možné, zlepšovať túto výkonnosť v priebehu času.

3.2 Odovzdanie a prevádzka (Handover and operation)

Druhá časť prechodu na strane dopytu sa týka budovy, ktorá je schopná fungovať s nulovými emisiami, a jej premeny na budovu, ktorá skutočne funguje s nulovými emisiami. Ide tu o spôsob, akým spoločnosti spravujú a prevádzkujú tieto budovy. Je to pravdepodobne najväčšia výzva.

3.2.1 Obstarávanie správcov budov

Správcovia budov sú každodennými strážcami výkonnosti budovy, vrátane energetickej a uhlíkovej efektívnosti. Ak ich zamestnávajúce spoločnosti im neposkytujú právomoci a podporu pri efektívnom prevádzkovaní budovy, jednoducho sa to nestane. V mnohých krajinách je bežné obstarávať správu budov spôsobom, ktorý nie je v súlade s cieľom energetickej efektívnosti a znižovania emisií uhlíka. Klasický prístup je namiesto toho založený na pláne „plánovaných preventívnych“ kontrol, ktoré venujú malú alebo žiadnu pozornosť prevádzkovej výkonnosti, pokiaľ nedôjde k úplnému zlyhaniu. Ironicky, mnohé budovy majú k dispozícii rozsiahle údaje o prevádzkovej výkonnosti z meradiel a systémov správy budov, z ktorých by správcovia mohli čerpať, aby spravovanie budov bolo energeticky a nákladovo efektívnejšie. Na dosiahnutie nulových emisií v prevádzke je nevyhnutné zabezpečiť správu budov prostredníctvom zmlúv,

ktoré výslovne vyžadujú a podporujú manažérov, aby proaktívne monitorovali prevádzkový výkon a prispievali k dosiahnutiu a udržaniu nízkouhlíkovej prevádzky.

3.2.2 Lízing

Ak sú prítomní, nájomníci majú zvyčajne potenciál výrazne ovplyvniť energetickú a uhlíkovú bilanciu budov. Nejde len o ich bezprostrednú spotrebu elektrickej energie na osvetlenie a spotrebiče, ale aj o vplyv, ktorý môžu mať na centrálna zariadenia: kotly, chladiace zariadenia, ventilátory a čerpadlá. Nájomníci majú často, hoci v rôznej miere, určitú zodpovednosť za vybavenie, údržbu a prevádzku zariadení, ktoré zabezpečujú konečnú dodávku vykurovania, chladenia a vetrania do priestoru. Ak sa to vykonáva nesprávne, môže to výrazne zvýšiť celkovú spotrebu energie budovy (často neúmyselne spôsobujúc aj zníženie komfortu). Preto je na dosiahnutie nulových emisií nevyhnutné poskytnúť nájomcom jasné usmernenia a požiadavky a dôsledne ich monitorovať a presadzovať.

3.2.3 Optimalizácia budov

Nech už sú budovy úplne nové alebo existujúce, vždy výrazne získajú na prehodení a optimalizácii ich prevádzky. Vždy sa nájdu oblasti, kde skutočná prevádzka ukazuje možnosti úpravy riadenia s cieľom zlepšiť výkonnosť a možno identifikovať niektoré prehliadnutia pri uvedení budovy do prevádzky. To je celkom bežné pod tlakom dokončenia budovy včas. V prípade existujúcich budov sa skutočné využitie budovy môže v priebehu prevádzky odchyľovať od pôvodného zámeru. V kombinácii s obstarávaním správy budov, ktoré zvyčajne nie je v súlade s proaktívnym monitorovaním a zlepšovaním výkonnosti, to znamená, že sa môžu vyskytnúť neefektívnosti. Preto je často potrebné vykonať významné zlepšenia prostredníctvom optimalizácie.

Riadenie energie – monitorovanie a stanovovanie cieľov

Riadenie energie je tiež kľúčové pre dosiahnutie budov s nulovými emisiami uhlíka. Okrem monitorovania celkovej ročnej spotreby energie a emisií uhlíka v porovnaní s cieľmi, riadenie energie prispieva aj k proaktívnemu monitorovaniu a riadeniu podrobností o tom, kde sa energia používa a či existujú možnosti na zlepšenie efektívnosti:

- ✓ Na čo sa energia používa?
 - Vykurovanie, chladenie, vetranie, osvetlenie atď.
- ✓ Kde sa využíva?
 - Napríklad porovnanie poschodí
- ✓ Kedy sa využíva?

- Deň vs. noc, pracovný deň vs. víkend atď.
- ✓ Ako reaguje spotreba energie na dopyt?
 - Napríklad počasie alebo úroveň obsadenosti

Všetky takéto poznatky budú cenné pre dosiahnutie a udržanie nízkej energetickej náročnosti a nízkych emisií uhlíka. Nie je však jednoduché zabezpečiť, aby bolo riadenie energie robustné. Najskôr je potrebné mať istotu, že meracie zariadenia sú umiestnené na správnom mieste a sú presné, a prístup a zodpovednosť za riadenie energie musia byť jasné. Keďže svet prechádza na obnoviteľnejšie zdroje energie, ktoré sú zo svojej povahy viac prerušované, kedy obyvatelia používajú energiu, bude takmer rovnako dôležité ako to, koľko jej spotrebujú, a riadenie dopytu po energii bude musieť vystúpiť do popredia ako prostriedok na dosiahnutie dekarbonizácie.

4. Obstarávanie obnoviteľnej energie s nulovými emisiami uhlíka

V tomto dokumente sa poukazuje na dôležitosť zníženia celkovej energetickej spotreby budovy súbežne s výrobou energie z obnoviteľných zdrojov na mieste. Posledným krokom je zabezpečenie 100 % energie z obnoviteľných zdrojov na napájanie budovy. V ojedinelých prípadoch môže táto energia pochádzať výlučne z výroby na mieste. Pre veľkú väčšinu budov je však potrebné spoliehať sa na miestny energetický trh. Žiaden trh zatiaľ neprešiel na úplne obnoviteľné zdroje energie. Preto je potrebné zabezpečiť zostávajúcu spotrebu energie mimo miesta z obnoviteľných zdrojov. Na väčšine energetických trhov po celom svete sa energia vyrába na báze obnoviteľných zdrojov a fosílnych palív. Aby sa energia považovala za čistú nulovú emisiu, všetka energia dodávaná do budovy musí pochádzať z obnoviteľného zdroja. Jednoduché pridelenie neprimeraného množstva existujúcej miestnej výroby energie z obnoviteľných zdrojov pomocou tarify za zelenú energiu založenej na certifikátoch nie je dostatočné na dosiahnutie stavu nulových emisií. Požiadavkou je adicionalita, čo znamená, že odber energie z obnoviteľných zdrojov vedie k čistému zvýšeniu kapacity výroby energie z obnoviteľných zdrojov v miestnej sieti nad rámec požiadaviek miestnych/ národných predpisov. Aby projekt úspešne dosiahol čistú nulovú uhlíkovú bilanciu v prevádzke, musí verejne preukázať, že všetka spotrebovaná energia pochádza z obnoviteľného zdroja, jasne dokázať výhradné vlastníctvo spotrebovanej energie a že investícia poskytuje dôveryhodnú adicionalitu, čo znamená, že prispieva k celkovej kapacite výroby energie z obnoviteľných zdrojov pre danú miestnu sieť. Spoločnosti by mali pri nákupe obnoviteľnej energie dbať na to, aby bola zakúpená energia skutočne obnoviteľná, a to na základe certifikátu alebo dôkazu o obnoviteľnom zdroji, ktorý preukazuje, že tieto jednotky nemôže využívať nikto iný. Je to dôležité, pretože na niektorých globálnych trhoch je možné obchodovať so zdrojom energie a dôkazom o jeho energetických vlastnostiach a vlastníctve nezávisle od seba. Poznámka: verejne financované projekty v oblasti obnoviteľných zdrojov energie sa vo všeobecnosti nepovažujú za dodatočné, pretože tieto projekty sú realizované v reakcii na politiku, a nie na požiadavky trhu. Spoločnosti budú musieť vykonať primeranú hĺbkovú kontrolu, vrátane preskúmania usmernení národných energetických regulačných orgánov a nezávislých orgánov, pretože transparentnosť systémov dodávok a taríf sa veľmi líši. Príklady obstarávania energie z obnoviteľných zdrojov, ktoré spĺňajú vyššie uvedené kritériá v súlade s nulovými emisiami uhlíka v prevádzke, by zahŕňali:

- ✓ Dlhodobé zmluvy o nákupe elektrickej energie (PPA), ktoré poskytujú výhradne novú energiu z obnoviteľných zdrojov bez potreby dotácií a vyžadujú nezávislé overenie.
- ✓ Zelené tarify od dodávateľa, ktorý ponúka výhradne tarify zo 100 % obnoviteľných zdrojov. Toto sa často označuje ako „vysoko kvalitné zelené tarify“ a vyžaduje nezávislé overenie.

Aby bolo možné vyhlásiť prevádzku s nulovými emisiami uhlíka, je najlepšou praxou zverejniť informácie súvisiace s obstarávaním energie z obnoviteľných zdrojov, aby bola zabezpečená úplná transparentnosť. Je to dôležité na preukázanie, že projekt spĺňa uvedené kritériá a pôsobí ako líder na trhu, ktorý poháňa zmeny v odvetví. Spoločnosti by to mali zahrnúť do každého procesu účtovania emisií uhlíka s nulovým saldóm.

5. Kompenzácia uhlíka (Carbon offsetting)

Potreba a využívanie kompenzácií uhlíka pre stratégie budov s nulovými emisiami je stále často predmetom diskusií a nie je jednoznačná. To vyvoláva otázku, či, v akom rozsahu a kedy by spoločnosti mali využívať kompenzácie, aby mohli takéto tvrdenie uvádzať. Sú však kompenzácie správnym prístupom k tvrdeniam o budovách s nulovými emisiami? A prispievajú k dosiahnutiu dekarbonizácie stavebného prostredia ako celku? Informácie nižšie poskytujú prehľad súčasnej praxe a príležitosť na otvorenie diskusie o niektorých bodoch, ktorými by sme sa chceli zaoberať v našej budúcej práci.

Úloha kompenzácií v sektore nehnuteľností

Pochopenie kompenzácie uhlíka sa neustále vyvíja a je považované za možnú súčasť cesty organizácie k dosiahnutiu nulových emisií. WorldGBC vo svojom záväzku Net Zero Carbon Buildings Commitment zhrňuje úlohu kompenzácií takto: „V rámci prechodu si uvedomujeme aj hodnotu kompenzácií ako prostriedku na kompenzovanie a neutralizovanie vplyvov sektora a na podporu pozitívneho sociálneho a environmentálneho vplyvu v snahe dosiahnuť celkové nulové emisie.“ Hoci je ešte čo zlepšovať, pokiaľ ide o prísnosť a transparentnosť trhu s kompenzáciami uhlíka, pre stavebné prostredie by to mohlo byť tiež príležitosťou na vývoj odvetvovo špecifických schém znižovania a odstraňovania emisií, riešenie ťažšie dosiahnuteľných častí nášho odvetvia a podporu veľmi potrebnej spolupráce, investícií a inovácií v rámci hodnotového reťazca vo veľkom meradle.

Kompenzácie a budovy s nulovými emisiami uhlíka

Na vyspelom trhu s dobrou dostupnosťou obnoviteľnej energie na mieste a existenciou PPA a taríf by malo byť možné dosiahnuť nulové emisie uhlíka bez akýchkoľvek kompenzácií uhlíka. Nie vždy je to však tak. Napríklad na rozvíjajúcich sa trhoch spoločnosti stále využívajú niektoré krátkodobé kompenzácie emisií uhlíka, buď z dôvodu nedostatku dostatočného množstva obnoviteľnej energie, alebo z dôvodu nedostatku kapacity alebo stability elektrickej siete, čo vedie k potrebe využívať fosílna palivá na mieste. Či už ide o budovu, portfólio alebo trh, zmierňovanie emisií uhlíka by malo byť vždy prioritou. Keďže opatrenia na dekarbonizáciu prevádzkových emisií sú relatívne ľahšie realizovateľné, cieľom by malo byť vždy prechod od kompenzácií uhlíka k dosiahnutiu prevádzkových emisií s nulovým dopadom na životné prostredie. To sa líši od širšej situácie v oblasti uhlíka počas celého životného cyklu. V stavebníctve už existujú významné možnosti zmierňovania emisií uhlíka. Zostávajúce emisie sú však stále značné. Kompenzácie emisií uhlíka sú v súčasnosti potrebné na dosiahnutie čistých

emisií uhlíka počas celého životného cyklu budov. Smernice ISO Net Zero (IWA42:2022) uvádzajú, že kompenzácie by sa mali používať len vtedy, ak neexistujú žiadne iné alternatívy na zníženie emisií, a že len kompenzácie, ktoré vyvažujú zvyškové emisie, by sa mali započítavať do cieľa organizácie dosiahnuť nulové emisie. Organizácia by nemala používať kompenzácie na dosiahnutie priebežných cieľov. Ak sú kompenzácie uhlíka nevyhnutné, mali by pokrývať iba ročné zvyškové prevádzkové emisie uhlíka. Ide o rozdiel medzi ročnou spotrebou energie, ktorá nie je zahrnutá v obstarávaní energie z obnoviteľných zdrojov, a bude zahŕňať napríklad spotrebu nafty v záložných generátoroch a únik chladiva, okrem všeobecnej prevádzkovej spotreby energie. V prípade, že sa v rámci projektu nepoužívajú obnoviteľné zdroje energie.

Kredity na kompenzáciu uhlíka sú certifikovateľné a prevoditeľné jednotky emisií, ktoré môže subjekt zakúpiť s cieľom vyrovnať emisné výstupy prostredníctvom investícií do projektov, ktoré znižujú alebo, v ideálnom prípade, odstraňujú emisie inde. Kredit na kompenzáciu uhlíka sa rovná 1 000 kg CO₂e. Pojmy kompenzácia uhlíka a kredit na kompenzáciu uhlíka sa používajú ako synonymá, hoci môžu mať mierne odlišný význam. Kompenzácia emisií uhlíka je komplexná oblasť s rôznymi riešeniami a prístupmi, od riešení založených na prírode po kompenzácie odstraňovaním – technológie, ktoré fyzicky odstraňujú uhlík z atmosféry. Usmernenia od WorldGBC a nedávno aj od UKGBC poskytujú prehľad súčasných postupov a odporúčaní pre tento sektor.

6. Prehľad pokroku v jednotlivých regiónoch

6.1 Prechod na nulové emisie uhlíka v prevádzke – ponuka a dopyt

Táto časť poskytuje všeobecný, nestranný prehľad o stave prechodu budov na nulové emisie uhlíka z hľadiska dopytu aj ponuky, s niektorými príkladmi osvedčených postupov zdôraznenými v kľúčových geografických oblastiach pre členov WBCSD. Transformácia budov má dve časti, ktoré musia prebiehať paralelne, aby sa dosiahla nulová uhlíková stopa pri prevádzke. Prvá je strana dopytu (na mieste) – samotné budovy musia prejsť na nulovú priamu spotrebu fosílnych palív. Potom je potrebné dostatočne znížiť dopyt po energii, aby dostupná výroba energie z obnoviteľných zdrojov (na mieste alebo mimo miesta) mohla tento dopyt uspokojiť.



Obr. 12 Prehľad o stave prechodu budov na nulové emisie uhlíka z hľadiska dopytu aj ponuky

a) Energetická efektívnosť

Energeticky efektívna budova je taká, ktorá spotrebuje čo najmenej energie na zabezpečenie požadovanej funkčnosti prostredníctvom kombinácie dobrého dizajnu a pozorného prevádzkového riadenia. Správanie užívateľov je dôležitým aspektom energetickej efektívnosti, ale nie je dostatočne pochopené. Zlepšenia v energetickej účinnosti budov boli v mnohých krajinách pomalé, s relatívne nízkymi cenami energie (napriek globálnej energetickej kríze, ktorá v poslednom čase ceny zvýšila) a nedostatkom transparentnosti výkonnosti, čo spoločne viedlo k slabému dopytu. Významnou výnimkou je Austrália, kde systém energetického hodnotenia NABERS priniesol zníženie energetickej náročnosti o približne 50 % na trhu komerčných nehnuteľností za obdobie 20 rokov. Energetická efektívnosť budov nadobúda na dôležitosti s rastúcim dopytom po elektrickej energii, najmä v dôsledku rozšírenia klimatizácie v súvislosti s rastom teplôt po celom svete.

b) Nulové fosílna palivá

Ďalším krokom v transformácii na strane dopytu smerom k nulovým emisiám je prechod od akýchkoľvek fosílnych palív na mieste k elektrickej energii alebo iným obnoviteľným zdrojom energie, čo otvára dvere k úplnej transformácii na strane ponuky. Elektrifikácia je najširšie uplatniteľnou cestou k nulovým fosílnym palivám, ale k dispozícii sú aj iné obnoviteľné zdroje energie. Niektoré, ako napríklad geotermálna energia na Islande, sú použiteľné v určitých geografických oblastiach; iné, ako napríklad distribúcia odpadového tepla z priemyselných procesov, sú viac lokalizované. Prechod na nulové fosílné palivá prebieha v mnohých rozvinutých ekonomikách prostredníctvom kombinácie trhových síl a politických zásahov. V niektorých krajinách je už mnoho rokov štandardným riešením úplná elektrifikácia, či už z dôvodov klímy, dostupnosti zdrojov alebo politických dôvodov. Existujú príležitosti na prenos poznatkov medzi týmito vyspelejšími trhmi a tými, ktoré sa nachádzajú v skorších fázach prechodu.

c) Obnoviteľná energia na mieste

Obnoviteľná energia na úrovni budovy je vo všeobecnosti opatrením na strane dopytu, ak je vo vlastníctve budovy a nie je podliehajúca trhovým stimulom, hoci vo všeobecnosti patrí v hierarchii nižšie ako energetická účinnosť/zníženie dopytu. Fyzikálne obmedzenia znamenajú, že výroba energie na mieste v mestských oblastiach zriedka prekročí 5 % celkového dopytu v budovách. Počiatočné využívanie bolo závislé od dotácií, ale potreba ich využívania sa znížila s poklesom cien. Zatiaľ čo mnohé nové budovy v rozvinutých krajinách zahŕňajú určitú výrobu energie z obnoviteľných zdrojov, v celom fonde budov stále existuje značná príležitosť na zvýšenie jej využívania.

6.2 Prechod na nulové čisté emisie uhlíka v praxi – ponuka a dopyt

Druhou časťou transformácie je strana ponuky – energetická infraštruktúra sa musí preorientovať na výrobu bez fosílnych palív. Kritickým prvkom celkovej transformácie hospodárstva je rovnováha medzi ponukou a dopytom. Na strane ponuky to znamená rýchly nárast kapacity obnoviteľných zdrojov, čo umožňuje postupné ukončenie výroby energie z fosílnych palív a zároveň naďalej uspokojuje dopyt. Prenosové siete sa musia transformovať spolu s výrobou. Elektrina je jednoznačne veľkou súčasťou riešenia, ale úlohu bude hrať aj transformácia plynových sietí – a lokálnejšie aj diaľkového vykurovania.

a) Medzinárodný prehľad

S niekoľkými významnými výnimkami sa energetická infraštruktúra vo väčšine krajín stále spolieha predovšetkým na fosílné palivá. Dlhodobé plány prechodu sa medzi jednotlivými krajinami líšia a sú predmetom národných záväzkov na konferenciách OSN o zmene klímy.

Národné plány prechodu sa líšia predovšetkým na základe prírodných zdrojov. Krajiny s výrazným pobrežím často dokážu využívať veterné zdroje a tie s vysokou úrovňou ročného slnečného svitu môžu využívať solárnu energiu. Island využíva geotermálnu energiu na výrobu väčšiny svojej energie. Plány tiež zohľadňujú prerušované dodávky energie a otázky energetickej bezpečnosti.

b) Obstarávanie energie z obnoviteľných zdrojov

Vo všeobecnosti je národná politika mimo kontroly väčšiny spoločností, ale prechod na nulové emisie na strane ponuky je kľúčovou súčasťou plánu dekarbonizácie na úrovni budovy alebo portfólia. Budovy alebo portfóliá budú musieť obstarávať 100 % obnoviteľnej energie, či už prostredníctvom vhodného tarifu za energiu, PPA alebo priameho nákupu výrobného aktíva, ktoré preukazuje doplnkovosť, aby sa mohli považovať za nulové emisie. Dostupnosť a finančná životaschopnosť týchto možností sa líšia v závislosti od krajiny. V mnohých krajinách bol dopyt po energii z obnoviteľných zdrojov historicky relatívne nízky, čo viedlo k nízkym prémieam za tarify za obnoviteľné zdroje alebo PPA.

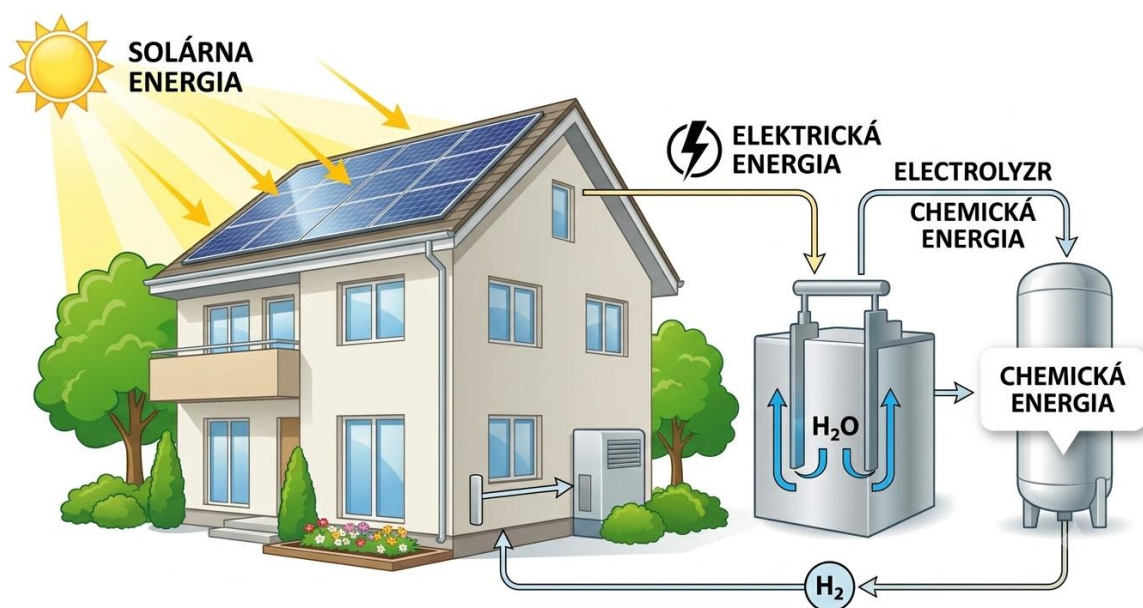
c) Rast dopytu po obnoviteľnej energii

Existujú určité náznaky, že dopyt po obnoviteľnej energii rastie. To následne zvyšuje ceny. Napríklad cena uhlíkových kreditov v systéme obchodovania s emisiami Európskej únie (EU ETS) nedávno prudko vzrástla, čo naznačuje prebytok dopytu nad ponukou. Všeobecne sa očakáva, že s blížiacim sa rokom 2030 – dátumom, ktorý si mnohé popredné spoločnosti stanovili na dosiahnutie nulových čistých emisií – dopyt po obnoviteľnej energii a teda aj cena obnoviteľnej energie začne prudko rásť. Z dlhodobého hľadiska by to mala byť dobrá správa, pretože to zlepší životaschopnosť novej výroby energie z obnoviteľných zdrojov a stane sa tak faktorom urýchlenia jej rozvoja spolu s trendom znižovania nákladov. To si však vyžaduje dlhodobé riadenie, aby sa predišlo prudkému nárastu cien obnoviteľnej energie, ktorý by znemožnil dosiahnutie nulových čistých emisií pre niektoré organizácie a lokality. Vláda zohráva kľúčovú úlohu v udržiavaní cenovej stability a dostupnosti a zabezpečení udržiavania prechodu na správnej ceste.

7. Prehľad dostupných technológií pre budovy s nulovými emisiami uhlíka a energetickou bilanciou

7.1 Obnoviteľné zdroje energie

Pohodlné životné podmienky v domoch, bytoch a komerčných budovách si vyžadujú zdroje elektrickej aj tepelnej energie. V 20. storočí boli najbežnejšie používané zdroje na výrobu tepla a elektriny odvodené z fosílnych palív. Tieto palivá ovplyvňovali životné prostredie nielen v miestach ťažby, ale aj počas procesu výroby energie. Kríza na trhu s fosílnymi palivami spôsobená iránskou revolúciou v roku 1979 a následné sankcie voči iránskej vývozu prinútili západné krajiny vyvinúť nové typy zdrojov energie. Zmena klímy tiež posilnila tento trend hľadania udržateľných energetických alternatív (Obr. 13).



Obr. 13 Ilustrácia domu s obnoviteľnými zdrojmi energie

Obnoviteľné zdroje energie možno rozdeliť do niekoľkých skupín:

- ✓ chemické zdroje energie,
- ✓ termogenerátory,
- ✓ fotovoltaičné panely,
- ✓ veterná energia,
- ✓ zdroje bakteriálneho pôvodu,
- ✓ vodná energia,

- ✓ biomasa,
- ✓ geotermálna energia.

Chemické zdroje energie – tieto zdroje vyrábajú elektrickú energiu prostredníctvom chemických reakcií. Jedným z najrozšírenejších chemických zdrojov je generátor poháňaný vodíkom. Generátory s vodíkovými palivovými článkami predstavujú čistú alternatívu k fosílnym palivám; ich konštrukcia je však technicky náročná kvôli vysokej reaktivite vodíka na voľnom vzduchu, najmä s kyslíkom [4].

Termogenerátory – premieňajú tepelnú energiu na elektrickú. Peltierov modul je jednou zo základných súčastí používaných pri konštrukcii termogenerátorov. Tento modul sa tiež bežne používa v lacných chladiacich zariadeniach, ako sú malé prenosné mrazničky určené na vonkajšie (kempingové) použitie. Termogenerátory majú nízky koeficient účinnosti, a preto sa vo veľkom meradle na výrobu elektrickej energie príliš nepoužívajú. Môžu však slúžiť ako doplnkový zdroj elektrickej energie v prípadoch, keď odpadové teplo nie je možné využiť na iné praktické účely [5].

Fotovoltaické panely – vyrábajú elektrinu zo svetla, najčastejšie zo slnečného žiarenia. Prvá generácia fotovoltaických článkov nebola dostatočne účinná na široké využitie. Tieto články boli vyvinuté predovšetkým pre zariadenia vysielané do vesmíru, ako sú sondy a orbitálne satelity, kde je slnečného žiarenia dostatok. Výskum v oblasti chémie fotovoltaických článkov však zvýšil ich účinnosť na viac ako 30 %. Tento pokrok umožňuje výrobu väčšieho množstva elektrickej energie pri použití menšej plochy v porovnaní s fotovoltaickými článkami prvej generácie [6].

Veterná energia – tento typ energie sa v minulosti využíval v rôznych aplikáciách, vrátane plachténíc, ako aj na úlohy, ako je čerpanie vody a mletie obilia. V súčasnosti sa na tieto účely často využívajú iné zdroje energie. Veterná energia sa však naďalej využíva na výrobu elektrickej energie, hoci jej využitie je obmedzené vhodnými klimatickými podmienkami v konkrétnych geografických regiónoch. Na druhej strane môžu veterné turbíny inštalované na veľkých plochách predstavovať ekologické výzvy, najmä narušením migračných ciest ohrozených druhov vtákov. Ďalšou obavou je vplyv na životné prostredie spojený s výrobou a životným cyklom lopatiek turbín [7].

Zdroj bakteriálneho pôvodu – plastový odpad predstavuje významný environmentálny problém, ktorému sa venuje mnoho environmentálnych inžinierov a vedcov. Jedno z navrhovaných riešení

zahŕňa využitie špecifických baktérií schopných vyrábať elektrinu z plastového odpadu [8]. Hoci tento zdroj energie nestačí na napájanie zariadení s vysokou spotrebou, ako sú práčky alebo vysávače, dá sa efektívne využiť pre aplikácie s nízkou spotrebou, ako je osvetlenie, a zároveň pomáha znižovať emisie CO₂ spojené s likvidáciou plastového odpadu.

Vodná energia – voda ovplyvňuje počasie mnohými spôsobmi. Energiu z vody je možné získavať prostredníctvom priehrad, vodných nádrží alebo generátorov využívajúcich morské vlny. Vodné elektrárne si vyžadujú veľké plochy na výstavbu a značné investície do materiálu. Ide však o čistý, obnoviteľný zdroj energie s vysokým koeficientom účinnosti. Na druhej strane majú vodné elektrárne obmedzenú geografickú dostupnosť [9].

Biomasa – odpad z poľnohospodárstva a drevospracujúceho priemyslu možno efektívne spracovať na výrobu tepla a elektrickej energie. Tento obnoviteľný zdroj energie pomáha znižovať emisie skleníkových plynov a zmierňovať ďalšie negatívne vplyvy na životné prostredie. Výroba energie z biomasy však zostáva nákladná a nevhodné poľnohospodárske politiky by mohli vytvoriť výzvy pre potravinársky priemysel kvôli vyššej ziskovosti pestovania plodín na biomasu namiesto potravín [10].

Geotermálna energia – ide o jeden z najefektívnejších obnoviteľných zdrojov tepelnej energie. Teplo získané zo Zeme sa pomocou termogenerátorov dá tiež premeniť na elektrickú energiu. Využitie geotermálnej energie je však obmedzené geografickou dostupnosťou a počiatočné investície potrebné na výstavbu geotermálnych energetických systémov sú relatívne vysoké [11]. Okrem priameho využitia na vykurovanie budov a ohrev vody je možné využiť geologické podmienky aj na realizáciu vylepšených geotermálnych systémov. Táto energia ponúka jedinečnú výhodu v podobe stability, keďže je k dispozícii nepretržite, nezávisle od počasia. Súčasne prispieva k znižovaniu emisií skleníkových plynov a celkovému prechodu k trvalo udržateľným energetickým riešeniam.

Tab. 1 SWOT analýza technológií obnoviteľných zdrojov energie

Zdroj energie	Silné stránky	Slabé stránky	Príležitosti	Hrozby
Chemicko-energetické zdroje	Vysoká intenzita energie, regulovateľný výstup	Komplexné skladovanie,	Rozvoj bezpečného skladovania a	Obavy o verejnú bezpečnosť, drahá výroba

		bezpečnostné riziká, vysoké náklady	ekologického vodíka	
Termogenerátory	Jednoduché, spoľahlivé, bez pohyblivých častí	Veľmi nízka účinnosť, nákladné materiály	Využitie odpadového tepla, vylepšenia pomocou nanomateriálov	Konkurencia zo strany efektívnejších technológií
Fotovoltaické panely	Čisté, škálova teľné, rýchlo sa zvyšujúca účinnosť	nezávislé, vyžadujú veľkú plochu	Integrácia do budov (BIPV), zníženie nákladov	Odpad a recyklácia, skrátenie životnosti
Veterná energia	Vypelá, nízke prevádzkové náklady, vysoký potenciál	Prerušovaná výroba, vizuálny/hlukový vplyv	Morské veterné parky, hybridné systémy	Vplyv na životné prostredie vplyv na faunu, vysoké investičné náklady
Bakteriálneho pôvodu	Využívajú plastový odpad, čistú energiu v malom meradle	Veľmi nízky výstup, technologické firmy v ranom štádiu	Integrácia so spracovaním odpadu, zníženie emisií CO ₂	Náročné rozšírenie, nákladná údržba
Vodná energia	Vysoká účinnosť, stabilný výkon, dlhá životnosť	Vysoké náklady na výstavbu, vplyv na životné prostredie	Modernizácia priehrad, mikro-vodné elektrárne	Klimatické, sedimentácia, poškodenie ekosystémov
Biomasa	Obnoviteľné zdroje, využitie odpad, uhlíkovo neutrálne	Konkuruje s potravinami, náročné na pôdu	Biopalivo a vývojom bioplynu	Odlesňovanie, vysoké logistické náklady
Geotermálna energia	Konštantná, efektívna, nízke emisie	Geograficky obmedzená, nákladné vŕtanie	Hlboké vŕtanie, inovácie hybridných systémov	Geologické riziká, vysoké počiatočné investície

7.2 Skladovanie energie

Elektrická a tepelná energia majú obmedzenia, pokiaľ ide o skladovanie. Elektrickú energiu nie je možné efektívne skladovať po dlhú dobu. Určité technické riešenia umožňujú premeniť a skladovať elektrickú energiu v mechanickej forme. Premena jednej formy energie na druhú však vždy so sebou prináša určité straty. Tepelnú energiu je možné skladovať efektívnejšie ako

elektrickú energiu, ale jej skladovacia kapacita a efektívnosť závisia od technického riešenia izolácie systému pred vonkajšími vplyvmi. V tejto časti sa zaoberáme dostupnými technológiami skladovania energie.

Skladovanie tepla

Skladovanie tepla nám pomáha udržiavať teplotu po určitú dobu. Tento druh skladovania možno rozdeliť do dvoch kategórií:

- ✓ krátkodobé,
- ✓ dlhodobé.

Krátkodobé ukladanie tepla – tento typ ukladania udrží teplotu po dobu jedného až dvoch dní. Vďaka nízkym nákladom na výstavbu a priaznivým tepelným vlastnostiam vody sa ako systémy krátkodobého ukladania tepla široko používajú vodné bojler. Jedným z obmedzení vody je však to, že jej fyzikálne vlastnosti sa menia so zmenami tlaku a teploty, ktoré súvisia so špecifickým objemom uskladnenej vody [12].

Dlhodobé akumulovanie tepla – tento typ akumulácie dokáže udržať teplotu po dobu jedného mesiaca alebo aj dlhšie. Na tento účel boli navrhnuté pieskové tepelné batérie. Pri vhodnej konštrukcii môžu takéto tepelné batérie uchovávať tepelnú energiu po dobu niekoľkých mesiacov, čím sa znižujú prevádzkové náklady obytných domov a budov. Hlavným obmedzením tejto technológie akumulácie sú vysoké počiatkové investície potrebné na jej výstavbu a inštaláciu [13].

Elektrické ukladanie

Systémy elektrického ukladania možno rozdeliť do dvoch hlavných kategórií: elektrochemické a mechanické. Elektrochemické systémy ukladania sú dobíjateľné batérie. Majú vysoký koeficient účinnosti, ale obsahujú kritické kovy, ako je lítium a kobalt. Ťažba týchto kovov spôsobuje početné environmentálne problémy, vrátane degradácie pôdy a znečistenia vodných zdrojov.

Systémy mechanického ukladania energie možno rozdeliť do viacerých skupín, medzi ktoré patria gravitačné a gyroskopické (zotrvačnickové) batérie, z ktorých každá má odlišnú konštrukčnú konfiguráciu. Gravitačné batérie využívajú prebytočnú energiu (napríklad zo solárnych panelov) na zdvihnutie ťažkých betónových blokov do určitej výšky. Keď je potrebná elektrická energia, tieto bloky sa spustia nadol, čím sa uvoľní uložená potenciálna energia, ktorá sa opäť premení na elektrinu. Hlavný princíp fungovania je založený na využívaní mechanickej potenciálnej energie [14]. Naopak, gyroskopické batérie, ako sú zotrvačníky, ukladajú energiu vo forme mechanickej kinetickej energie. Prebytočná energia sa využíva na zrýchlenie rotujúcej hmoty na jej maximálnu

rýchlosť, čím sa dosiahne maximálna kinetická energia. Keď je potrebná elektrina, rotačný pohyb zotrvačníka sa spája s generátorom na výrobu elektrickej energie [15].

7.3 Kategorizácia budov podľa energetickej náročnosti a jej výpočet

Budovy počas svojho celého životného cyklu sa významne podieľajú na spotrebe energie a materiálov. Životný cyklus užívania budov závisí od architektonického návrhu, umiestnenia v teréne a stavebných alebo izolačných materiálov. Nevhodný typ konštrukcie zvyšuje nároky na vykurovanie alebo chladenie budovy. Spôsobuje to zvýšenú spotrebu elektrickej alebo tepelnej energie. Udržateľné stavby si vyžadujú analýzu mikroklimy vybraného terénu na účely návrhu a výstavby budovy. Ak sa táto analýza zohľadní, budova výrazne zníži energetické nároky, ktoré možno analyzovať prostredníctvom rôznych ukazovateľov, ako je napríklad intenzita spotreby energie (Energy usage intensity, EUI). EUI je definovaná ako:

$$EUI = \frac{E}{A \cdot t} \left[\frac{kWh}{m^2 \cdot rok} \right]$$

kde:

E = energia

A = plocha

t = čas

Ďalším ukazovateľom je intenzita dopytu po tepelnej energii (TEDI), definovaná takto:

$$TEDI = \frac{Q_{\text{vykurovanie/chladenie}}}{A \cdot t} \left[\frac{kWh}{m^2 \cdot rok} \right]$$

$Q_{\text{vykurovanie/chladenie}}$ = energia na vykurovanie alebo chladenie budovy

Rozdiel medzi TEDI a EUI spočíva vo využívaní energie. V prípade ukazovateľa EUI je zahrnutá energia použitá na osvetlenie, elektrické zariadenia, ohrev vody a udržiavanie teploty v obytných priestoroch. TEDI je energia určená výlučne na udržiavanie teploty v obytných priestoroch.

Uvedené ukazovatele merajú druh energetickej spotreby. Existujú aj ukazovatele pre výrobu energie v budovách z obnoviteľných zdrojov energie. Výroba energie z obnoviteľných zdrojov (REG) sa meria v kWh/m².rok, čo je rovnaká jednotka ako pre EUI a TEDI. Výpočet tejto hodnoty závisí od zdroja energie. Ak porovnáme spotrebovanú a vyrobenú (z obnoviteľných zdrojov) energiu E, môžeme vypočítať ďalší ukazovateľ – čistú energetickú bilanciu (NEB). Vzorec je:

$$NEB = \sum E_{\text{spotrebovaná}} - \sum E_{\text{vyrobená}}$$

Keď vynásobíme energiu cenou za energiu, dostaneme čistú energeticko-ekonomickú bilanciu (NCEB). NCEB definuje energetickú efektívnosť budov. Výroba a spotreba energie spôsobuje emisie skleníkových plynov, ktoré sa merajú intenzitou emisií skleníkových plynov (GHG Emissions Intensity). Merná jednotka je kg CO₂/m².rok. Výpočet intenzity emisií skleníkových plynov závisí od typu každého zdroja energie.

Vzorec je:

$$\text{Intenzita GHG emisií} = \frac{\sum \text{Emisie zo všetkých zdrojov}}{A \cdot t}$$

kde:

$$\text{Emisie} = E \cdot \text{Emisný faktor zdroja energie}$$

Na základe týchto ukazovateľov môžeme budovy rozdeliť do nasledujúcich skupín. **Budovy s takmer nulovou spotrebou energie** (NZEnB), kde je NEB blízko nuly, ale v nízkych záporných hodnotách. Existujú budovy s významnou vlastnou výrobou E z obnoviteľných zdrojov, ale tieto budovy stále musia využívať časť E z verejných sietí. Energia z obnoviteľných zdrojov však výrazne znižuje intenzitu emisií skleníkových plynov alebo prevádzkové náklady týchto budov. **Budovy s nulovou spotrebou energie** (ZEnB) majú vyrovnanú hodnotu NEB na úrovni nula, pretože kombinácia obnoviteľných zdrojov energie na mieste je efektívna pre prevádzkové potreby budov. Výstavba týchto budov je zriedkavá. **Pasívne budovy** sú budovy, pre ktoré je $Q_{\text{Vykurovanie/chladenie}}$ blízko nuly alebo má hodnotu nula. Znižujú prevádzkové náklady, ale na elektrické zariadenia a osvetlenie používajú dodávanú elektrickú energiu z verejnej siete. Budovy s nulovými emisiami (ZEmB) sú budovy postavené z prírodných, alebo recyklovaných materiálov, ktoré na svoju prevádzku využívajú energiu z čistých zdrojov, vrátane dodávanej energie z verejných sietí. **Budovy s nulovými nákladmi na energiu** (ZEnCB) sú budovy, v ktorých je hodnota NCEB nulová. Budovy ZEnCB vyrábajú energiu z obnoviteľných zdrojov vo vhodnom ročnom období (napríklad v lete pomocou solárnych panelov), aby zhodnotili energiu a zisk použili na nákup energie v čase, keď obnoviteľné zdroje energiu nevyrábajú [18]. **Budovy s prebytkom energie** (PEnB) sú budovy s kladnou hodnotou NEB.

Na základe prípadových štúdií uvedených v je možné hodnoty EUI a NEB vypočítať priamo z ročných energetických tokov a podlahovej plochy. Napríklad centrum Adam Joseph Lewis (1260 m², 160 kW FV) dosahuje odhadovanú hodnotu EUI približne 152 kWh/m².rok a čistú energetickú bilanciu blížiacu sa k nule, za predpokladu typických výnosov FV. Podobne Aldo Leopold Legacy Center (1100 m², 39,6 kW FV) vyprodukuje približne o 10 % viac elektrickej energie, než ročne spotrebuje, čím dosahuje kladnú hodnotu NEB 0,1xE spotreby, zatiaľ čo montrealský obytný dom R-2000 znižuje svoju ročnú spotrebu elektrickej energie z 24,1 MWh/rok na 13,6 MWh/rok vďaka využitiu geotermálneho tepelného čerpadla a v kombinácii s fotovoltaickým poľom o ploche 85,4 m² dosahuje čistú energetickú bilanciu (NEB) 0 [2].

Literatúra

1. P. Esmaeili, M. Rafei, M. Salari, D. Balsalobre-Lorente, From oil surges to renewable shifts: Unveiling the dynamic impact of supply and demand shocks in global crude oil market on us clean energy trends, *Energy Policy* 192, 114252 (2024).
2. L. Tkáč, F. Schauer, Ž. Gerháťová, Chemical energy sources transformations by remote experiment, *International Journal of Online Engineering (iJOE)* 10, 35 (2014).
3. [5] M. Neska, M. Mrozek, A. Majcher, Modular thermoelectric conversion system for low-temperature thermal energy, in *E3S Web of Conferences (EDP Sciences, 2025)*, Vol. 636, p. 050028 *E3S Web of Conferences* 667, 01002 (2025) AEE2025
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202566701002>
4. P.K. Nayak, S. Mahesh, H.J. Snaith, D. Cahen, Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art, *Nature Reviews Materials* 4, 269 (2019).
5. A.M. Foley, P.G. Leahy, A. Marvuglia, E.J. McKeogh, Current methods and advances in forecasting of wind power generation, *Renewable energy* 37, 1 (2012).
6. K.P. Garrett, R.A. McManamay, A. Witt, Harnessing the power of environmental flows: Sustaining river ecosystem integrity while increasing energy potential at hydropower dams, *Renewable and sustainable energy reviews* 173, 113049 (2023).
7. N.E. Benti, G.S. Gurmesa, T. Argaw, A.B. Aneseyee, S. Gunta, G.B. Kassahun, G.S. Aga, A.A. Asfaw, The current status, challenges and prospects of using biomass energy in ethiopia, *Biotechnology for Biofuels* 14, 209 (2021).
8. R. Rohit, D.C. Kiplangat, R. Veena, R. Jose, A. Pradeepkumar, K.S. Kumar et al., Tracking the evolution and charting the future of geothermal energy research and development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 184, 113531 (2023).
9. N. Kanojia, S. Kaushik, S. Ali, A. Joshi, S. Singh, A. Kumar, B.K. Rewani, P.K. Gupta, S. Alam, Review on sustainable thermal energy storage technology with packed bed regenerator, *Neuro Quantology* 20, 2324 (2022).
10. P. Niksiar, C. Rogillio, H. Torab, S. Tiari, Experimental study of a silica sand sensible heat storage system enhanced by fins, *Energies* 17, 5402 (2024).
11. M.E. Amiryar, K.R. Pullen, A review of flywheel energy storage system technologies and their applications, *Applied Sciences* 7, 286 (2017). S. Deng, R. Wang, , Y. Dai, How to evaluate performance of net zero energy building—a literature research, *Energy* 71, 1 (2014)
12. M. Kapsalaki, V. Leal, Recent progress on net zero energy buildings, *Advances in Building Energy Research* 5, 129 (2011).

8. Prípadové štúdie

8.1 Kvantifikácia prevádzkových GHG emisií administratívnych budov – porovnanie biosolárnej strechy s konvenčnou strechou

Jedným z progresívnych konštrukčných riešení, ktoré reagujú na environmentálne výzvy a legislatívne záväzky EÚ vedúce k znižovaniu uhlíkovej stopy, je biosolárna strecha – konštrukčný systém, ktorý kombinuje vegetačnú vrstvu (napr. extenzívnu zeleň) so solárnymi fotovoltickými panelmi. Tento hybridný prístup umožňuje súčasne znížiť tepelné zaťaženie budovy, zadržiavať dažďovú vodu, podporovať biodiverzitu a zároveň vyrábať obnoviteľnú energiu [1-3]. Na druhej strane však prináša vyššiu materiálovú a technologickú náročnosť v počiatočných fázach životného cyklu, čo môže znamenať aj vyšší globálny environmentálny dopad vo fáze výroby. Na komplexné posudzovanie vplyvov technických systémov na životné prostredie počas celého ich životného cyklu, od výroby až po likvidáciu, bola využitá metodika LCA. Prostredníctvom LCA je možné identifikovať fázy životného cyklu s najvyššou záťažou na životné prostredie a porovnávať rôzne typy strešných systémov, ako sú tradičné strechy, zelené alebo hybridné strechy [4, 5]. Pre objektívne posúdenie prínosu biosolárnej strechy je však nevyhnutné vykonávať LCA na úrovni celej budovy a pracovať s reálnou prevádzkovou energiou, aby bolo zrejmé, do akej miery výroba elektriny z fotovoltických panelov (PV) a úspory v prevádzke vyvážia vyššiu úvodnú materiálovú záťaž [3, 6].

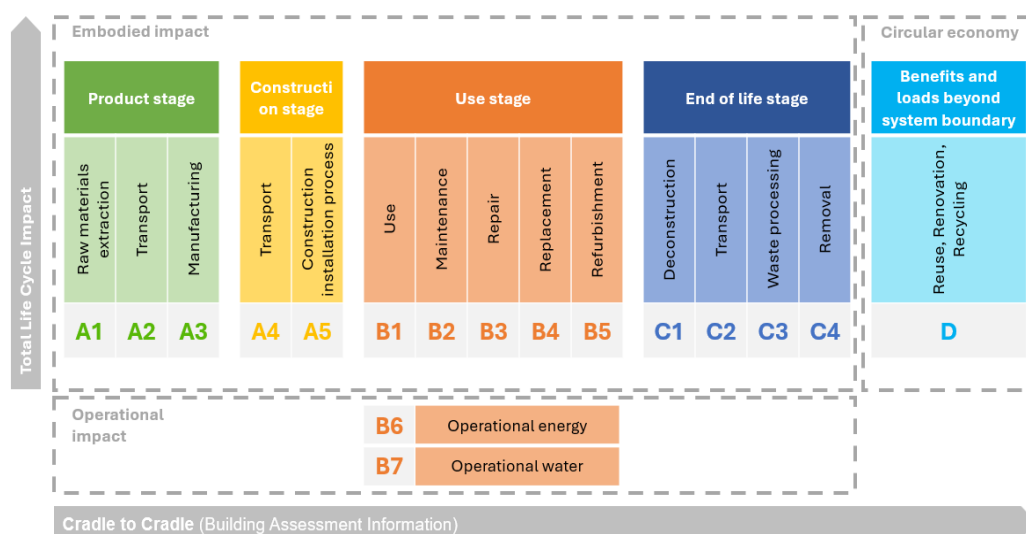
Cieľom analýzy je porovnať environmentálnu hospodárnosť dvoch administratívnych budov s konvenčnou a biosolárnou strechou pomocou LCA hodnotenia. Hlavným indikátorom je potenciál globálneho otepľovania (GWP), so zameraním na vzťah medzi fázou výroby, prevádzkou a prínosmi recyklácie. Analýza skúma, do akej miery môžu energetické úspory a recyklačný potenciál vyvážiť vyššiu záťaž biosolárnej strechy. Výsledky prinášajú poznatky pre navrhovanie udržateľných budov v kontexte klimatických cieľov.

8.1.1 Metodika

Hodnotenie životného cyklu (LCA) je zamerané na environmentálny vplyv dvoch administratívnych budov počas 60 rokov v rámci hraníc „Od kolísky po kolísku“, zahŕňajúc výrobu materiálov, dopravu, výstavbu, fázu používania (vrátane údržby a prevádzky solárnych panelov) a fázu konca životnosti. Hodnotené administratívne budovy sú situované na Slovensku a sú označené ako B1 a B2. Budova B1 má biosolárnu strechu a B2 konvenčnú strechu. Hrubá podlahová plocha budovy B1 je 18 991,1 m² a B2 15 874,0 m². V LCA analýze je vo fáze používania

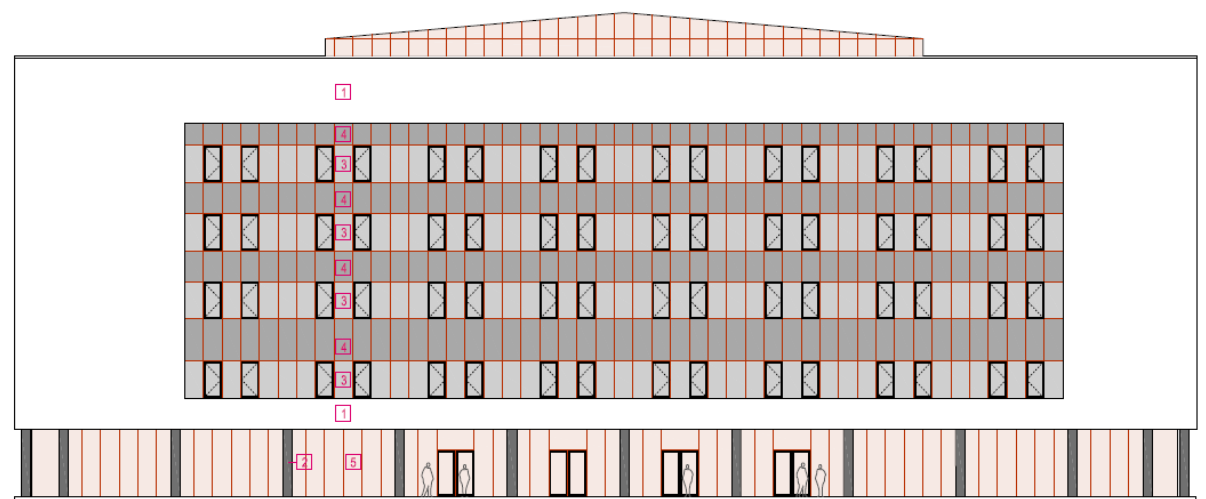
zohľadnená reálna prevádzková spotreba energie a vody. Environmentálne dopady vyjadrené na 1 m² hrubej podlahovej plochy sú kvantifikované pomocou softvéru OneClickLCA (OCL).

V tejto kapitole sú analyzované indikátory globálneho otepľovania (GWP), a to GWP-celkový, GWP-fosílny, GWP-biogénny a GWP-LULUC. Cieľom tejto prípadovej štúdie administratívnych budov je poukázať na vplyv biosolárnej strechy z hľadiska environmentálnych dopadov po dobu životného cyklu. Fázy životného cyklu sú zobrazené na obrázku 14 a posudzované budovy na obrázku 15. Stavebné materiály použité v administratívnych budovách sú zhrnuté v tabuľke 2.



Obr. 14 Hranice systému zahrnuté do analýzy LCA





Obr. 15 Pohľady na vybrané administratívne budovy

Tab. 2 Materiály použité v administratívnych budovách

	Budova 1 (B1)	Budova 2 (B2)
Základy	Železobetón	Železobetón
Vertikálne konštrukcie – nosné	Železobetónový skelet, tehlové steny	Železobetónový skelet, pórobetónové steny
Vertikálne konštrukcie – nenosné	Sadrokartónové a presklené steny	Sadrokartónové a presklené steny
Vodorovné konštrukcie	Železobetónová doska	Železobetónová doska
Povrchové úpravy	Vápenná omietka, akrylová farba	Sadrová a silikónová omietka, akrylová farba
Strecha	Železobetónová doska, rozsiahly podklad	Železobetónová doska, PVC strešná krytina
Tepelná izolácia	EPS, XPS, kamenná vlna, minerálna vlna, PIR	EPS, XPS, minerálna vlna, PIR
Izolácia proti vode a vlhkosti	PE, PVC-P	asfaltové pásy, PVC-P, PE, HDPE
Výplne okien a dverí	transparentná fasáda	transparentná fasáda

8.1.2 Výsledky a diskusia

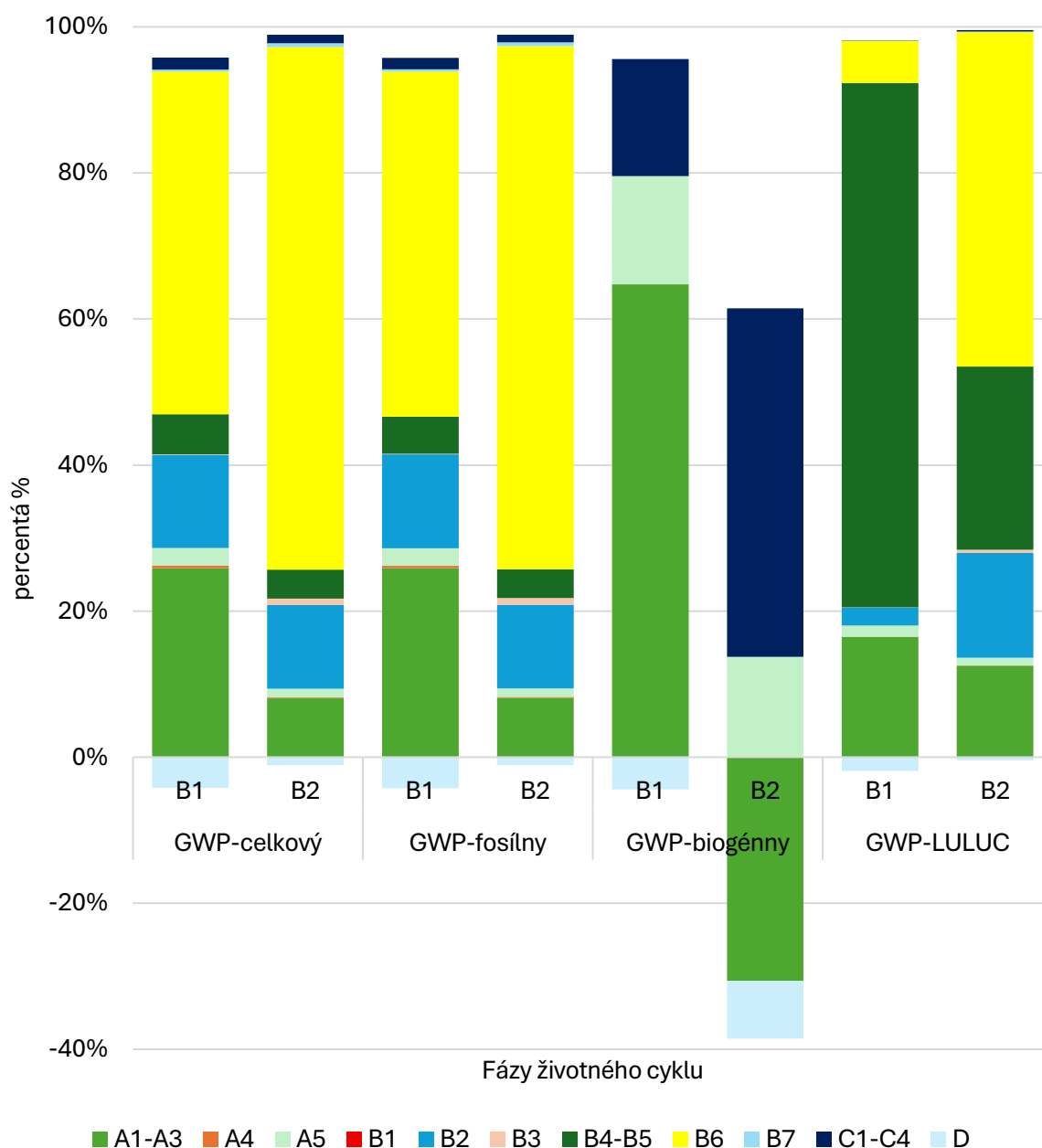
Na základe výsledkov LCA analýzy, má budova s biosolárnou strechou (B1) vyššiu celkovú hodnotu GWP ($2,77\text{E}+07 \text{ kg CO}_{2\text{e}}$) v porovnaní s budovou s konvenčnou strechou (B2) ($2,66\text{E}+07 \text{ kg CO}_{2\text{e}}$). Emisie z fosílnych zdrojov vyjadrené indikátorom GWP-fosílny dominujú v oboch prípadoch, ale v prípade budovy B1 s biosolárnou strechou je GWP-biogénny ($5,38\text{E}+04 \text{ kg CO}_{2\text{e}}$) takmer dvojnásobne vyšší ako v prípade B2, a to z dôvodu na vegetácie na streche. Výsledky pre GWP vyjadrené na 1 m^2 hrubej podlahovej plochy sú uvedené v tabuľke 3 a znázornené na obrázku 3 pre jednotlivé fázy životného cyklu. Budova B1 vykazuje nižšiu hodnotu GWP-fosílny ($1457,35 \text{ kg CO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$) ako budova B2 ($1673,74 \text{ kg CO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$), pričom GWP-fosílny tvorí viac ako 99% z GWP-celkový.

Tab. 3 Výsledky indikátorov vplyvov na 1 m^2 podlahovej plochy

Indikátory dopadov	Jednotka	B1	B2
GWP-celkový	$[\text{kgCO}_{2\text{e}}/\text{m}^2]$	$1,47\text{E}+03$	$1,68\text{E}+03$
GWP-fosílny	$[\text{kgCO}_{2\text{e}}/\text{m}^2]$	$1,46\text{E}+03$	$1,67\text{E}+03$
GWP-biogénny	$[\text{kgCO}_{2\text{e bio}}/\text{m}^2]$	$2,84\text{E}+00$	$1,40\text{E}+00$
GWP-LULUC	$[\text{kgCO}_{2\text{e}}/\text{m}^2]$	$9,42\text{E}+00$	$1,62\text{E}+00$

Analýza všetkých ukazovateľov GWP na obrázku 16 ukazuje, že spotreba prevádzkovej energie (B6) má najvýznamnejší vplyv na potenciál globálneho otepľovania, ktorý predstavuje približne 58,7 % z celkového vplyvu s hodnotou $1,21\text{E}+03 \text{ kg CO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$ pre budovu B2 a $7,13\text{E}+02 \text{ kg CO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$ pre budovu B1. Nasleduje údržba (B2) s podielom 9,4 % a fáza produktu (A1-A3) s podielom 6,6 %. Ostatné fázy prispievajú v menšej miere. Väčšina emisií (viac ako 99 %) pochádza z fosílnych zdrojov, zatiaľ čo príspevok biogénneho uhlíka (GWP-biogénny) a emisií spojených s využívaním krajiny a zmenou vo využívaní krajiny (GWP-LULUC) je zanedbateľný. Pozitívnym zistením je, že prínosy a záťaže mimo hranice systému (modul D) tvoria približne 0,9 % celkového vplyvu, čo naznačuje potenciál recyklácie a energetického zhodnocovania. Na základe analýzy GWP-fosílny je možné konštatovať, že budova B2 má výrazne nižšie emisie $\text{CO}_{2\text{e}}$ vo fáze produktu a výstavby (fáza A1-A5) s hodnotou $138 \text{ kg CO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$ v porovnaní s budovou B1 ($394 \text{ kg CO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$). To svedčí o výbere environmentálne vhodnejších materiálov. Naopak, budova B1 má oveľa nižšie emisie $\text{CO}_{2\text{e}}$ z prevádzkovej spotreby energie (modul B6) s hodnotou $713 \text{ kg CO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$, zatiaľ čo budova B2 má až $1211 \text{ kg CO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$, čo je rozdiel vyšší ako 40 %. Na základe tohto výsledku je B1 vhodnejšia

z hľadiska životného cyklu, keďže prevádzkové emisie tvoria dominantnú časť celkových emisií GWP. Hoci obe budovy uvažujú s recykláciou materiálov, budova B1 vykazuje väčšie prínosy, a to to 71%. Z hľadiska použitých stavebných materiálov je možné skonštatovať, že betón spôsobuje najviac emisií CO_{2e} v budove B1 (56,1 %) a presklená fasáda spôsobuje 34,7 % emisií v budove B2. Nasleduje cement (21,4 %) a presklená fasáda (10,3 %) v budove B1 a betón (19,9 %) v budove B2.



Obr. 16 Výsledky v percentách pre ukazovatele GWP

Výsledky LCA ukazujú, že budova B1 s biosolárnou strechou je v prevádzkovej fáze oveľa energeticky úspornejšia ako budova B2. Rozdiel v hodnote GWP-fosílny pre modul B6 je až o 500

kg CO_{2e}/m² za 60 rokov nižší v prospech budovy B1. Tento výsledok jasne potvrdzuje, že integrácia fotovoltických panelov na biosolárnej streche má významný pozitívny vplyv na zníženie prevádzkových emisií skleníkových plynov. Hoci biosolárna strecha môže mať vyššie dopady vo fáze produktu (A1-A3), výrazné úspory vo fáze prevádzkovej energie (B6) pravdepodobne prevážia túto počiatočnú nevýhodu počas celého životného cyklu budovy. Hodnotenie GWP-biogénny ukazuje, že biogénny uhlík má relatívne malý vplyv na GWP- celkový pre obidve budovy. GWP-biogénny vo fáze produktu (A1-A3) je 1,93 kg CO_{2e}/m² pre budovu B1. Naopak, budova B2 má negatívnu hodnotu -1,39 kg CO_{2e}/m² vo fázach A1-A3 vďaka použitiu väčšieho množstva drevotrieskových dosák. Celkovo sú však tieto hodnoty zanedbateľné v porovnaní s emisiami z fosílnych palív, čo potvrdzuje, že hlavným zdrojom emisií je energetická náročnosť prevádzky budov.

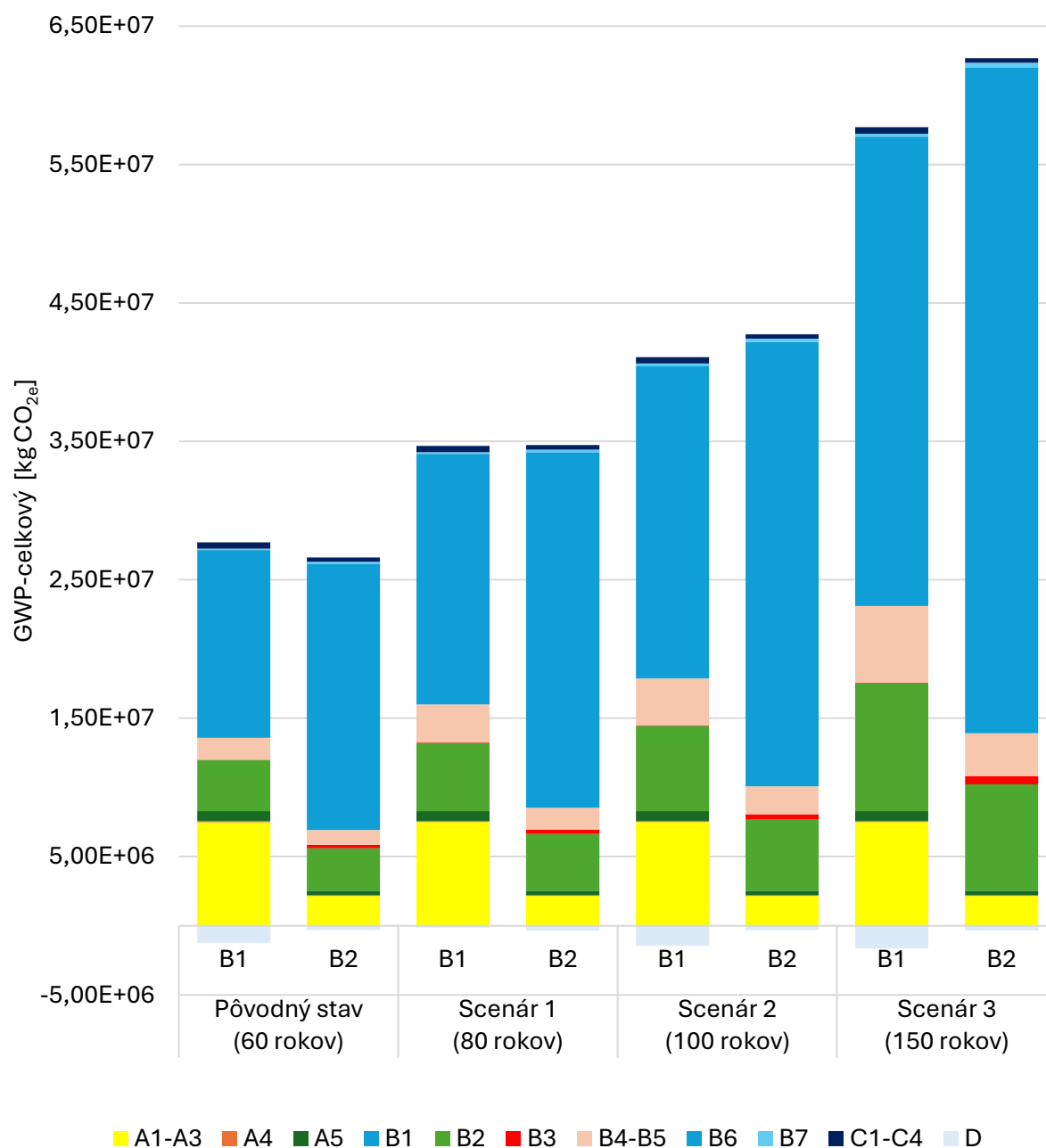
8.1.3 Analýza scenárov

Analýza scenárov je zameraná na dobu životnosti, pričom sa analyzovali dopady po dobu 60, 80, 100 a 150 rokov. Z výsledkov na obrázku 17-18 vyplýva, že prevádzková fáza (B6) je najcitlivejšia na predĺženie životnosti a dominuje celkovým emisiám, zatiaľ čo fáza produktu a výroby (A1-A5) zostáva samozrejme konštantná.

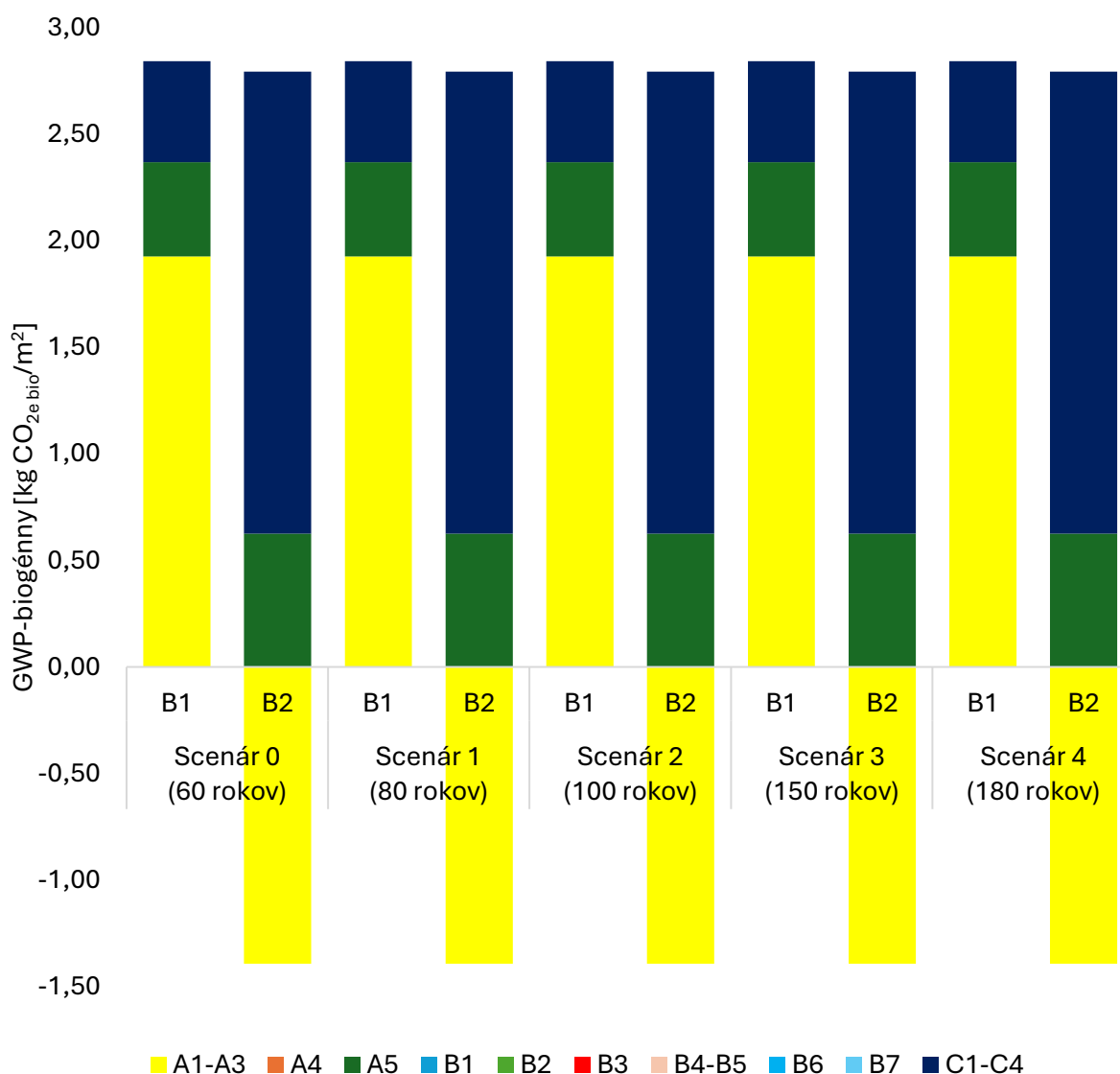
Budova B1 má vyššie počiatočné dopady (A1-A5), no vďaka fotovoltickým panelom dosahuje nižšie hodnoty GWP-fosílny počas prevádzky, zatiaľ čo B2 je náchylnejšia na nárast prevádzkových emisií. Pri uvažovaní doby životnosti 150 a 180 rokov pre budovu B1 je nárast GWP-fosílny v moduloch B4-B5 o takmer 72% a 77% v dôsledku viacnásobnej výmeny zabudovaných materiálov v závislosti od ich životnosti (15-60 rokov). V prípade budovy B2 je tento nárast o 65% a 72% po 150 a 180 rokoch. Nárast GWP-fosílny v moduloch B6 je o 60% a 67% po 150 a 180 rokoch pre obidve budovy. Tento nárast je rovnaký pre obidve budovy z dôvodu rovnakého charakterizačného faktora (CF) pre elektrinu (0,2 kg CO_{2e}/kWh pre rok 2022). Limitujúcim faktorom tejto štúdie je, že sa uvažuje s konštantou hodnotu CF pre referenčnú prevádzkovanú životnosť budovy. GWP-fosílny s uvažovaním všetkých fáz životného cyklu po 180 rokoch je 3470,45 kg CO_{2e}/m² (budova B1) a 4682,26 kg CO_{2e}/m² (budova B2), čo predstavuje 60% a 65% nárast oproti výsledkom po 60 rokoch životnosti budov. V prípade demolácie budov po 60 rokoch a následnej výstavby nových budov by dopady predstavovali hodnoty GWP-fosílny 4174,38 kg CO_{2e}/m² (budova B1) a 4966,77 kg CO_{2e}/m² (budova B2), čo predstavuje 17% (B1) a 6% (B2) rozdiel v dopadoch v porovnaní s predĺžením životnosti budov na 180 rokov.

Tento výsledok poukazuje na význam zvýšenia doby životnosti budov oproti demolácii a následnej výstavby nových budov. Štúdia potvrdzuje, že energetická efektívnosť, obnoviteľné zdroje a

recyklácia sú kľúčové pre udržateľné budovy, pričom biosolárna strecha prináša dlhodobé environmentálne prínosy, ktoré kompenzujú vyššie počiatočné environmentálne dopady.



Obr. 17 Vplyv zmeny životnosti budov na GWP-fosílny



Obr. 18 Vplyv zmeny životnosti budov na GWP-biogénny

8.1.4 Záver

Analýza environmentálnych dopadov dvoch administratívnych budov, s biosolárnou strechou (B1) a s konvenčnou strechou (B2) ukázala, že budova s konvenčnou strechou (B2) má nižšie počiatkové hodnoty potenciálu globálneho otepľovania vo fáze produktu a výstavby (A1-A5), budova B1 s biosolárnou strechou je z dlhodobého hľadiska šetrnejšia k životnému prostrediu vďaka výrazne nižšej spotrebe energie počas prevádzkovej fázy. Tento rozdiel jasne potvrdzuje, že integrácia fotovoltických panelov do biosolárnej strechy má významný pozitívny vplyv na zníženie potenciálu globálneho otepľovania. Analýza citlivosti ukázala, že čím je životnosť budovy dlhšia, tým dôležitejšia je jej energetická účinnosť. Budova B2 s konvenčnou strechou je oveľa citlivejšia na nárast prevádzkových emisií CO_{2e} ako budova B1. Toto zistenie zdôrazňuje strategický význam navrhovania budov s nízkymi prevádzkovými nárokmi a využívania obnoviteľných zdrojov na dosiahnutie dlhodobých klimatických cieľov. Pozitívny prínos recyklácie, najmä v prípade budovy

B1, tiež poukazuje na potenciál cirkulárnej ekonomiky. Celkovo štúdia prispieva k argumentu, že udržateľné budovy by mali byť navrhované s dôrazom na dlhú životnosť a minimalizáciu prevádzkových emisií, ktoré predstavujú najväčšiu záťaž pre životné prostredie.

Literatúra

- [1] Fiorentin, D. P., Martín-Gamboa, M., Rafael, S., & Quinteiro, P. (2024). Life Cycle Assessment of green roofs: A comprehensive review of methodological approaches and climate change impacts. *Sustainable Production and Consumption*, 45, 598-611.
- [2] Shafique, M., Luo, X., & Zuo, J. (2020). Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. *Solar Energy*, 202, 485-497.
- [3] Lamnatou, C., & Chemisana, D. (2015). A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 264-280.
- [4] Scolaro, T.P., Ghisi, E.: Life cycle assessment of green roofs: A literature review of layers materials and purposes. *Sci. Total Environ.* 829, 154650 (2022).
- [5] Aggarwal, C., Molleti, S., Ghobadi, M.: A comprehensive review of life cycle assessment (LCA) studies in roofing industry: current trends and future directions. *Smart Cities* 7(5), 2781–2801 (2024).
- [6] Fleck, R., Gill, R., Pettit, T. J., Torpy, F. R., & Irga, P. J. (2022). Bio-solar green roofs increase solar energy output: The sunny side of integrating sustainable technologies. *Building and Environment*, 226, 109703.

8.2 Porovnanie vypočítanej a skutočnej spotreby energie v budovách v kontexte analýzy životného cyklu

Predkladaná kapitola prináša komplexné vyhodnotenie udržateľnosti piatich vybraných administratívnych objektov. Vedecko-výskumné zameranie tejto časti spočíva v integrácii metodických prístupov analýzy životného cyklu (LCA), posudzovania životných nákladov (LCC), hodnotenia obehového hospodárstva a biodiverzity, ktoré sú následne syntetizované prostredníctvom multikriteriálnej analýzy (MCA). Osobitná pozornosť je venovaná komparatívnej analýze dvoch odlišných prevádzkových režimov: scenára založeného na teoretickej (projektovanej) spotrebe energie a scenára reflektujúceho reálne namerané prevádzkové údaje. Hlavným cieľom tejto kapitoly je kvantifikovať a detailne popísať vplyv takzvanej energetickej medzery (Energy Performance Gap) na výsledné environmentálne a ekonomické ukazovatele budov. Pozornosť je sústredená predovšetkým na indikátory globálneho otepľovania (GWP-celkový, GWP-fosílny, GWP-biogénny a GWP-LULUC) v rámci hodnotenia uhlíkovej stopy celého životného cyklu. Paralelne sú posudzované finančné toky spojené s prevádzkou a údržbou v štruktúre LCC, ako aj materiálová efektívnosť, miera cirkularity a vplyv stavebného zámeru na lokálnu a globálnu biodiverzitu. Výsledkom tejto kapitoly je poskytnutie robustných podkladov pre optimalizáciu rozhodovacích procesov pri navrhovaní udržateľných budov v kontexte prechodu na nízkouhlíkové zastavané prostredie.

8.2.1 Materiály a metódy

Päť vybraných budov bolo hodnotených pomocou metódy analýzy životného cyklu (LCA – Life Cycle Assessment). Táto metóda bola využitá na posúdenie environmentálnych dopadov stavebných materiálov, konštrukčných riešení a prevádzky budov počas celého ich životného cyklu. Hodnotenie zahŕňalo celkovo desať scenárov, ktoré kombinovali vypočítanú spotrebu energie (Calculated Energy Consumption – CEC) a skutočnú spotrebu energie (Actual Energy Consumption – AEC). LCA predstavovala systematický proces zberu, analýzy a vyhodnocovania vstupov, výstupov a potenciálnych environmentálnych vplyvov spojených s výstavbou, prevádzkou a ukončením životnosti budov. Realizácia hodnotenia si vyžadovala podrobný zber údajov o materiálovom zložení stavebných konštrukcií, použitých technológiách a prevádzkových parametroch jednotlivých objektov. Súbežne s environmentálnym hodnotením bola na posúdenie ekonomických aspektov analyzovaných budov aplikovaná metóda nákladov životného cyklu (LCC – Life Cycle Costing). Táto metóda umožnila komplexne vyhodnotiť všetky náklady spojené s výstavbou, vlastníctvom, prevádzkou, údržbou a likvidáciou budov počas ich predpokladanej životnosti. Do analýzy boli zahrnuté investičné náklady, náklady na

implementáciu technických systémov, náklady na energie na základe projektovaných aj skutočne nameraných údajov, náklady na pravidelnú údržbu, opravy, obnovu stavebných prvkov, ako aj náklady súvisiace s demoláciou a nakladaním so stavebným odpadom po skončení životnosti budov. Analýza životného cyklu a celkové hodnotenie udržateľnosti boli realizované v súlade s platnými medzinárodnými normami a metodickými rámcami. Proces hodnotenia bol rozdelený do štyroch základných fáz: definovanie cieľa a rozsahu štúdie, inventarizačná analýza životného cyklu, posúdenie environmentálnych vplyvov a interpretácia výsledkov. Okrem environmentálnych a ekonomických aspektov boli do hodnotenia zahrnuté aj ukazovatele cirkularity a biodiverzity. Posúdenie cirkularity bolo zamerané na analýzu potenciálu opätovného použitia stavebných materiálov, ich recyklovateľnosti a schopnosti minimalizovať tvorbu odpadu na konci životného cyklu budovy. Hodnotenie biodiverzity sa sústredilo na interakciu budov s okolitým ekosystémom a mestským prostredím, pričom osobitná pozornosť bola venovaná intenzívnym zeleným strechám, ich druhovému zloženiu, schopnosti zadržiavať dažďovú vodu, zmierňovať efekt mestského tepelného ostrova a podporovať lokálnu biodiverzitu. Analýza životného cyklu a celkové hodnotenie udržateľnosti boli realizované v súlade s platnými medzinárodnými normami a metodickými rámcami. Proces hodnotenia bol rozdelený do štyroch základných fáz: definovanie cieľa a rozsahu štúdie, inventarizačná analýza životného cyklu, posúdenie environmentálnych vplyvov a interpretácia výsledkov. Na základe výsledkov získaných z analýz LCA, LCC, hodnotenia cirkularity a ukazovateľov biodiverzity bola následne vykonaná multikriteriálna analýza (MCA – Multi-Criteria Analysis). Jej cieľom bolo komplexne porovnať materiálové a technologické riešenia všetkých piatich budov, identifikovať rozdiely medzi projektovanými a skutočnými prevádzkovými parametrami a stanoviť optimalizačné odporúčania vychádzajúce zo súboru environmentálnych, ekonomických a sociálno-ekologických kritérií udržateľnosti. Táto analýza umožnila objektívne zhodnotiť jednotlivé alternatívy a identifikovať riešenia s najvyšším potenciálom pre udržateľnú výstavbu a prevádzku budov.

Cieľ a rozsah

Hlavným cieľom tejto štúdie je vykonať komplexné a integrované posúdenie udržateľnosti piatich vybraných budov v štyroch aspektoch: LCA, LCC, cirkularity a vplyv na biodiverzitu. Konkrétnym vedeckým a praktickým cieľom je kvantifikovať a analyzovať takzvanú energetickú medzeru. Výskum porovnáva dva rôzne scenáre pre každú z 5 budov (celkovo 10 hodnotených scenárov):

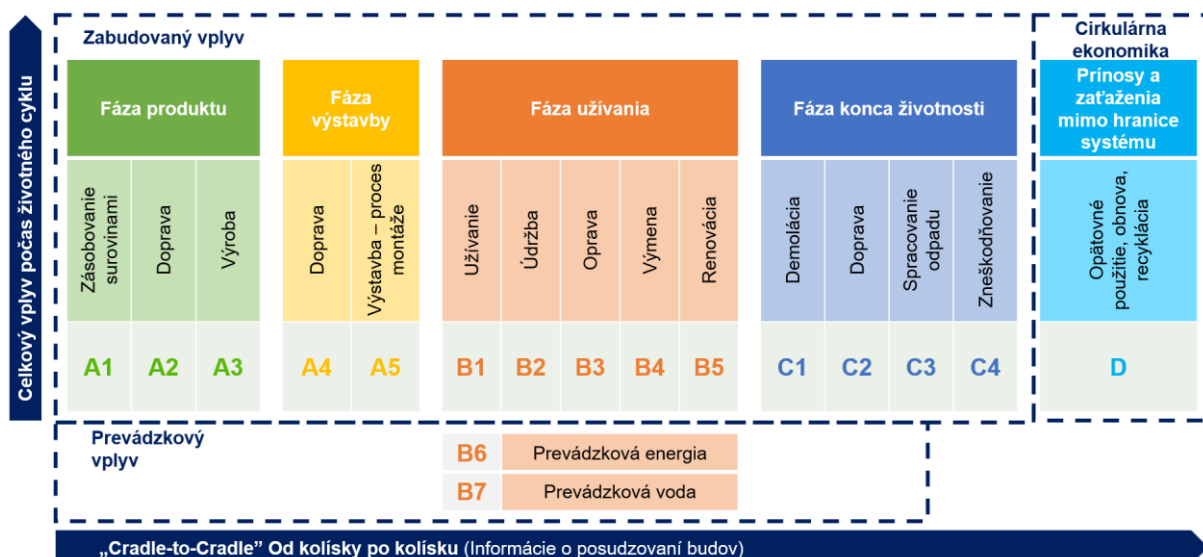
- ✓ Scenár A (vypočítaná CEC): Na základe projektovej dokumentácie a legislatívnych výpočtov spotreby energie budovy.
- ✓ Scenár B (skutočná AEC): Na základe skutočných nameraných hodnôt spotreby energie počas prevádzky budovy.

Cieľom štúdie je demonštrovať, ako tento rozdiel v spotrebe energie ovplyvňuje celkové environmentálne dopady (GWP), ekonomickú efektívnosť (LCC) a ako tieto faktory menia poradie budov v multikriteriálnej analýze (MCA), aby poskytli optimalizované odporúčania pre udržateľný návrh. Na zabezpečenie objektívnej porovnateľnosti medzi budovami rôznych veľkostí a architektonických foriem bola stanovená funkčná jednotka (FU): 1 m² hrubej podlahovej plochy (GFA) počas 50-ročného hodnotiaceho obdobia. Všetky toky materiálov, spotreba energie, environmentálne ukazovatele a finančné náklady sú normalizované a vyjadrené na jednu funkčnú jednotku. V súlade s normou EN 15978 a metodikou Level(s) je rozsah posudzovania založený na princípe „Cradle-to-Cradle“. Hranice systému zahŕňajú nasledujúce fázy životného cyklu:

- ✓ Fáza výroby a výstavby (moduly A1-A5): ťažba surovín, preprava na výrobné miesto, samotná výroba stavebných materiálov a komponentov, preprava na stavenisko a stavebné procesy (vrátane intenzívnych zelených striech).
- ✓ Fáza používania (moduly B1- B7): Emisie z používania, údržby, opráv, plánovanej výmeny komponentov s životnosťou menej ako 50 rokov (B4), prevádzkovej spotreby energie (B6) a prevádzkovej spotreby vody (B7). Práve v module B6 sa uplatňuje rozdelená analýza na vypočítanú a skutočnú (dynamickú) spotrebu.
- ✓ Koniec životnosti (EoL) (moduly C1-C4): Demontáž/demolácia, preprava odpadu, spracovanie odpadu a konečné zneškodnenie (skládkovanie/spaľovanie).
- ✓ Prínosy a vplyvy mimo hraníc systému (modul D): Potenciál opätovného použitia, recyklácie a energetického zhodnocovania materiálových tokov po demolácii, ako aj prínosy exportovanej obnoviteľnej energie vyrobenej budovou.

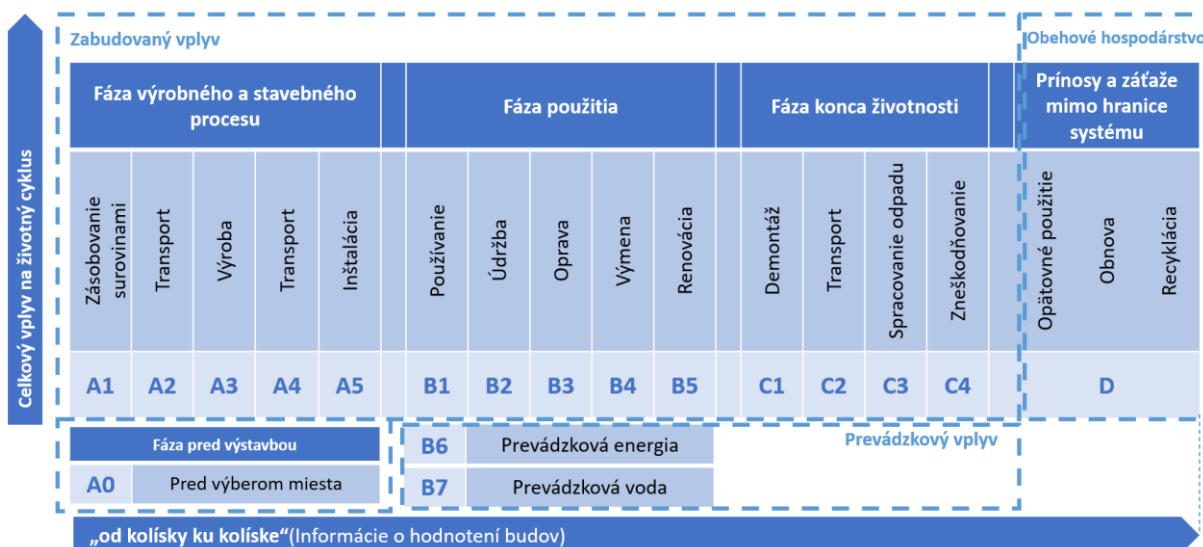
Hranice systému životného cyklu, definované štandardizovanými označeniami fáz A1 až D, sú znázornené na obrázkoch 19 a 20.

Všetky budovy sa nachádzajú v stredoeurópskej klimatickej zóne (Slovenská republika). Skutočná spotreba energie bola stanovená na základe nameraných údajov z rokov prevádzky a výsledkov dynamických simulácií, ktoré zohľadňujú aktuálne klimatické údaje. Pre materiálové toky boli použité skutočné výkazy množstiev z projektovej dokumentácie / dokumentácie skutočného stavu.



Obr. 19 Hranice systému životného cyklu (A1–D) posudzovaných budov

Environmentálne údaje pochádzajú z databázy OCL, pričom sa primárne využívajú špecifické EPD (environmentálne vyhlásenia o produkte) platné pre európsky trh a všeobecné údaje v súlade s normou EN 15804+A1/A2. Finančné náklady sa počítajú v eurách (EUR). Diskontná sadzba a miera rastu cien energie boli stanovené na jednotné hodnoty pre všetkých 10 scenárov, aby sa zabránilo skresleniu ekonomických výsledkov v analýze LCC.



Obr. 20 Hranice systému pre náklady životného cyklu (A0–C4) posudzovaných budov

Softvér

Na kvantifikáciu environmentálnych a ekonomických ukazovateľov, cirkularity a biodiverzity piatich posudzovaných budov (v scenároch CEC a AEC) bol použitý softvér OCL (verzia: 0.29.1, verzia databázy: 7.6). Tento nástroj spĺňa požiadavky medzinárodných a európskych noriem pre

LCA (ISO 14040, ISO 14044, EN 15804+A2/AC a EN 15978) a ekonomického posúdenia LCC (ISO 15686-5, EN 16627). Analýza vzájomne prepojených stavebných celkov čerpala z robustných databáz integrovaných do softvéru, ako sú Ecoinvent 3.8, One Click LCA, IBU a Ökobaudat. Konkrétny zdroj údajov priradený ku každému použitému materiálu je podrobne uvedený v doplnkovom materiáli A. Softvér OCL funguje v prísnom súlade s európskym rámcom Level(s) na posudzovanie udržateľnosti budov, ktorý pokrýva celý životný cyklus stavebných konštrukcií, je plne kompatibilný s normou EN 15978 a priamo zodpovedá kritériám taxonómie EÚ. Rámec Level(s) poskytuje jednotný metodický základ pre podávanie správ o udržateľnosti, zjednodušuje uplatňovanie princípov obehového hospodárstva a využíva kľúčové ukazovatele na meranie vplyvov uhlíkovej stopy, tokov materiálov, spotreby vody a zmeny klímy. Vďaka tejto flexibilitě umožnil v rámci tejto štúdie identifikovať kritické body udržateľnosti v riešeniach návrhu budov. Na environmentálne hodnotenie budov štúdia konkrétne použila nástroj Level(s) Life Cycle Assessment Tool (+A2), ktorý využíva údaje PEF 3.0 (Product Environmental Footprint) v súlade s normou EN 15804+A2. Metodika PEF, vyvinutá Európskou komisiou na podporu politiky udržateľnosti výrobkov, je založená na normách ISO 14040, ISO 14025, ISO 14067 a ISO 14020. Zatiaľ čo environmentálne deklarácie výrobkov (EPD typu III) slúžia na transparentné oznamovanie environmentálnych charakteristík materiálov na úrovni projektu v súlade s normou EN 15978, metodika PEF zabezpečuje prísne kvalitatívne hodnotenie a overovanie údajov. Obidve metodiky (EPD a PEF) poskytujú spoľahlivý a presný základ pre toto porovnávacie hodnotenie. Hodnotenie LCC piatich budov bolo vykonané v súlade s normami ISO 15686-5 a EN 16627. Na posúdenie environmentálnych vplyvov v rámci LCA softvér OCL implementuje metodiku CML-IA 2012 (Centrum environmentálnych vied, Univerzita v Leidene), ktorá umožňuje sledovanie všetkých kategórií vplyvov definovaných v norme EN 15804. Tento prístup je plne v súlade s európskymi trhovými normami a poskytuje spoľahlivý dátový základ pre následnú multikriteriálnu analýzu (MCA) zloženia materiálov, biodiverzity, cirkularity budov a energetických systémov. Analýza MCA bola vykonaná pomocou softvéru MCA7.

Okrem analýz LCA a LCC boli do hodnotenia piatich budov integrované špecifické kritériá týkajúce sa cirkularity a biodiverzity. Analýza cirkulárnej ekonomiky skúmala recyklovateľnosť materiálov, ich potenciál na opätovné použitie a zníženie množstva odpadu na konci životného cyklu budov. Hodnotenie biodiverzity sa uskutočnilo na dvoch úrovniach: miestnej a globálnej. Na miestnej úrovni sa zameriavalo na priamy vplyv budov na mestský ekosystém, kde kľúčovým prvkom analýzy bolo navrhované zloženie intenzívnych zelených striech a ich schopnosť podporovať miestnu faunu a mikroklima. Na globálnej úrovni bol pomocou softvéru OCL implementovaný pokročilý ukazovateľ biodiverzitého stresu z dodávateľského reťazca (Biodiversity Stress from Supply Chain). Tento ukazovateľ, plne v súlade s metodikou Level(s),

kvantifikuje potenciálny vplyv spotreby materiálov na globálnu stratu biodiverzity, pričom v rámci tohto posúdenia bola hodnotená výhradne zmena klímy (Climate Change). Hodnotenie využíva metodiku vyvinutú spoločnosťou OCL, kde sa pre analýzu uplatňujú globálne charakteristiky vplyvu zmeny klímy na biologickú rozmanitosť. Celý proces posudzovania pre európsky trh je prepojený s metodikou CML a tak integrovaná databáza, ako aj samotné environmentálne posudzovanie prísne dodržiavajú medzinárodné referenčné normy ISO 14040 (princípy a rámec pre LCA), ISO 14044 (požiadavky a usmernenia pre LCA) a EN 15804+A2 (základné pravidlá pre environmentálne vyhlásenia o stavebných výrobkoch).

8.2.2 Štatistická analýza

Multikriteriálna analýza

Na komplexné vyhodnotenie a syntézu získaných environmentálnych, ekonomických a ekologických údajov bola použitá analýza MCA. Táto metóda rozhodovania je určená na riešenie zložitých problémov, pri ktorých je potrebné súčasne posudzovať viaceré, často protichodné kritériá, ktoré nie je možné vyjadriť pomocou jednej spoločnej jednotky (Dean et al., 2020). Proces rozhodovania zahŕňa systematickú identifikáciu a výber optimálnych alternatív, pričom primárnym cieľom je dospieť k najvhodnejšiemu riešeniu pri zohľadnení rôznych determinantov a špecifických preferencií zainteresovaných strán. Tento proces sa prirodzene vykonáva v rámci špecializovaného rozhodovacieho prostredia, ktoré je štruktúrované ako komplexný súbor relevantných informácií, dostupných možností, hodnotových škál a priorít, ktoré sú explicitne prítomné v okamihu, keď sa prijíma dané rozhodnutie (Mateo et al., 2012). V tejto štúdii slúžila MCA ako kľúčový nástroj na integráciu výsledkov z rôznych oblastí udržateľnosti do jediného konzistentného hodnotiaceho rámca pre všetkých 10 scenárov (5 budov v dvoch prevádzkových režimoch). Metódy viac-kriteriálneho hodnotenia poskytujú efektívny matematický a analytický rámec, ktorý umožňuje paralelné porovnanie rôznych alternatív na základe heterogénneho súboru kritérií a ich zodpovedajúcich ukazovateľov. V kontexte tejto štúdie MCA umožnila začlenenie rôznych perspektív a subjektívnych preferencií priamo do rozhodovacieho procesu, čím sa podarilo identifikovať optimálne konštrukčné a technologické riešenie vzhľadom na vopred definované ciele udržateľnosti. Významným metodologickým prínosom tohto výskumu je paralelné uplatnenie viacerých čiastkových metód v rámci MCA, ktoré slúžili ako nástroj na krížovú validáciu a overenie robustnosti získaných výsledkov. Každý z čiastkových algoritmov pristupuje k hodnoteniu a porovnaniu desiatich navrhovaných energetických scenárov špecifickým spôsobom, pričom každý má svoje vlastné výhody a obmedzenia pre rôzne typy rozhodovacích situácií. Integrácia MCA do procesu LCA výrazne zjednodušuje interpretáciu komplexných environmentálnych výsledkov a pomáha identifikovať optimálne kompromisy

medzi environmentálnymi a ekonomickými cieľmi. Výpočet a porovnanie desiatich prevádzkových scenárov pre päť posudzovaných budov sa vykonalo pomocou špecializovaného softvéru MCA7. To umožnilo rovnako zahrnúť environmentálne vplyvy, celkové náklady, mieru recyklovateľnosti materiálov a vplyv budov na globálnu a miestnu biodiverzitu do konečného rozhodovacieho procesu.

Táto metóda zoradila všetky alternatívy a umožňuje výber najlepšej možnosti na základe toho, ako veľmi sa priblížila k ideálnej alternatíve. Analýza MCA bola vykonaná pomocou nástroja MCA7 s cieľom vybrať optimálnu budovu. Analýza MCA použila 7 ukazovateľov (GWP-celkový, GWP-fosíly, GWP-biogénny, GWP-LULUC (využitie pôdy a zmena využitia pôdy), LCC, BC (cirkularita budov) a BD (biodiverzita)) s priradenými váhami dôležitosti. Pri vytváraní rámca pre rozhodovanie bola zvolená stratégia rovnakého významu, čo znamená, že všetkým 16 hodnoteným ukazovateľom bola priradená identická váha 14,3 %. Tento neutrálny prístup eliminoval subjektívne preferencie analytika a zabezpečil vyvážený vplyv každej sledovanej kategórie na konečný výsledok udržateľnosti.

Na overenie robustnosti a stability získaných výsledkov bola následne vykonaná analýza citlivosti a neistoty. Tento krok bol nevyhnutný na identifikáciu toho, ako zmeny v preferenciách zainteresovaných strán a variabilita váh jednotlivých kritérií ovplyvňujú konečné poradie optimálnych alternatív. V rámci tejto analýzy boli simulované tri odlišné rozhodovacie modely, ktoré reflektujú rôzne strategické priority v stavebnom sektore:

- **Vyvážený model:** Tento scenár predstavuje harmonizáciu troch základných pilierov udržateľnosti (environmentálneho, ekonomického a obehového). Váhy boli prerozdelené tak, aby žiadna z kategórií nedominovala. Na rozdiel od východiskovej stratégie rovnakých váh na úrovni jednotlivých indikátorov, vyvážený model zjednotil váhy na úrovni celých tematických okruhov (napr. rovnaký podiel pre dekarbonizáciu, cirkularitu/biodiverzitu a ekonomiku), čo umožnilo hlbšie pochopenie synergií a kompromisov medzi protichodnými cieľmi. Podiel váh bol rozdelený rovnomerne 14,3% pre každý ukazovateľ.
- **Ekocentrický model:** Tento prístup kladie absolútny dôraz na environmentálne a ekologické kritériá. Výrazne vyššiu váhu získali ukazovatele globálneho otepľovania (kategórie GWP) a vplyvu na biodiverzitu (BD), zatiaľ čo ekonomické kritérium v podobe životných nákladov (LCC) bolo marginalizované. Model simuluje scenár prísnej dekarbonizácie, kde je ochrana klímy a ekosystémov nadradená finančným obmedzeniam. Podiel váh bol rozdelený: 50% pre GWP ukazovatele, 10% pre LCC, 15% pre cirkularitu a 25% pre biodiverzitu.

- **Ekonomicko-realistický model:** Tento model naopak reflektuje primárne trhové prostredie a finančnú uskutočniteľnosť projektov. Dominantnú váhu získal ukazovateľ LCC, pričom environmentálne kritériá boli brané do úvahy len ako sekundárne obmedzenia (napr. na úrovni legislatívneho minima). Cieľom tohto modelu bolo overiť, ktoré zo scenárov zostávajú konkurencieschopné aj v situácii, kedy je hlavným determinantom investičná a prevádzková nákladovosť. Podiel váh bol rozdelený: 40% pre LCC, 20% pre cirkularitu, 10% pre biodiverzitu a 30% pre GWP ukazovatele.

Touto systematickou úpravou váhových vektorov v nástroji MCA7 bol poskytnutý komplexný pohľad na stabilitu celkového hodnotenia. Zároveň tak bol identifikovaný taký stavebno-technologický scenár, ktorý vykazuje vysokú mieru optimality naprieč všetkými tromi simulovanými modelmi.

8.2.3 Inventarizačná analýza životného cyklu

Inventár životného cyklu (LCI) je fázou posudzovania životného cyklu v súlade s normou ISO 14044. Cieľom LCI je presne kvantifikovať všetky materiálové a energetické vstupy (suroviny, voda, palivá, energia) a výstupy súvisiace s piatimi posudzovanými budovami počas ich celého 50-ročného životného cyklu. Táto fáza slúži ako empirický základ pre následné posúdenie vplyvu na životné prostredie (LCIA) a MCA. Z hľadiska zberu a štruktúry údajov bol proces inventarizácie rozdelený do dvoch hlavných oblastí:

Primárnymi zdrojmi údajov na kvantifikáciu tokov materiálov boli podrobné výkazy výmer, projektová dokumentácia a dokumentácia skutočného stavu všetkých piatich budov. Presné hmotnostné a objemové bilancie stavebných komponentov boli zadané do softvérového prostredia OCL:

- Základy a nosné konštrukcie (betón, oceľ, murivo),
- Izolačné materiály a komponenty obvodového plášťa budovy,
- Intenzívne systémy zelených striech, vrátane špecifických rastových médií, filtračných, drenážnych a hydroizolačných vrstiev,
- Technické zariadenia budovy.

Tieto toky materiálov boli následne porovnané s príslušnými EPD a všeobecnými údajmi z databáz Ecoinvent 3.8 a Ökobaudat, s dôrazom na geografickú relevantnosť pre stredoeurópsky trh.

Energetická LCI a modelovanie scenárov

Najvýznamnejšou črtou prezentovanej analýzy LCI je rozdelenie prevádzkových vstupov (modul B6) do dvoch paralelných energetických úrovní, ktoré definujú výsledných 10 variantov:

Vypočítaná spotreba energie (CEC): Na základe statických legislatívnych výpočtov pre energetickú certifikáciu budov, ktoré predpokladajú štandardizovaný profil využitia a tabuľkové klimatické podmienky. Skutočná spotreba energie (AEC): Vychádza zo skutočných nameraných hodnôt spotreby elektriny, plynu alebo tepla z prevádzkových záznamov budov a pokročilých dynamických simulácií, ktoré odrážajú skutočné správanie užívateľov a skutočné meteorologické údaje. Všetky zhromaždené vstupy a výstupy boli v rámci LCI prepočítané a normalizované na špecifikovanú funkčnú jednotku (1 m² GFA za obdobie 50 rokov), čím sa zabezpečila kompatibilita údajov pre následné matematické spracovanie v softvéri MCA7.

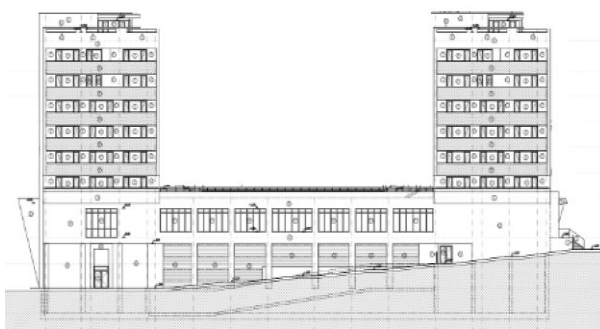
Tab. 4 Kľúčové charakteristiky prevádzkovej energie hodnotených administratívnych budov

	Systém vykurovania / chladenia	Energetický nosič	Technológia obnoviteľných zdrojov energie (OZE)
B1	Plynový kotol + tepelné čerpadlo voda-voda	Elektrina, zemný plyn	Tepelné čerpadlo voda-voda
B2	Plynový kotol + chiller (chladič) vzduch-voda	Elektrina, centrálna zásobovanie teplom (CZT), zemný plyn	Žiadna
B3	Tepelné čerpadlo zem-voda + TABS (aktivácia termickej hmoty budov)	Elektrina, zemný plyn	Tepelné čerpadlo zem-voda
B4	Centrálna zásobovanie teplom (CZT) + fancoily	Elektrina, zemný plyn	Žiadna
B5	Centrálna zásobovanie teplom (CZT) + vzduchom chladený chiller	Elektrina, centrálna zásobovanie teplom (CZT)	Biosolárna strecha (fotovoltaika + zelená strecha)

Tab. 5 Pohľady na hodnotené administratívne budovy



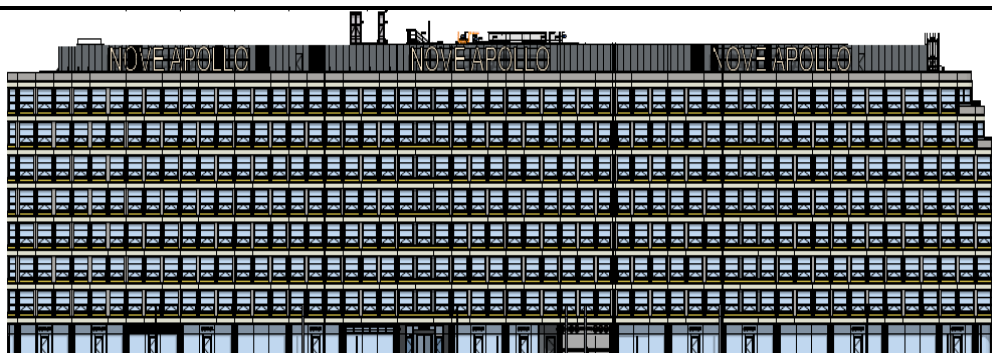
B2



B4



B5



8.2.4 Posúdenie vplyvu počas životného cyklu

V rámci fázy LCIA boli všetky zhromaždené a inventarizované údaje o materiálovom zložení a energetických tokoch piatich budov premenené na konkrétne environmentálne ukazovatele. Použitý prístup LCA umožnil komplexné posúdenie emisií skleníkových plynov, ktoré boli na základe ich fyzikálneho mechanizmu a špecifického zamerania rozdelené do štyroch základných kategórií globálneho otepľovania (Hauschild et al., 2018).

Na vyhodnotenie 10 prevádzkových scenárov v softvéri MCA7 boli monitorované ukazovatele kategorizované nasledovne:

- Globálny potenciál otepľovania (GWP-celkový): Tento ukazovateľ reprezentuje sumárny príspevok budovy ku klimatickej zmene. Vyjadrená je ním celková bilancia emisií skleníkových plynov vyprodukovaných počas sledovaných fáz životného cyklu, pričom v sebe integruje fosílné, biogénne vplyvy, ako aj vplyvy spojené s využívaním pôdy.
- Fosílny potenciál otepľovania (GWP-fosílny): Touto kategóriou sú kvantifikované emisie skleníkových plynov pochádzajúce zo spaľovania fosílnych palív, priemyselných procesov a chemických reakcií. Sledované sú tu najmä emisie spojené s výrobou tradičných stavebných materiálov a spotrebou energie z neobnoviteľných zdrojov.

- Biogénny potenciál otepľovania (GWP-biogénny): Týmto ukazovateľom sú hodnotené emisie a záchyt oxidu uhličitého naviazaného v materiáloch na báze biomasy (napr. drevo či iné prírodné suroviny). Zohľadnená je tu schopnosť biogénnych materiálov dočasne uskladňovať uhlík, ako aj jeho opätovné uvoľnenie na konci životného cyklu.
- Potenciál otepľovania z využívania pôdy (GWP-LULUC): V tejto kategórii sú posudzované emisie a záchyty skleníkových plynov vyplývajúce z využívania pôdy, zmien vo využívaní pôdy a z lesného hospodárstva (Land Use, Land Use Change, and Forestry). Zachytený je tu environmentálny vplyv priamej transformácie územia v dôsledku stavebnej činnosti alebo získavania surovín.
- Náklady životného cyklu (LCC): Reprezentujú ekonomický aspekt štúdie. Na rozdiel od environmentálnych vplyvov nie sú hodnotené fyzické emisie, ale skôr finančné toky spojené s budovami v priebehu 50-ročného obdobia. Zohľadnené sú počiatočné investičné náklady (A0–A5), náklady na pravidelnú údržbu a výmenu materiálov (B4) a predovšetkým prevádzkové náklady na energiu (B6), kde je priamo odrážaný finančný rozdiel medzi vypočítanými (CEC) a skutočnými (AEC) energetickými scenármi.
- Obehové hospodárstvo budov (BC): Tento ukazovateľ hodnotí materiálovú efektívnosť a mieru, v akej sú splnené princípy obehového hospodárstva. Zameriavaná je pozornosť na miestny aspekt budov – hodnotený je podiel recyklovaných alebo obnoviteľných materiálov vo vstupoch a potenciál dekonštrukcie, opätovného použitia a recyklovateľnosti stavebných komponentov na konci ich životného cyklu (moduly C a D), čím je minimalizovaná závislosť projektov od primárnych surovín.
- Biodiverzita (BD): Ide o ukazovateľ ekosystému, ktorý integruje miestnu a globálnu úroveň. Na miestnej úrovni (0 až 10 km²) je kvantifikovaný priamy vplyv využívania pôdy na stavenisku a kompenzačné prínosy navrhovaných intenzívnych zelených striech pri podpore mestského ekosystému a fauny. Na globálnej úrovni je pomocou softvéru OCL mapovaný nepriamy tlak spôsobený zmenou klímy (v nadväznosti na indikátory GWP), ktorým dodávateľský reťazec materiálov vplýva na globálnu flóru a faunu počas ťažby a spracovania surovín.

8.2.5 Komplexné vyhodnotenie environmentálnych indikátorov LCA

Pri Budove 1 bol zaznamenaný najvýraznejší nepomer medzi hodnotenými scenármi všetkých budov. Celková hodnota GWP-celkový v scenári CEC (1 985,74 kg CO_{2e}/m²) prevýšila hodnoty v scenári AEC (805,66 kg CO_{2e}/m²) o viac ako 146 %. Tento veľký rozdiel vznikol v module B6 (Prevádzková energia), kde scenár CEC predpokladal emisie na úrovni 1 366,77 kg CO_{2e}/m², zatiaľ čo scenár AEC vykázal len 186,70 kg CO_{2e}/m². Pri pohľade na ostatné indikátory vidíme rovnaké

výsledky vo fáze A1-A3 (418,11 kg CO_{2e}/m²), čo potvrdzuje, že materiálové zloženie zostalo v oboch scenároch identická. Indikátor ADP-E dosiahol hodnotu 20,69 kg CO_{2e}/m², čo je v porovnaní s ostatnými budovami v súbore nízka hodnota, naznačujúca efektívne materiálové zloženie. Zaujímavosťou je nárast ukazovateľa GWP-LULUC pri scenári CEC na hodnotu 6,66 kg CO_{2e}/m² oproti scenáru AEC 3,15 kg CO_{2e}/m², čo reflektuje rozdielnú intenzitu energetického mixu. Modul D produkuje záporné emisie -74,74 kg CO_{2e}/m², čím mierne kompenzuje environmentálne zaťaženie z počiatočných fáz výstavby a inštalácie. Budova 1 vykazuje mimoriadne efektívny prevádzkový manažment, vďaka čomu je jej skutočná spotreba výrazne nižšia než teoretické predpoklady návrhov. Z hľadiska materiálov v Budove 1 (fáza A1-A3) je zobrazený veľký vplyv hrubej stavby na celkovú environmentálnu stopu, kde GWP-celkový dosahuje hodnotu 7,68E6 kg CO_{2e}. Najkritickejším prvkom sú obvodové steny, ktoré zodpovedajú až za 86,29 % celkových emisií vo fáze A1-A3, nasledované základovou doskou s podielom 5,71 %. Z hľadiska materiálového zloženia zohráva kľúčovú úlohu betón rôznych pevnostných tried, ktorý spolu s oceľovou výstužou generuje viac ako 90 % stelesneného uhlíka celého objektu. Konkrétne betón triedy C30/37 predstavuje najväčšiu záťaž s príspevkom 5,32E6 kg CO_{2e}. Tepelnoizolačný systém je tvorený kombináciou minerálnej kamennej vlny a polystyrénu (EPS/XPS), pričom práve polymérové izolanty pre svoj plošný rozsah dominujú v GWP-fosíly vo výške 1,34E5 kg CO_{2e}.

Analýza administratívnej budovy 2 ukazuje, že dominantnú úlohu nezohráva len prevádzková energia, ale najmä emisie spojené s materiálovým cyklom a obnovou. GWP-celkový pri scenári CEC dosahuje 9 781,90 kg CO_{2e}/m², zatiaľ čo pri scenári AEC je to 7 087,26 kg CO_{2e}/m², čo predstavuje rozdiel približne 38 %. Najväčší rozdiel medzi oboma scenármi sa prejavuje v module B6, kde hodnota v scenári CEC (3 092,30 kg CO_{2e}/m²) takmer 8-násobne prevyšuje hodnotu AEC (397,53 kg CO_{2e}/m²). V budove 2 sú vysoké hodnoty stelesneného uhlíka vo fázach A1-A3 (1 708,81 kg CO_{2e}/m²) a najmä vo fáze obnovy a výmeny B4-B5 (2 660,45 kg CO_{2e}/m²), ktoré v prípade reálnej prevádzky (scenár AEC) dokonca prevyšujú emisie z energetickej prevádzky budovy. Významným faktorom v celkovej bilancii je modul D, ktorý pri oboch scenároch generuje veľký environmentálny kredit -3 168 kg CO_{2e}/m². Tento potenciál úspor po skončení životnosti budovy zásadne koriguje vysoké počiatočné a obnovovacie emisie.

Budova 3 vykazuje v rámci hodnotených budov relatívne stabilný environmentálny profil s miernejším rozptylom medzi modelovanými a nameranými hodnotami. Celková hodnota GWP-celkový v scenári CEC (1 998,10 kg CO_{2e}/m²) prevyšuje scenár AEC (1 250,33 kg CO_{2e}/m²) o približne 60 %. Hlavným faktorom je opäť modul B6, kde reálna prevádzka vyprodukovala o 736,15 kg CO_{2e}/m² menej emisií než predpokladal výpočtový model. Zaujímavým špecifikom tohto objektu je záporná hodnota GWP-biogénny vo fáze výroby (A1-A3: -19,93 kg CO_{2e}/m²), čo

naznačuje integráciu prírodných materiálov so schopnosťou sekvestrácie uhlíka do konštrukcie budovy. V porovnaní s ostatnými budovami vykazuje budova 3 aj pomerne vysokú hodnotu GWP-biogénny vo fáze konca životnosti (C1-C4: 20,66 kg CO_{2e}/m²), čo súvisí s uvoľňovaním predtým uloženého biogénneho uhlíka. Modul D prináša v oboch prípadoch identický environmentálny benefit vo výške -161,33 kg CO_{2e}/m², čím potvrdzuje dobrý potenciál pre budúcu recykláciu materiálov a znižovanie celkovej uhlíkovej stopy v rámci obehového hospodárstva.

Pri analýze budov pri hodnotení budovy 4 bol vyhodnotený najvýraznejší rozdiel v prevádzkovej fáze v rámci všetkých hodnotených budov, čo zásadne ovplyvnilo celkovú bilanciu GWP. Hodnota GWP-celkový v scenári CEC (3 481,97 kg CO_{2e}/m²) je až o 149 % vyššia v porovnaní so scenárom AEC (1 395,69 kg CO_{2e}/m²). Tieto rozdiely spôsobuje modul spotreby energie B6, kde výpočtový model predpokladal spotrebu generujúcu 3 081,81 kg CO_{2e}/m², zatiaľ čo reálna prevádzka vykázala len približne tretinu tejto hodnoty (1 010,47 kg CO_{2e}/m²). V rámci fáz stelesneného uhlíka dominuje fáza údržby a opravy (B2: 161,75 kg CO_{2e}/m²), ktoré prevyšujú aj počiatočnú produkčnú fázu (A1-A3: 132,82 kg CO_{2e}/m²). Environmentálny prínos v module D je pri tomto objekte relatívne nízky (-18,75 kg CO_{2e}/m²), čo naznačuje obmedzený potenciál pre recykláciu dominantných materiálov po skončení životného cyklu. Výsledky AEC tak stavajú budovu 4 do pozície budovy, kde materiálová stopa a údržba hrajú v celkovej bilancii oveľa dôležitejšiu rolu, než by naznačoval štandardný energetický výpočet.

Pri budove 5 potvrdzuje komparatívna analýza trend nadhodnocovania prevádzkových emisií v rámci návrhu. GWP-celkový v scenári CEC (2 498,52 kg CO_{2e}/m²) je takmer dvojnásobný v porovnaní s hodnotou AEC (1 299,13 kg CO_{2e}/m²), čo predstavuje nárast o 92 %. Kľúčovým faktorom je opäť fáza B6, kde výpočtový model predpokladal emisie na úrovni 1 783,33 kg CO_{2e}/m², zatiaľ čo reálna nameraná hodnota dosiahla len 595,30 kg CO_{2e}/m². Zaujímavým zistením sú rovnaké emisie vo fáze údržby (B2: 161,84 kg CO_{2e}/m²), ktorá zostáva v oboch scenároch identická a tvorí nezanedbateľnú časť celoživotného cyklu. Modul D poskytuje v scenári AEC environmentálny benefit vo výške -72,27 kg CO_{2e}/m², čo mierne vylepšuje celkovú bilanciu. Z výsledkov vyplýva, že hoci má budova materiálovo náročnú konštrukciu, jej skutočná prevádzka je oveľa úspornejšia, než predpokladal pôvodný výpočtový model.

Najvýraznejší rozdiel medzi emisiami z reálnej spotreby energie a výpočtovej spotreby vidíme v kategórii B6. Tento rozdiel sa následne premieta do ukazovateľa GWP-celkový. Budova B2 vykazuje najväčší „Performance Gap“. Pri výpočtovej spotrebe energie je GWP-celkový o 38 % vyšší (9 781,90 a 7 087,26 kg CO_{2e}/m²). To naznačuje, že budova v reálnej prevádzke funguje oveľa efektívnejšie, než predpokladal model a v modeli boli nastavené veľmi konzervatívne parametre. V prípade budovy B1 sú emisie sú až 2,4-násobne vyššie než pri reálnej spotrebe (1 985,74

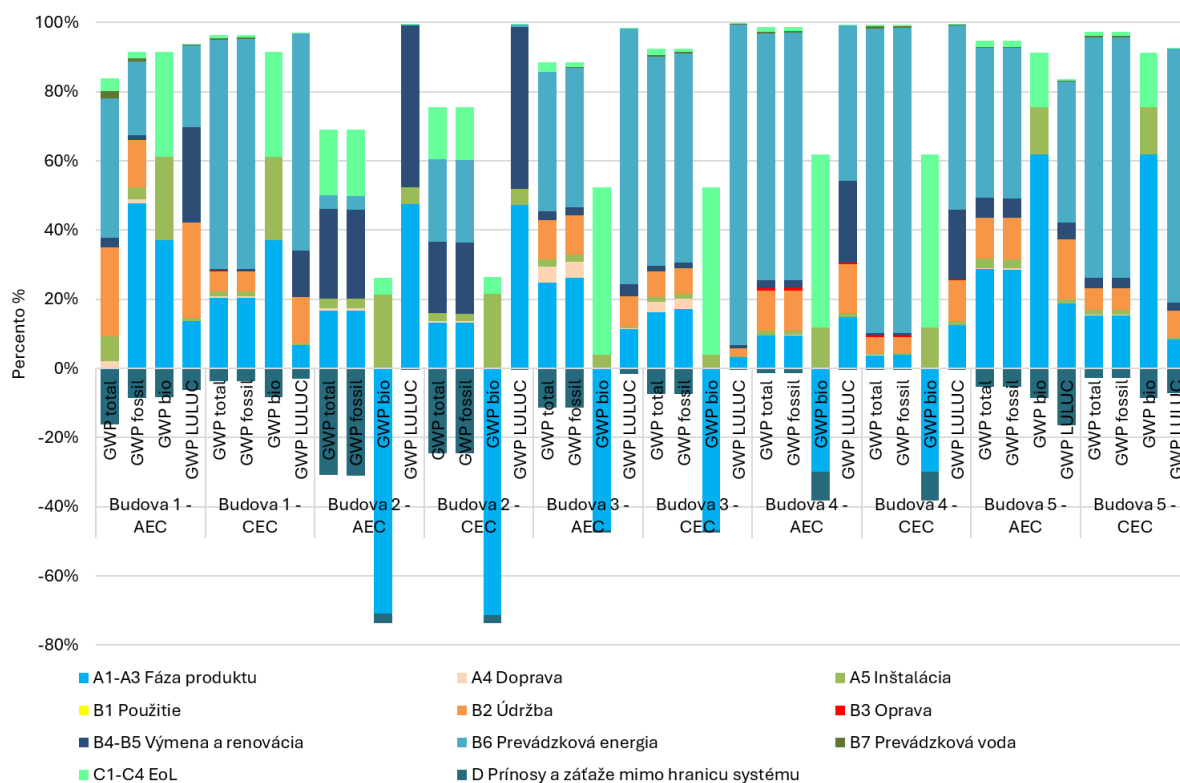
a 805,66 kg CO_{2e}/m²). Budovy B4 a B5 vykazujú približne 2,5-násobne vyššie emisie pri výpočtovom hodnotení.

Analýza GWP-fosílny potvrdzuje, že fosílna emisie tvoria u všetkých sledovaných objektov kľúčový podiel na celkovej uhlíkovej stope, pričom rozdiely medzi scenármi AEC a CEC sú takmer identické s odchýlkami v ukazovateli GWP-celkový. Najvyšší podiel fosílnych emisií vykazuje budova B2, kde v scenári CEC dosahujú až 9 730,08 kg CO_{2e}/m², čo je dôsledkom nielen vysokej energetickej náročnosti v modeli, ale aj enormného podielu fosílnych palív spotrebovaných pri výrobe a obnove materiálov (fázy A1-A3 a B4-B5 tvoria spolu vyše 4 300 kg CO_{2e}/m²). Pri budovách B1, B4 a B5 vidíme v reálnej prevádzke (AEC) radikálne zníženie fosílny stopy oproti výpočtom, a to v priemere o 60 % až 70 %, čo priamo reflektuje nižšiu reálnu spotrebu energie z mixu, ktorý je stále závislý od fosílnych zdrojov. Najnižší podiel v GWP-fosílny v reálnej prevádzke dosahuje budova B1 AEC (798,71 kg CO_{2e}/m²), čo z neho robí lídra v dekarbonizácii prevádzky. Naopak, budova B3 vykazuje zaujímavú stabilitu vo fosílnych emisiách konca životnosti (C1-C4), ktoré sú porovnateľné s ostatnými objektmi napriek jej špecifickej biogénnej skladbe. Celkovo výsledky ukazujú, že hoci sa pri moderných administratívnych budovách kladie dôraz na obnoviteľné zdroje, fosílna zložka v prevádzkovej fáze B6 zostáva pri použití výpočtových modelov (CEC) kriticky nadhodnotená.

Ukazovateľ GWP-biogénny odкрýva zásadné rozdiely v prístupe k využívaniu prírodných materiálov a ich schopnosti sekvestrácie (ukladania) uhlíka v konštrukciách budov. Najvýraznejší počiatočný benefit vykazuje objekt B3, kde záporná hodnota vo fáze výroby (A1-A3: -19,93 kg CO_{2e bio}/m²) indikuje masívne nasadenie biogénnych materiálov, hoci tento prínos je v závere životného cyklu (C1-C4: 20,66 kg CO_{2e bio}/m²) takmer úplne eliminovaný ich dekompozíciou či energetickým zhodnotením. Najpriaznivejšiu celkovú bilanciu dosahuje B2 (GWP-biogénny: -10,76 kg CO_{2e bio}/m²), ktorý vďaka vysokej počiatočnej sekvestracii a nízkym emisiám vo fáze konca životnosti funguje ako efektívne dlhodobé úložisko pre uhlík. Ostatné budovy, menovite B1, B4 a B5, vykazujú len marginálne hodnoty biogénneho uhlíka (v rozmedzí 1,39 až 3,80 kg CO_{2e bio}/m²), čo naznačuje ich primárnu orientáciu na anorganické konštrukčné materiály s nízkym podielom obnoviteľných biologických zdrojov. Tieto zistenia potvrdzujú, že integrácia biogénnej zložky môže v špecifických prípadoch (B2) signifikantne vylepšiť čistú uhlíkovú bilanciu budovy, zatiaľ čo pri iných (B3) predstavuje len dočasný environmentálny benefit v rámci časového rámca životného cyklu.

Ukazovateľ GWP-LULUC vykazuje v rámci súboru budov konzistentné emisie, kde prevádzková fáza založená na výpočtových modeloch (CEC) generuje systematicky vyššie zaťaženie než reálna prevádzka (AEC). Najvýraznejšie celkové hodnoty dosahuje B2, kde hodnota GWP-LULUC presahuje 62 v oboch scenároch, čo je spôsobené najmä vysokým podielom týchto emisií už vo

fáze výroby (A1-A3: 29,73 kg CO_{2e}/m²) a obnovy (B4-B5: 29,36 kg CO_{2e}/m²). Tento fakt naznačuje, že materiálová skladba tejto budovy má širšiu ekologickú stopu v dodávateľskom reťazci. Pri ostatných budovách sú hodnoty v produkčných fázach marginálne (pod 1 kg CO_{2e}/m²), no kľúčový rozdiel nastáva vo fáze B6. Napríklad pri budove B1 je hodnota LULUC v scenári CEC až 5,4-násobne vyššia (4,31 kg CO_{2e}/m²) oproti AEC (0,80 kg CO_{2e}/m²), čo odzrkadľuje rozdiel v predpokladanom odbere energie z mixu s vyšším podielom biopalív alebo iných zdrojov náročných na pôdu. Budovy B3, B4 a B5 vykazujú v reálnej prevádzke AEC takmer zanedbateľné hodnoty LULUC v prevádzkovej fáze (pod 1 kg CO_{2e}/m²), zatiaľ čo ich CEC modely tieto hodnoty nadhodnocujú. Celkovo analýza potvrdzuje, že kým pri väčšine budov je GWP-LULUC minoritným faktorom závislým od presnosti energetického modelu, pri materiálovo náročných projektoch typu budovy B2 sa stáva dôležitou zložkou stelesneného uhlíka, ktorú nie je možné ovplyvniť len zmenou prevádzkovej efektivity.



Obr. 21 Výsledky LCA hodnotených budov

8.2.6 Hodnotenie vplyvu dodávateľského reťazca na biodiverzitu

V tejto časti sú prezentované výsledky analýzy environmentálneho zaťaženia biodiverzity, ktoré vzniká v rámci celého životného cyklu materiálov (dodávateľského reťazca) piatich posudzovaných budov. Celkový vplyv (Biodiversity loss) je v tomto hodnotení reprezentovaný výhradne stresormi pochádzajúcimi zo zmeny klímy (Climate Change), pričom výsledná hodnota

určuje plochu, na ktorej by teoreticky došlo k úplnému vymiznutiu všetkých druhov na obdobie jedného roka v dôsledku globálneho otepľovania.

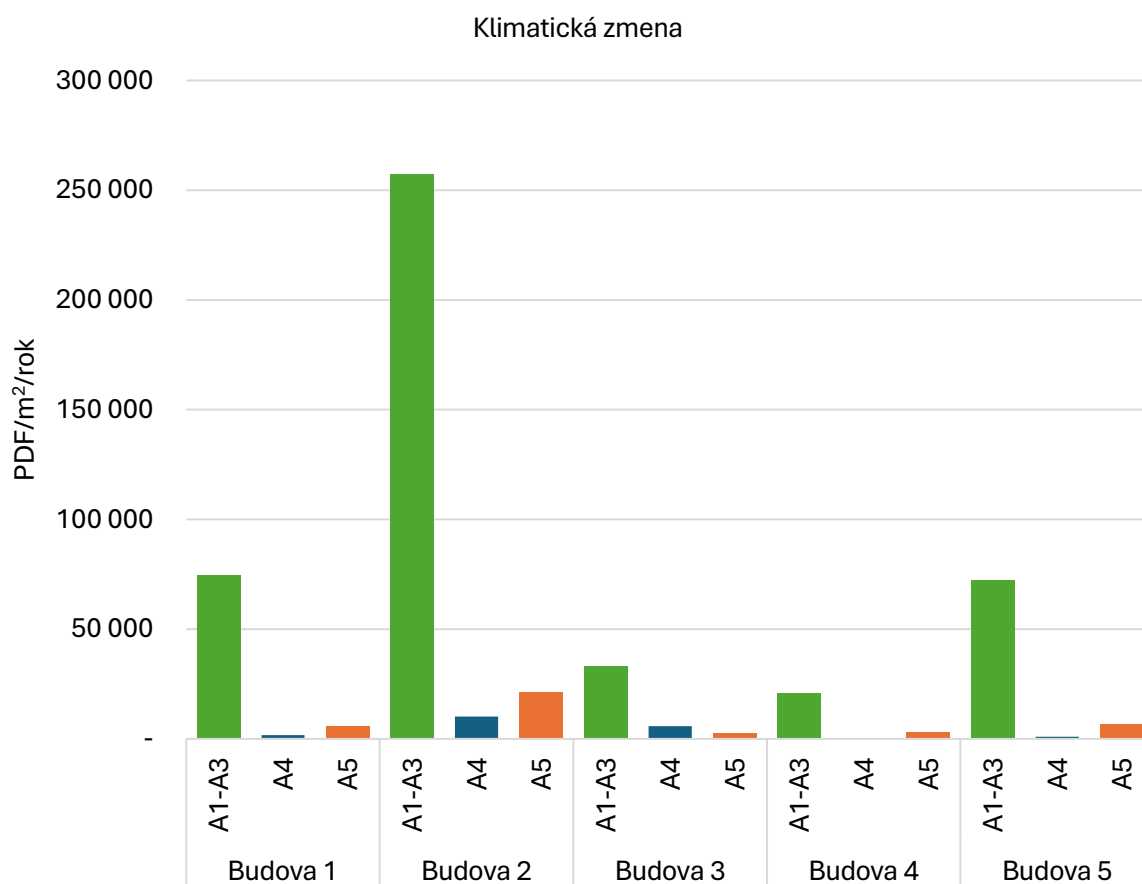
Zaťaženie biodiverzity v dodávateľskom reťazci

Tento nástroj je určený na posudzovanie zaťaženia biodiverzity v dodávateľských reťazcoch, pričom je ním meraný rozsah potenciálnej straty biologickej rozmanitosti. Výpočet je realizovaný pomocou metodiky označovanej ako „Potentially Disappeared Fraction of Species“ (PDF/m²/rok). Výsledkami je demonštrované kumulatívne zaťaženie biodiverzity spôsobené dodávateľským reťazcom a plocha, na ktorej by mohlo dôjsť k potenciálnemu vyhynutiu všetkých druhov v priebehu jedného roka. Hoci sa skutočné obdobia vymierania druhov v dôsledku klimatických stresových faktorov líšia, v tomto modeli sú všetky normalizované na jeden rok. Metodiku vyvinula spoločnosť OneClickLCA na základe charakteristík IMPACT World+ European, s výnimkou zmeny klímy, pre ktorú používa globálne charakteristiky. V nástroji sú zohľadnené krátkodobé a dlhodobé vplyvy emisií skleníkových plynov na ekosystémy, zatiaľ čo ostatné kategórie vplyvu (znečistenie, využívanie zdrojov či využívanie ornej pôdy) boli z hodnotenia biodiverzity vynechané.

Z hodnotenia budov vyplýva, že dopad na stratu biodiverzity je v plnom rozsahu určený klimatickou zmenou, čo potvrdzuje priamu úmeru medzi uhlíkovou stopou materiálov (zabudovaným uhlíkom) a ich negatívnym vplyvom na globálne ekosystémy. Budova 2 vykazuje jednoznačne najvyššiu celkovú mieru zaťaženia biodiverzity (sumárne 288 229,15 PDF/m²/rok za fázy A1-A5). Tento výsledok je zapríčinený celkovým rozsahom stavby, použitím materiálov s vysokou energetickou náročnosťou výroby a špecifickými technologickými procesmi v jej dodávateľskom reťazci. V porovnaní s najekologickejšou budovou (Budova 4) je tento dopad viac ako 12-násobne vyšší. Budova 4 sa javí ako najšetrnejšia k ekosystémom s celkovou hodnotou 23 902,53 PDF/m²/rok, čo naznačuje efektívny výber materiálov s nízkym environmentálnym zaťažením. Pri Budovách 1 a 5 sú vykazované veľmi podobné celkové výsledky (81 761,36 PDF/m²/rok, resp. 79 706,86 PDF/m²/rok, čo poukazuje na obdobnú materiálovú skladbu a environmentálnu stratégiu.

Analýzou výsledkov je demonštrované, že najvýraznejšia environmentálna stopa je generovaná Budovou 2, ktorej dopad v samotnom výrobnom štádiu A1–A3 dosahuje 257 097,40 PDF/m²/rok, čo predstavuje ekvivalent úplného zániku druhov na ploche cca 25,7 hektára počas jedného roka. V porovnaní s ňou je pri Budove 1 v rovnakej fáze vykazovaný dopad 74 422,12 PDF/m²/rok (cca 7,4 ha/rok) a pri Budove 5 veľmi podobná hodnota 72 228,13 PDF/m²/rok (cca 7,2 ha/rok). Na druhej strane sú situované budovy s nižšou materiálovou náročnosťou a ekologickejším zložením: Budova 3 s dopadom 32 873,25 PDF/m²/rok (cca 3,3 ha/rok) a environmentálne

najšetrnejšia Budova 4, ktorej hodnota v štádiu A1-A3 je 20 693,51 PDF/m²/rok, čo zodpovedá strate biodiverzity na ploche približne 2,1 hektára za rok. Tento integrovaný ukazovateľ poskytuje investorom a projektantom jasný obraz o tom, ako ich materiálové rozhodnutia prostredníctvom emisií skleníkových plynov prispievajú k degradácii globálnej flóry a fauny. Výrazný rozdiel medzi najviac a najmenej zaťažujúcou budovou zdôrazňuje kľúčový význam výberu materiálov a dizajnu v počiatočných fázach projektu pre ochranu globálnych ekosystémov.



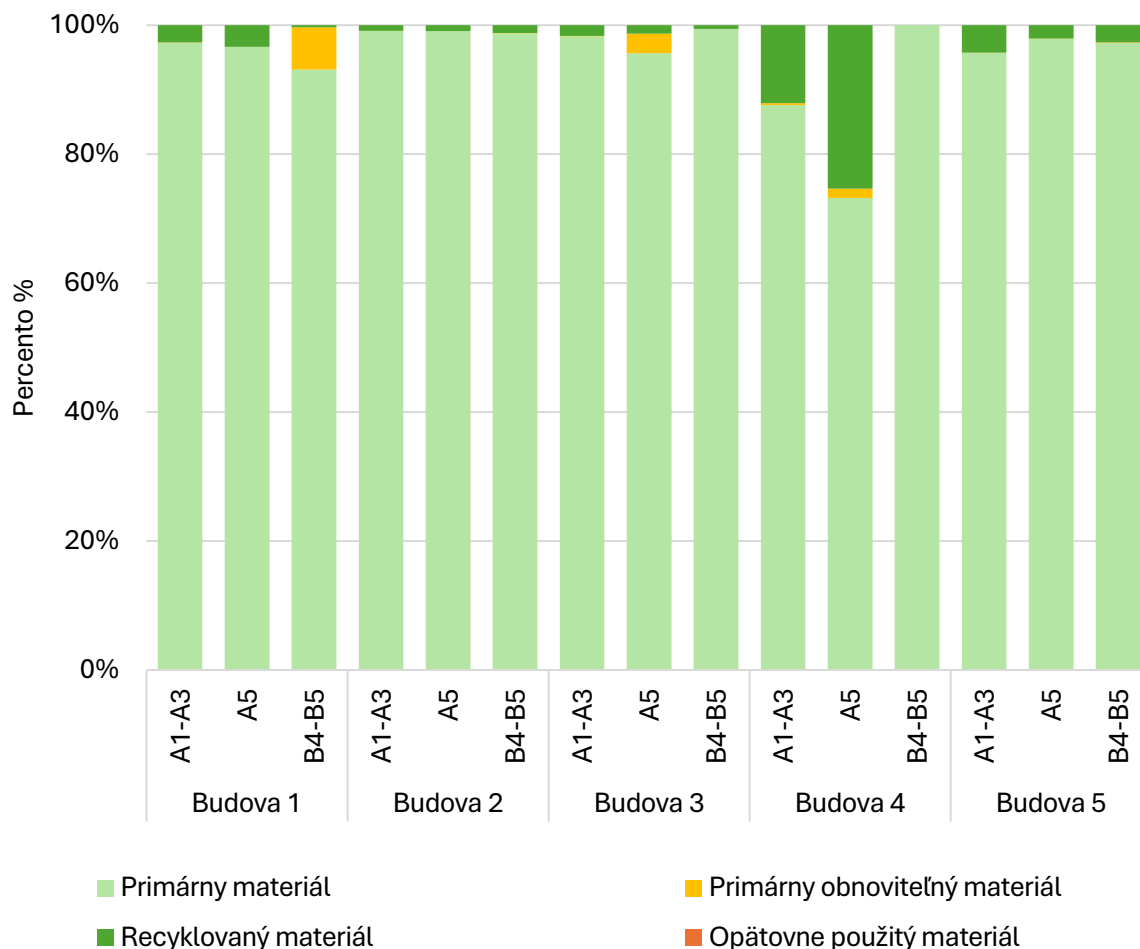
Obr. 22 Výsledky pre klimatickú zmenu hodnotených budov

8.2.7 Cirkularita materiálov

Budova 1 predstavuje priemerný model budovy v hodnotení cirkularity. S podielom 8,5 % na celkových obnoviteľných energetických vstupoch ($3.80E+07$) sa radí do stredného pásma. Hoci jej materiálové zloženie je z viac ako 97 % tvorená panenskými surovinami, vykazuje strategickú prípravu na cirkularitu vo fáze údržby (B4-B5). V tejto neskoršej fáze je v grafe viditeľný (obnoviteľné panenské materiály), čo naznačuje plánovanú výmenu komponentov za ekologickejšie alternatívy v budúcnosti.

Budova 2 vykazuje druhý najvyšší podiel obnoviteľných energetických vstupov (26,5 %), čo svedčí o väčšom využití biogénnych materiálov vo výrobe. Napriek tomuto vysokému energetickému

číslo však graf materiálového zloženia ukazuje takmer 100 % závislosť od panenských zdrojov (Pôvodných) vo všetkých fázach. Cirkularita je tu teda postavená na „nových“ obnoviteľných zdrojoch, nie na recyklácii už existujúcich materiálov, čo z nej robí projekt s vysokým nárokom na prvotné suroviny.



Obr. 23 Výsledky cirkularity hodnotených budov

Budova 3 je z pohľadu cirkularity najlepšia, pretože využíva takmer polovicu (48,8 %) všetkých obnoviteľných vstupov v rámci hodnotených budov. Hodnota $2,17\text{E}+08$ potvrdzuje orientáciu na materiály s nízkou uhlíkovou stopou (napr. drevo). Avšak pri pohľade na materiálový graf je zrejmé, že aj pri takto vysokom podiele obnoviteľnej energie tvoria recyklované a opätovne použité zložky len zlomok celkového objemu, čo naznačuje orientáciu na obnoviteľnosť (renewability) skôr než na recykláciu (recyclability).

Budova 4 využíva najmenej nových obnoviteľných zdrojov $5,42\text{E}+06$ (iba 1,2 %), no napriek tomu je v reálnom materiálovom zložení najviac cirkulárnou budovou. Jej stratégia totiž nespočíva v čerpaní nových surovín, ale v recyklácii a opätovnom využití existujúcich materiálov. V tomto smere ako jediná úspešne uzatvára materiálový cyklus už vo fáze výroby a výstavby.

Budova 5 dosahuje nízke hodnoty vo všetkých sledovaných cirkulárnych indikátoroch. Jej podiel na obnoviteľných zdrojoch je len 7,9 % a materiálový graf potvrdzuje veľkú prevahu panenských materiálov (blížiacu sa k 98 %). V porovnaní s ostatnými budovami vykazuje najnižšiu snahu o integráciu recyklátov alebo obnoviteľných zložiek, čím reprezentuje klasický lineárny prístup s minimálnym využitím obehových princípov.

Z hľadiska princípov obehového hospodárstva graf odhaľuje, že väčšina materiálového zloženia všetkých piatich budov (vo všetkých fázach A1-A3, A5 a B4-B5) pozostáva z panenských materiálov (Pôvodných), ktoré tvoria viac ako 70 % až 99 % celkového objemu. Táto skutočnosť indikuje nízku mieru celkovej cirkularity a vysokú závislosť od primárnej ťažby surovín.

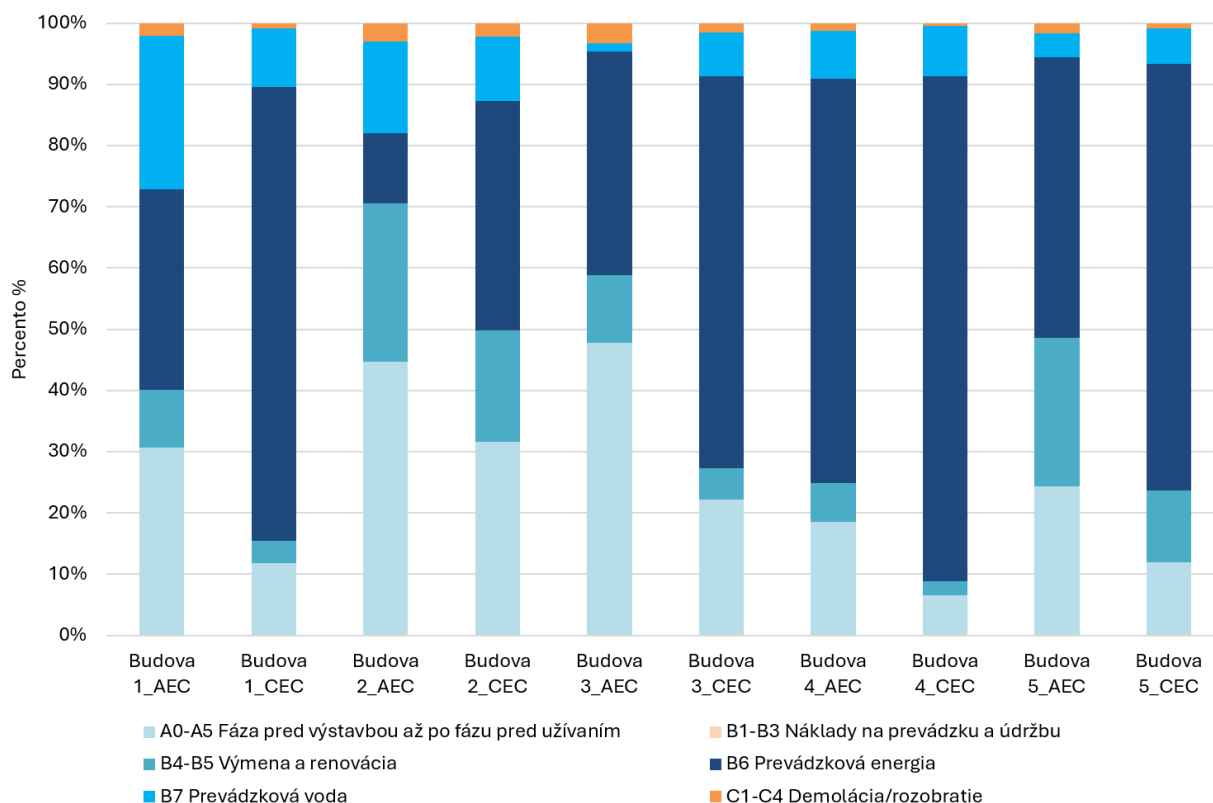
8.2.8 Komplexné vyhodnotenie ekonomických indikátorov LCC

Z hľadiska LCC je Budova 1 charakteristická vyváženým rozložením medzi investičnými a prevádzkovými nákladmi. Náklady vo fáze A0–A5 sú 156,86 €/m² (31 % celkových nákladov). Táto suma pokrýva pred-stavebnú prípravu a samotnú realizáciu. Prevádzková energia (modul B6) tvorí 168,06 €/m² (33 % celkových nákladov). Spotreba energie je najväčším nákladom budovy. Keďže je však skutočná spotreba (AEC) oveľa nižšia ako odhadovaná (CEC), budova v praxi funguje úspornejšie a efektívnejšie, než sa predpokladalo. Spotreba vody (B7) tvorí náklady 127,75 €/m² (25 % celkových nákladov). Náklady na vodu sú pomerne vysoké a tvoria štvrtinu celkového LCC. To naznačuje priestor pre budúce úsporné opatrenia (napr. zachytávanie dažďovej vody), ktoré by mohli túto položku znížiť. Obnova a údržba (B4-B5) tvoria náklady 48,14 €/m² (9 % celkových nákladov). Nízke náklady na výmenu a obnovu prvkov svedčia o použití materiálov s dlhou životnosťou alebo o nenáročnom technickom riešení budovy, čo minimalizuje potrebu drahých opráv počas životného cyklu. Fáza konca životnosti (C1-C4) tvorí 2 % celkových nákladov.

Budova 2 predstavuje z hľadiska nákladov životného cyklu finančne najnáročnejší variant v celom súbore, pričom jej celkové reálne náklady (AEC) dosahujú 1 527,45 €/m². Tento výsledok je ovplyvnený najmä vysokou počiatočnou investíciou vo fáze výstavby (683,17 €/m²) a značnými predpokladanými nákladmi na budúcu obnovu a výmenu komponentov (394,99 €/m²), ktoré sú v oboch prípadoch najvyššie spomedzi všetkých budov. Hoci výpočtový model (CEC) predpovedal prevádzkové náklady na energiu až na úrovni 811,11 €/m², reálna prevádzka ukázala výrazne vyššiu efektivitu so skutočnými nákladmi len 175,08 €/m². Napriek tejto prevádzkovej úspore však vysoké investičné náklady a výdavky na údržbu robia z Budovy 2 ekonomicky najzaťažujúcejší model v dlhodobom horizonte životného cyklu.

Budova 3 patrí z pohľadu nákladov do stredu s celkovou sumou 1 065,47 €/m². Najviac nákladov, približne polovicu, vyrobí fáza A0-A5 (509,06 €/m²), po ktorej nasledujú náklady za energiu (389,78

€/m²). Veľkým plusom tejto budovy je jej reálna úspornosť, napríklad náklady za vodu sú v skutočnosti oveľa nižšie (iba 14,31 €/m²), než sa pôvodne čakalo. Hoci sú náklady na budúce opravy a búranie o niečo vyššie, vďaka výbornej kontrole spotreby v bežnej prevádzke ide o finančne rozumný a stabilný objekt.



Obr. 24 Výsledky LCC hodnotených budov

Budova 4 vykazuje celkové náklady na úrovni 1 230,10 €/m². Najväčšiu časť týchto výdavkov tvoria prevádzkové náklady na energiu (812,43 €/m²), ktoré sú v porovnaní s ostatnými budovami pomerne vysoké, hoci stále výrazne nižšie než pôvodný teoretický predpoklad. Samotná výstavba (227,98 €/m²) a náklady na budúcu obnovu (78,39 €/m²) sú však relatívne nízke. Drahšiu energiu kompenzuje lacnejšia stavba, čím je celková cena priemerná.

Budova 5 dosahuje celkové náklady vo výške 1 309,12 €/m². Na rozdiel od predchádzajúcich budov sú náklady rozložené rovnomernejšie medzi výstavbu (319,38 €/m²), budúcu obnovu (316,54 €/m²) a prevádzkovú energiu (601,13 €/m²). Vysoké náklady v kategórii obnovy a údržby (B4-B5) naznačujú, že budova bude v budúcnosti vyžadovať nákladnejšie opravy a častejšiu výmenu komponentov. Celkovo je Budova 5 drahšia, má nižšiu efektívnosť systémov a vyššiu potrebu údržby vďaka ktorej náklady počas životného cyklu rastú.

Analýza LCC potvrdzuje veľký rozdiel medzi projektovanými a reálnymi prevádzkovými nákladmi. Zatiaľ čo Budova 2 je investične najnáročnejšia v štádiu výstavby aj obnovy, Budova 4 vykazuje najväčšiu chybovosť vo výpočtových modeloch spotreby energie. Z hľadiska ekonomickej efektivity počas celého životného cyklu sa ako najvýhodnejšia javí Budova 1, ktorá si udržiava nízke náklady tak v investičnej, ako aj v prevádzkovej fáze (AEC). Výsledky naznačujú, že výpočtové modely CEC sú v súčasnosti nastavené výrazne pesimisticky, čo môže skresľovať očakávania investorov o návratnosti ekologických opatrení.

8.2.9 Multikriteriálna analýza

Pre objektívne posúdenie jednotlivých variantov vo vyváženom modeli bolo definovaných 7 rovnocenných kritérií, ktorým boli priradené takmer identické matematické váhy, čím bolo eliminované riziko subjektívneho skreslenia výsledkov. V rámci environmentálnej dekarbonizačnej stopy boli sledované štyri kategórie potenciálu globálneho otepľovania, kde pre GWP-celkový, GWP-fosílny, GWP-biogénny, GWP-LULUC a rovnako aj pre cirkularitu a biodiverzitu bola stanovená jednotná váha na úrovni 0,143 (teda 14,3 %). Týmto neutrálnym prerozdelením váhových vektorov bol vytvorený stabilný rozhodovací základ, v ktorom bol zabezpečený rovnomerný vplyv dekarbonizačných parametrov, ekonomických aspektov budovy a jej cirkulárno-ekologického potenciálu na výslednú úroveň udržateľnosti. Práve v tomto definovanom váhovom nastavení bola oboma matematickými prístupmi (WSA aj TOPSIS) potvrdená jednoznačná dominancia scenára B3 - AEC, ktorý najefektívnejšie zohľadňuje všetky takto zaťažované kritériá. Tento objekt, koncepčne postavený na integrácii tepelného čerpadla zem-voda a systému aktivácie termickej hmoty budov, vykazuje najvyššiu mieru optimality pri vyváženom zohľadnení dekarbonizácie, nákladov životného cyklu (LCC) a cirkulárnych kritérií priamo v režime reálnej prevádzky. V rámci analýzy bol oboma algoritmami jasne demonštrovaný vplyv takzvanej energetickej medzery (Energy Performance Gap), kedy reálne prevádzkové scenáre (AEC) dosahujú spravidla priaznivejšie umiestnenie ako ich teoretické, projektované ekvivalenty (CEC). Jedinou výnimkou je pozícia scenára budovy B3 - CEC v metóde TOPSIS, kde bolo zaznamenané jeho umiestnenie na druhom mieste. Scenáre B2 - AEC (9. miesto) a B2 - CEC (10. miesto) boli oboma modelmi vyhodnotené ako environmentálne a ekonomicky najmenej vhodné, čo je pripisované ich vysokej materiállovej náročnosti a absencii pokročilých technológií obnoviteľných zdrojov energie.

Analýza citlivosti a neistoty viac-kriteriálneho hodnotenia

Na účely overenia stability a robustnosti získaných výsledkov bola vykonaná podrobná analýza citlivosti a neistoty. Prostredníctvom systematickej alterácie váhových vektorov v nástroji MCA7 boli popri základnom vyváženom modeli simulované dva alternatívne rozhodovacie scenáre –

ekocentrický model a ekonomicko-realistický model. Týmto prístupom bolo sledované, ako zmeny v prioritách zainteresovaných strán ovplyvňujú finálne poradie desiatich prevádzkových scenárov a do akej miery zostáva zachovaný dekarbonizačný potenciál posudzovaných budov.

Nastavenie váhových vektorov pre alternatívne modely

- Východiskový vyvážený model je charakterizovaný rovnomerným rozložením váh, kde pre kritériá GWP-celkový, GWP-fosílny, GWP-biogénny, GWP-LULUC, BC a BD je priradená zhodná hodnota 0,143 (14,3%).
- V ekocentrickom modeli bola pozornosť presmerovaná primárne na dekarbonizáciu a ochranu ekosystémov. Kritériu biodiverzity (BD) bola priradená dominantná váha 25% a štyri dekarbonizačné indikátory (kategórie GWP) boli zaťažené rovnomernou váhou 0,125 (spolu 50 % celkového vplyvu). Naopak, ekonomické hľadisko reprezentované indexom LCC (nominálne náklady) bolo potlačené na minimálnu úroveň s váhou 10%, pričom pre obehové hospodárstvo (cirkularita) bola zvolená váha 15%.
- V ekonomicko-realistickom modeli bol simulovaný trhový prístup s prioritným zameraním na finančnú nákladovosť, kde bola indikátoru LCC (nominálne náklady) priradená dominantná váha 40%. Kritérium cirkularita má váhu 20% a biodiverzita bola marginalizovaná na hodnotu 10%. Environmentálna zložka dekarbonizácie bola v tomto scenári potlačená na úroveň 0,075 pre každú zo štyroch kategórií GWP (spolu 30 % celkového podielu).

Pri simulácii ekocentrického modelu bola zaznamenaná mimoriadne vysoká stabilita výsledkov na najvyšších pozíciách v oboch použitých algoritmoch (WSA aj TOPSIS). Na prvom mieste bol zhodne identifikovaný scenár B3 - AEC, ktorý v metóde WSA dosiahol skóre 0,9327 a v metóde TOPSIS 0,9185. Hneď za ním sa v oboch prípadoch umiestnil projektovaný ekvivalent B3 - CEC (WSA: 0,8591; TOPSIS: 0,8372), nasledovaný reálnym budovou B1 - AEC (WSA: 0,8184; TOPSIS: 0,688). Tieto zistenia jednoznačne potvrdzujú, že pri striktnom zameraní na hlbokú dekarbonizáciu a minimalizáciu globálneho environmentálneho stresu je stavebno-technologický koncept B3 (integrácia tepelného čerpadla zem-voda) optimálnym riešením. Vysoká dekarbonizačná efektivita tohto variantu zostáva neotrasená aj po odfiltrovaní finančných faktorov. Na opačnom konci rebríčka sa opätovne bez zmeny umiestnili objekty B2 - AEC (9. pozícia) a B2 - CEC (10. pozícia), čo dokumentuje ich neudržateľnosť z pohľadu emisií skleníkových plynov a nízkej ekologickej hodnoty použitej materiálnej skladby.

Zavedenie ekonomicko-realistického modelu prinieslo najvýraznejšie zmeny v stredovom poli a na spodných priečkach rebríčka, čo je priamym dôsledkom vysokého 40 % zaťaženia finančných

nákladov LCC. Napriek tejto radikálnej zmene priorít bol však na absolútnom vrchole oboma algoritmi opäť neohrozene identifikovaný scenár B3 - AEC (WSA: 0,8994; TOPSIS: 0,8506). Tento výsledok predstavuje kľúčové zistenie celej štúdie: reálna prevádzka B3 je nielen environmentálne najšetrnejšia, ale vďaka vysokej efektívnosti prevádzkových energetických systémov generuje takú finančnú úsporu, ktorá spoľahlivo kompenzuje počiatočné investičné náklady. Kým v algoritme WSA sa na druhom mieste udržal scenár B1 - AEC (0,8122) a projektovaný ekvivalent B3 - CEC (0,7141) klesol na tretie miesto, v metóde TOPSIS bol zaznamenaný prepád teoretického scenára B3 - CEC až na šiestu pozíciu (0,5741). Na uvoľnené vyššie priečky sa v TOPSIS posunuli scenáre B1 - AEC (2. miesto) a B5 - AEC (3. miesto), ktoré vykazujú priaznivý pomer medzi prevádzkovou nákladovosťou a dekarbonizáciou.

Najvýraznejšia anomália v dôsledku energetickej medzery (Energy Performance Gap) bola identifikovaná pri objekte B4. Kým reálny scenár B4 - AEC sa udržal na stabilnej strednej pozícii (5. miesto vo WSA aj v TOPSIS), jeho projektovaný ekvivalent B4 - CEC klesol pri metóde WSA na 9. miesto (0,3456) a pri metóde TOPSIS dokonca na posledné miesto rebríčka (10. miesto so skóre 0,2552). Tento prepád indikuje, že teoretické výpočty budovy 4 vykazujú vysokú ekonomickú zraniteľnosť a pri prechode na trhové kritériá zlyhávajú, kým reálne dáta potvrdzujú jej konkurencieschopnosť.

Syntéza analýzy citlivosti vo vzťahu k dekarbonizácii

Realizovaná analýza citlivosti preukázala mimoriadnu robustnosť celkového hodnotenia. Napriek diametrálne odlišnému nastaveniu priorít – od čisto ekologických až po trhovu orientované – bol vo všetkých troch modeloch a pri oboch matematických algoritmoch ako najvhodnejší variant identifikovaný scenár B3 - AEC. Týmto je dokázané, že orientácia na hlbokú dekarbonizáciu prostredníctvom pokročilých technológií OZE a nízkouhlíkových materiálov nestráca opodstatnenie ani v situácii, kedy sú preferencie investorov zamerané primárne na ekonomickú návratnosť. Synergický efekt nízkeho stelesneného uhlíka a minimálnych prevádzkových nákladov reálnej prevádzky posúva tento koncept do pozície univerzálneho riešenia pre prechod stavebného sektora k uhlíkovej neutralite.

Tab. 6 Výsledky MCA pre navrhované scenáre

Vyvážený scenár		Ekocentrický scenár		Ekonomicko-realistický scenár	
B3 - AEC	0,927	B3 - AEC	0,9327	B3 - AEC	0,8994
B1 - AEC	0,8469	B3 - CEC	0,8591	B1 - AEC	0,8122

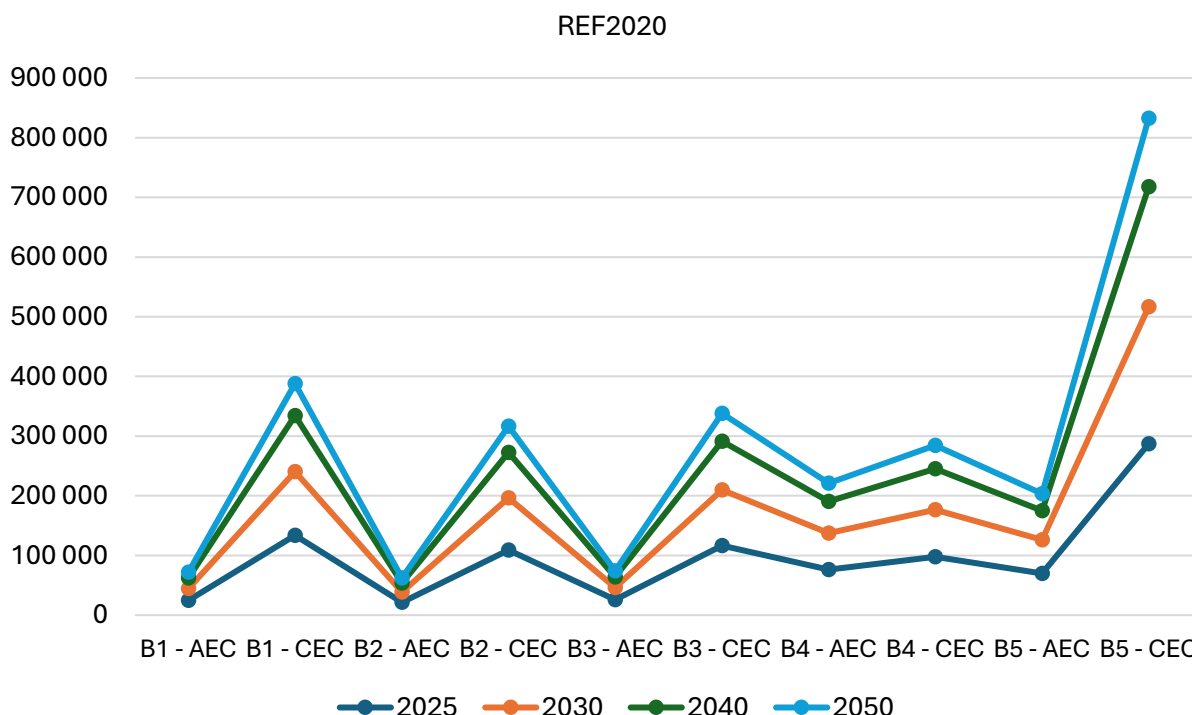
B3 - CEC	0,831	B1 - AEC	0,8184	B3 - CEC	0,7141
B5 - AEC	0,7818	B4 - AEC	0,787	B5 - AEC	0,6903
B4 - AEC	0,7772	B5 - AEC	0,7691	B4 - AEC	0,6833
B1 - CEC	0,756	B1 - CEC	0,7458	B1 - CEC	0,6747
B5 - CEC	0,6746	B5 - CEC	0,6869	B5 - CEC	0,4828
B4 - CEC	0,6031	B4 - CEC	0,6538	B2 - AEC	0,4343
B2 - AEC	0,2695	B2 - AEC	0,235	B4 - CEC	0,3456
B2 - CEC	0,154	B2 - CEC	0,1393	B2 - CEC	0,304

8.2.10 Metodika a vývoj emisných faktorov GWP pre výrobu elektriny a tepla v SR (scenár REF2020)

Na účely kvantifikácie prevádzkových emisií skleníkových plynov (GWP) v rámci posudzovania životného cyklu (LCA) budov v podmienkach Slovenskej republiky je kľúčové stanoviť vývojový trend emisného faktora pre kombinovanú výrobu elektriny. V zmysle referenčného scenára REF2020 (Referenčný scenár EÚ 2020) je uplatňovaná metodika dynamického modelovania energetického mixu, ktorá reflektuje schválené národné a európske politiky v oblasti dekarbonizácie do roku 2030 s výhľadom do roku 2050. Emisný faktor vyjadrený v jednotkách tCO_2/MWh sa vypočítava ako podiel celkových emisií skleníkových plynov vyprodukovaných v sektore energetiky a sumárneho množstva vygenerovanej elektrickej energie a tepla dodaného do siete.

Slovenský energetický mix pre výrobu elektriny vykazuje už v súčasnosti nízku uhlíkovú intenzitu, čo je dané dominantným podielom jadrovej energie a stabilným zastúpením vodných elektrární. V zmysle prognóz referenčného scenára REF2020 dochádza po roku 2020 k ďalšiemu zásadnému poklesu emisného faktora tCO_2/MWh , čo je determinované najmä postupným uvádzaním nových blokov jadrovej elektrárne Mochovce (3. a 4. blok) do trvalej prevádzky a definitívnym ukončením spaľovania domáceho hnedého uhlia v elektrárni Nováky v závere roka 2023. Tento metodický prístup uvažuje s progresívnym nahrádzaním tuhých fosílnych palív zemným plynom ako prechodným energetickým nosičom a masívnejšou integráciou obnoviteľných zdrojov energie (OZE), predovšetkým fotovoltických a veterných systémov. V dôsledku týchto transformácií je v prognózovaných dekádach zaznamenávaná stabilná dekarbonizácia energetickej siete, čo v

kontexte hodnotenia životného cyklu budov zásadne znižuje príspevok prevádzkovej fázy (modul B6) k celkovému potenciálu globálneho otepľovania a presúva ťažisko environmentálnej záťaže moderných budov do fázy stelesneného uhlíka stavebných materiálov.



Obr. 25 Výsledky GWP hodnotených budov po zohľadnení emisného faktora podľa REF2020

8.2.11 Diskusia a záver

V rámci tejto štúdie bol prostredníctvom integrácie metód LCA, LCC a MCA komplexne analyzovaný vplyv energetickej medzery (energy performance gap) na celkovú udržateľnosť piatich administratívnych budov. Výsledky multikriteriálnej analýzy jednoznačne potvrdili, že teoretické simulačné modely (CEC) založené na projektovaných údajoch často nadhodnocujú alebo skresľujú reálnu environmentálnu stopu budov, čo sa najvýraznejšie prejavilo pri objekte B4, ktorý pri trhovom scenári zaznamenal pre energetickú medzeru drastický prepád v rebríčku optimality. Naopak, ako mimoriadne stabilné a robustné riešenie bol naprieč všetkými simulovanými modelmi (vyváženým, ekocentrickým aj ekonomicko-realistickým) identifikovaný koncept B3 - AEC. Tento úspech je pripisovaný synergii nízkouhlíkového dizajnu (využitie tepelného čerpadla zem-voda a systému TABS) a reálnej prevádzkovej efektivity, ktorá dokáže generovať dostatočné finančné úspory na kompenzáciu počiatočných investičných nákladov. V kontexte prechodu Slovenska na nízkouhlíkové zastavané prostredie v zmysle scenára REF2020 a s progresívnou dekarbonizáciou slovenskej energetickej siete navyše vystupuje do popredia dôležitosť stelesneného uhlíka stavebných materiálov pred prevádzkovými emisiami. Ukazuje sa,

že zúženie hodnotenia biodiverzity výhradne na vplyvy zmeny klímy (GWP) poskytuje priamu úmeru medzi uhlíkovou stopou materiálov a globálnou degradáciou ekosystémov, pričom najväčšiu environmentálnu stopu a materiálovú náročnosť preukázala B2. Výskum potvrdzuje, že pre dosiahnutie skutočnej klimatickej neutrality je nevyhnutné opustiť čisto teoretické legislatívne výpočty spotreby energie a rozhodovacie procesy investorov už v počiatočných fázach oprieť o reálne prevádzkové scenáre (AEC) a komplexné WLCA hodnotenia.

Predkladaná vedecko-výskumná práca úspešne naplnila stanovené ciele a demonštrovala, že dekarbonizácia stavebného sektora sa nezaobíde bez prepojenia energetických, environmentálnych a ekonomických indikátorov počas celého životného cyklu budov. Analýzou citlivosti a neistoty bola overená spoľahlivosť hodnotiaceho rámca v nástroji MCA7, pričom kombinácia algoritmov WSA a TOPSIS priniesla jednoznačný konsenzus o optimalite technologického smerovania budovy B3 v reálnom prevádzkovom režime. Preukázané bolo, že orientácia na hlbokú dekarbonizáciu a integráciu pokročilých obnoviteľných zdrojov energie zostáva najlepšou možnou voľbou nielen z hľadiska prísnych ekologických cieľov, ale vykazuje vysokú konkurencieschopnosť aj v trhovo orientovanom ekonomickom modeli. Získané výsledky a metodické postupy poskytujú robustný aplikačný základ a cenné podklady pre projektantov, investorov a tvorcov verejných politík, pričom zdôrazňujú, že prechod k uhlíkovej neutralite zastavaného prostredia vyžaduje holistický prístup, minimalizáciu energetickej medzery a dôsledný výber nízkouhlíkových materiálov už vo fáze architektonického návrhu.

8.3 Špecifická analýza dekarbonizačného potenciálu a prevádzkovej bilancie Budovy B3

8.3.1 Charakteristika objektu a technologická konfigurácia

Budova B3 predstavuje v kontexte hodnoteného súboru budov špecifický model s vysokou mierou materiálovej udržateľnosti a optimalizovaným nízkouhlíkovým dizajnom. Z pohľadu materiálového zloženia a cirkularity vykazuje táto budova najpriaznivejšie parametre, keďže využíva takmer polovicu (48,8 %) všetkých obnoviteľných vstupov v rámci celého výskumného súboru. Absolútna hodnota $2,17\text{E}+08$ potvrdzuje primárnu orientáciu návrhu na konštrukčné materiály s nízkou viazanou uhlíkovou stopou (najmä na báze drevnej hmoty a prírodných kompozitov). V počiatočnom výrobnom štádiu (A1-A3) generuje Budova B3 environmentálnu záťaž na úrovni $32\,873,25\text{ PDF/m}^2/\text{rok}$ (čo predstavuje stratu biodiverzity na ploche cca $3,3\text{ ha/rok}$), čím sa radí k druhej materiálovo najšetrnejšej alternatíve, hneď po Budove B4.

Kľúčovým determinantom dekarbonizácie prevádzkovej fázy (modul B6) je integrácia nízkoteplotného tepelného čerpadla ako hlavného zdroja na transformáciu primárnej energie pre účely vykurovania a prípravy teplej vody. Použitie tejto technológie priamo reaguje na požiadavky kladené na budovy „pripravené na nulové emisie“ (Net-Zero Ready), ktorých podstatou je eliminácia priameho spaľovania fosílnych palív na mieste a zásadné zníženie dopytu po koncovej energii.

8.3.2 Porovnanie výpočtovej (CEC) a reálnej (AEC) spotreby energie

Komplexná inventarizačná analýza prevádzkových vstupov odhalila signifikantné disproporcie medzi legislatívnym výpočtovým režimom (CEC) a skutočne nameranými prevádzkovými údajmi (AEC).

- ✓ Scenár vypočítanej spotreby energie (CEC): Vychádza zo statických normatívnych výpočtov v zmysle energetickej certifikácie budov, uvažujúcich štandardizované užívateľské profily a priemerné tabuľkové klimatické dáta. Tento prístup vykazuje sklony k nadhodnocovaniu dopytu po energii, keďže nezohľadňuje dynamické správanie užívateľov a adaptívnu reguláciu systémov TZB.
- ✓ Scenár skutočnej spotreby energie (AEC): Založený na reálnych odpočtoch meradiel a prevádzkových záznamoch, ktoré reflektujú vysokú reálnu účinnosť aplikovaného tepelného čerpadla. Reálny prevádzkový režim dokazuje, že sezónny vykurovací faktor tepelného čerpadla umožňuje výraznú multiplikáciu dodanej elektrickej energie z distribučnej siete na teplo, čo radikálne znižuje ukazovateľ intenzity spotreby energie.

Tento nesúlad medzi CEC a AEC sa premieta do kľúčových environmentálnych indikátorov. V kategórii fosílného potenciálu globálneho otepľovania (GWP-fosílny) pre modul B6 vykazuje

scenár AEC výrazný dekarbonizačný posun. Zatiaľ čo výpočtový model predpovedá stabilný, no rigidný profil emisií, reálna prevádzka profituje z dvoch faktorov: reálne nižšieho dopytu po energii a postupnej dekarbonizácie slovenského elektroenergetického mixu (scenár REF2020). Vzhľadom na to, že po roku 2023 došlo k ukončeniu spaľovania domáceho hnedého uhlia a postupnému spúšťaniu nových jadrových blokov, reálny emisný faktor pre prevádzku tepelného čerpadla v Budove B3 progresívne klesá, čo potvrdzuje dynamická regresná analýza.

8.3.3 Vyhodnotenie environmentálnych a ekonomických indikátorov (LCA / LCC)

V rámci viackriteriálnej analýzy (MCA) bol pre Budovu B3 v oboch režimoch sledovaný komplexný súbor parametrov integrujúci environmentálne, ekonomické a obehové indikátory.

- ✓ Globálny potenciál otepľovania (GWP-celkový): Podobne ako pri Budove B1, aj pri Budove B3 reálna prevádzka (AEC) generuje podstatne nižšiu sumárnu bilanciu emisií skleníkových plynov než teoretický model CEC. Dominantná časť emisií v module B6 pochádza z neobnoviteľných (fosílnych) zdrojov poháňajúcich kompresor tepelného čerpadla, avšak vďaka vysokej účinnosti transformácie energie je hodnota $\text{kg CO}_{2e}/\text{m}^2$ minimalizovaná. Vplyv biogénneho uhlíka (GWP-biogénny) a transformácie pôdy (GWP-LULUC) ostáva zanedbateľný.
- ✓ Cirkularita a materiálové toky (BC): Napriek tomu, že materiálový graf indikuje, že väčšina objemu konštrukcie pozostáva z primárnych, pôvodných surovín (čo je spoločný znak všetkých piatich budov), Budova B3 dominuje v oblasti celkových obnoviteľných vstupov. Analýza však upozorňuje, že stratégia budovy je orientovaná skôr na obnoviteľnosť surovín (renewability) než na uzatvorenie materiálového cyklu prostredníctvom recyklácie (recyclability).
- ✓ Analýza nákladov životného cyklu (LCC): Ekonomický model hodnotený v priebehu 50-ročného obdobia potvrdzuje, že hoci implementácia tepelného čerpadla zvyšuje počiatočné kapitálové výdavky (vo fáze A0-A5), prevádzkové náklady na energiu (v module B6) sú v scenári AEC diametrálne nižšie v porovnaní s konvenčnými systémami spaľovania fosílnych palív. Vyššia počiatočná investícia do technologického vybavenia je tak spoľahlivo kompenzovaná úsporami počas životného cyklu.

8.3.4 Diskusia a záver

Budova B3 predstavuje optimálny príklad synergie medzi nízkouhlíkovou materiálovou základňou (vysoká miera obnoviteľných biogénnych materiálov) a efektívnym prevádzkovým manažmentom postaveným na elektrifikácii vykurovania prostredníctvom tepelného čerpadla. Signifikantný

rozdiel medzi CEC a AEC modelom demonštruje, že reálna udržateľnosť objektu prekonáva rigidné legislatívne predpoklady, najmä ak je prevádzka flexibilne prepojená s progresívne dekarbonizovanou energetickou sieťou. Pre plné naplnenie princípov cirkulárnej ekonomiky (CE) je však v budúcich projektoch potrebné posilniť podiel recyklovaných komponentov na úkor obnoviteľných zdrojov.

Akcent na integráciu nízkotepelných tepelných čerpadel v objektoch typu Budova B3 nie je len izolovaným technickým riešením, ale predstavuje základný pilier prebiehajúcej transformácie európskeho stavebníctva v zmysle prepracovanej smernice o energetickej hospodárnosti budov (EPBD IV). Prechod od centralizovaných alebo lokálnych systémov spaľovania fosílnych palív k distribuovaným systémom založeným na elektrifikácii tepla otvára dôležitú diskusiu o pripravenosti národných distribučných sústav. Masová implementácia týchto zariadení totiž presúva energetické zaťaženie z plynárenskej infraštruktúry priamo na elektroenergetickú sieť. Budova B3 v tomto kontexte slúži ako modelový príklad toho, ako môže správne dimenzovaná obálka budovy s nízkym dopytom po teple minimalizovať špičkové odbery prúdu, čím prispieva k stabilizácii siete a znižovaniu nárokov na posilňovanie prenosových kapacít.

Z metodologického hľadiska prináša detailné porovnanie scenárov CEC a AEC kritický pohľad na súčasné legislatívne nástroje energetického hodnotenia. Štandardizované výpočtové postupy (CEC), hoci sú nevyhnutné pre unifikované posudzovanie a certifikáciu, často vytvárajú tzv. „Performance Gap“ – priepasť medzi teoretickou deklaráciou a reálnym správaním budovy v čase. Pri Budove B3 sa ukazuje, že reálna prevádzka (AEC) dokáže vďaka adaptívnej regulácii, akumulárnym schopnostiam materiálov a reálnemu správaniu užívateľov dosahovať výrazne lepšie environmentálne výsledky, než predpovedajú statické modely. Tento poznatok jednoznačne argumentuje v prospech širšieho zavádzania dynamických simulácií a kontinuálneho energetického manažmentu (napr. formou energetických auditov založených na reálnych dátach z IoT senzorov) do bežnej inžinierskej praxe.

Environmentálna úspešnosť Budovy B3 je úzko spätá s fenoménom dekarbonizácie národného elektroenergetického mixu. Keďže tepelné čerpadlo spotrebováva elektrickú energiu, jeho celková uhlíková stopa v module B6 je priamo úmerná čistote zdrojov, ktoré túto energiu do siete dodávajú. Na rozdiel od plynových kotlov, ktorých emisná intenzita je počas celej životnosti konštantná a viazaná na emisie samotného metánu, prevádzka Budovy B3 sa stáva s postupujúcimi rokmi automaticky čistejšou bez nutnosti dodatočných investícií do technológie. Tento efekt synergie medzi čistou sieťou a efektívnym spotrebičom potvrdzuje, že elektrifikácia vykurovania je najbezpečnejšou investičnou stratégiou z hľadiska eliminácie rizika tzv. „uviaznutých aktív“ (Stranded Assets) v horizonte budúcich dekád.

V rovine obehového hospodárstva (cirkulárnej ekonomiky) otvára materiálová štruktúra Budovy B3 dôležitú paradigmatickú otázku. Hoci budova exceluje v indexoch využívajúcich obnoviteľné toky, dominantné zastúpenie primárnych, panenských materiálov (byť na báze biomasy) odhaľuje limitovaný pokrok v oblasti uzatvárania materiálových cyklov. Súčasný trend udržateľnosti sa nesmie spoliehať výhradne na masívne čerpanie nových prírodných zdrojov, nakoľko aj kapacity obnoviteľných lesných fondov sú obmedzené. Budova B3 tak jasne definuje trajektóriu pre ďalšiu generáciu udržateľnej architektúry: je nevyhnutné skombinovať nízku viazanú uhlíkovú stopu prírodných materiálov s princípmi „Design for Deconstruction“ (navrhovanie pre demontáž) a vyšším podielom recyklovaných zložiek, čím sa minimalizuje celkový tlak na ekosystémy a stratu biodiverzity.

Z hľadiska ekonomického hodnotenia nákladov životného cyklu (LCC) predstavuje prípadová štúdia Budovy B3 jasný argument proti jednostrannému zameraniu na investičné náklady. V slovenskom stavebnom prostredí pretrváva tendencia uprednostňovať lacnejšie technológie s nižšou počiatočnou cenou, čo však v dlhodobom horizonte 50 rokov vedie k neúmernému zaťaženiu investorov alebo správcov budov vysokými prevádzkovými nákladmi. Výsledky analýzy dokazujú, že integrácia pokročilých technológií, akými sú tepelné čerpadlá, poskytuje stabilný finančný štít voči volatilitě cien energií na globálnych trhoch. Budova B3 tak demonštruje, že ekologická zodpovednosť a ekonomická rentabilita nie sú v protiklade, ale naopak, predstavujú dve strany tej istej mince udržateľného rozvoja.

Výskum fenoménu „Performance Gap“ (rozdielu medzi projektovanou a reálnou spotrebou), ktorý bol detailne analyzovaný pri porovnaní scenárov CEC a AEC v Budove B3, je v súčasnej akademickej literatúre široko diskutovanou témou. Podľa rozsiahlych prípadových štúdií publikovaných v časopisoch vydavateľstva MDPI (napr. Sustainability a Energies) a indexovaných v databázach, statické normatívne výpočty energetických certifikátov vykazujú inherentné limity, nakoľko nedokážu presne podchytiť stochastický charakter užívateľského správania a reálne prevádzkové straty v potrubných rozvodoch a odovzdávacích prvkoch systémov TZB [1]. Monitorovacie systémy nasadené na reálnych objektoch potvrdzujú, že kým tradičné výpočtové modely predpokladajú konštantné prevádzkové profily, reálna dynamika vnútorného prostredia vykazuje signifikantné fluktuácie, ktoré priamo ovplyvňujú reálnu účinnosť (COP) integrovaných tepelných čerpadel [2].

Inovatívny prístup v technologickej konfigurácii Budovy B3 sa opiera o štúdie v popredných indexovaných časopisoch, ktoré sa intenzívne zameriavajú na multikriteriálnu optimalizáciu integrujúcu LCA a LCC analýzy [3]. Autori zaoberajúci sa citlivosťou uhlíkovej stopy budov na zmeny v elektroenergetickom mixe dokazujú, že integrácia tepelných čerpadel vzduch-voda v

novo navrhovaných nízko-teplotných objektoch vedie v európskom kontexte k priemernému zníženiu emisií skleníkových plynov o viac ako 50 % v porovnaní s konvenčnými plynovými kotlami [4]. Tieto publikácie zdôrazňujú, že pre dosiahnutie pravdivých výsledkov v 50-ročnom životnom cykle (modul B6) je nevyhnutné opustiť statické emisné faktory a nahradiť ich dynamickými prognózami vývoja dekarbonizácie elektrických sietí, čo bolo aplikované aj v modeli Budovy B3 [5].

Súčasný výskum v oblasti obehového hospodárstva v stavebníctve, dostupný prostredníctvom databáz, kriticky analyzuje materiálové toky a udržateľnosť stavebných systémov. Články publikované vo vedeckých databázach upozorňujú na paradox, s ktorým konfrontuje odbornú verejnosť aj Budova B3 – vysoká miera biogénnych a obnoviteľných materiálov síce radikálne znižuje viazanú uhlíkovú stopu v počiatočných fázach životného cyklu (A1-A3), no bez dôslednej implementácie recyklovaných zložiek a dizajnu pre demontáž (Design for Deconstruction) nedochádza k plnému uzatvoreniu materiálových slučiek [6]. Výskumníci zhodne tvrdia, že udržateľná stratégia budúcich stavieb musí vyvažovať obnoviteľnosť (renewability) s recyklovateľnosťou (recyclability) v zmysle indikátorov cirkularity (Circular Economy indicators) [7].

V oblasti ekonomického hodnotenia nákladov životného cyklu (LCC) poskytuje databáza robustnú platformu pre matematické modelovanie finančnej dlhovekosti budov. Viaceré štúdie potvrdzujú, že počiatočný nárast investičných nákladov spojený s nákupom progresívnych technológií, akými sem patria tepelné čerpadlá, vykazuje vysokú stabilitu voči budúcim makroekonomickým otrasom. Podľa ekonomických modelov, prevádzka systémov s nízkym dopytom po koncovej energii (AEC scenár) pôsobí ako finančný tlmič (buffer) voči volatilitě cien energií a zavedeniu budúcich uhlíkových daní v sektore budov [4]. Tieto závery validujú ekonomickú štruktúru Budovy B3, kde sú vyššie počiatočné náklady plne amortizované nízkymi operačnými výdavkami.

Záverečná syntéza metodických prístupov, opierajúca sa o najnovšie štúdie, indikuje jasný trend smerom k tzv. „Whole-Life Carbon“ (WLC) hodnoteniu budov [8]. Tento prístup, podporovaný aj európskymi smernicami, vyžaduje simultánne posudzovanie viazaného a prevádzkového uhlíka pomocou prepojenia dynamických simulácií budov s databázami environmentálnych vyhlásení o produktoch (EPD). Prípadová štúdia Budovy B3, v ktorej boli tieto princípy implementované, sa tak plne stotožňuje s najprogresívnejšou vedeckou paradigmou súčasnosti, reprezentovanou autorskými kolektívmi publikujúcimi vedecké štúdie a potvrdzuje, že dekarbonizácia prevádzkovej fázy musí ísť ruka v ruku s hlbokou materiálovou optimalizáciou konštrukčnej schémy [3, 8]

Literatúra

- [1] Menezes, A. C., Cripps, A., Bouchlaghem, D., & Buswell, R. (2011). Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings. In Third International Conference on Applied Energy, Perugia, Italy, 16-18 May 2011 (pp. 1225-1240). Nottingham Trent University.
- [2] Gupta, R., & Kotopouleas, A. (2018). Magnitude and extent of building fabric thermal performance gap in UK low energy housing. *Applied Energy*, 222, 673-686.
- [3] Gatea, A., Batcha, M. F. M., & Tawweekun, J. (2020). Energy efficiency and thermal comfort in hospital buildings: A review. *International Journal of Integrated Engineering*, 12(3), 33-41.
- [4] Tucci, F., Baiani, S., Altamura, P., Tulelli, V., & Rossini, G. (2025, June). Low Carbon Bio-Based Building Materials from Organic Waste: A Closed-Loop Production Model Within Circular Neighbourhoods. In Getting to Zero-Beyond Energy Transition Towards Carbon-Neutral Mediterranean Cities: Selected Papers from the World Renewable Energy Congress Med Green Forum 2024 (pp. 927-938). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [5] Leben, J. (2018). Implementation of Hydrogen Technologies in Slovenia: Identification of Resistance to Change Factors by a Comparative Study.
- [6] Gallego-Schmid, A., Chen, H. M., Sharmina, M., & Mendoza, J. M. F. (2020). Links between circular economy and climate change mitigation in the built environment. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121115.
- [7] Slavkovic, K., & Stephan, A. (2025). Dynamic life cycle assessment of buildings and building stocks—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115262.
- [8] Carvalho, J. G. R. O., Cecchin, D., De Azevedo, A. R. G., Do Carmo, D. F., Paes, J. L., Ferraz, P. F. P., ... & Bambi, G. (2025). Life cycle assessment (LCA) in construction materials—Review. *Agronomy Research*, 23, 293-321.

9. Kvantifikácia CO_{2e} pre spotrebu energie za jednotlivé roky pre mesto Košice

Táto kapitola sa venuje kvantifikácii a analýze ekvivalentného množstva CO₂ emisií na základe spotrieb elektrickej energie v rokoch 2019-2023 v jednotlivých odvetviach v meste Košice. Údaje o spotrebách elektrickej energie poskytla spoločnosť Východoslovenská distribučná, a.s. Mlynská 31, 042 91 Košice.

Tabuľka 7 prezentuje celkové emisie za jednotlivé roky a ich medziročnú zmenu. Emisie sa pohybujú od 1 998 454 tCO_{2e} po 4 585 991 tCO_{2e}.

Tab. 7 Emisie CO_{2e} za jednotlivé roky

Rok	Emisie CO _{2e} [kg CO _{2e}]	Medziročná zmena
2019	2 148 272 967	–
2020	2 248 056 071	+4,64 %
2021	2 595 642 508	+15,46 %
2022	1 998 454 399	–23,01 %
2023	4 585 991 688	+129,48 %

V rokoch 2019 – 2021 dochádzalo k postupnému rastu emisií:

- medzi rokmi 2019 a 2020 bol nárast o 99,8 mil. kg CO_{2e} (+4,6 %),
- medzi rokmi 2020 a 2021 bol nárast o 347,6 mil. kg CO_{2e} (+15,5 %).

Tento trend indikuje rast energetickej náročnosti alebo zvýšenú aktivitu sledovaných sektorov. V marci 2020 začala pandémia COVID-19, ktorá ovplyvnila spotrebu energií. Teda časť roka prebehla bez obmedzení. Mierny rast emisií mohol byť spôsobený:

- zotrvačnosťou energetickej spotreby,
- nárastom rezidenčnej spotreby (home office),
- vykurovaním domácností.

V roku 2021 aj napriek pokračujúcim opatreniam došlo k výraznému nárastu emisií, čo naznačuje, že:

- obmedzenia nemali zásadný vplyv na celkovú uhlíkovú stopu,

- niektoré sektory mohli fungovať bez významného obmedzenia,
- alebo došlo k zvýšeniu energetickej náročnosti (napr. ceny energií, zmena štruktúry spotreby).

V roku 2022 emisie klesli na 1,998 mld. kg CO₂e, čo predstavuje:

- pokles o 597 mil. kg CO₂e,
- zníženie o 23,0 % oproti roku 2021.

Ide o najvýraznejší pokles v sledovanom období. Tento pokles už časovo nesúvisí priamo s COVID-19, keďže väčšina obmedzení bola ukončená. Možnými príčinami môžu byť:

- úsporné opatrenia,
- zníženie spotreby energií,
- externé ekonomické faktory (napr. ceny energií),
- optimalizácia spotreby.

V roku 2023 došlo k prudkému zvýšeniu emisií na 4,586 mld. kg CO₂e, čo predstavuje:

- nárast o 2,588 mld. kg CO₂e,
- medziročné zvýšenie o 129,5 %,
- viac ako dvojnásobok hodnoty roku 2022.

Tento nárast zásadne mení celkový charakter vývoja a predstavuje významnú odchýlku od predchádzajúceho trendu.

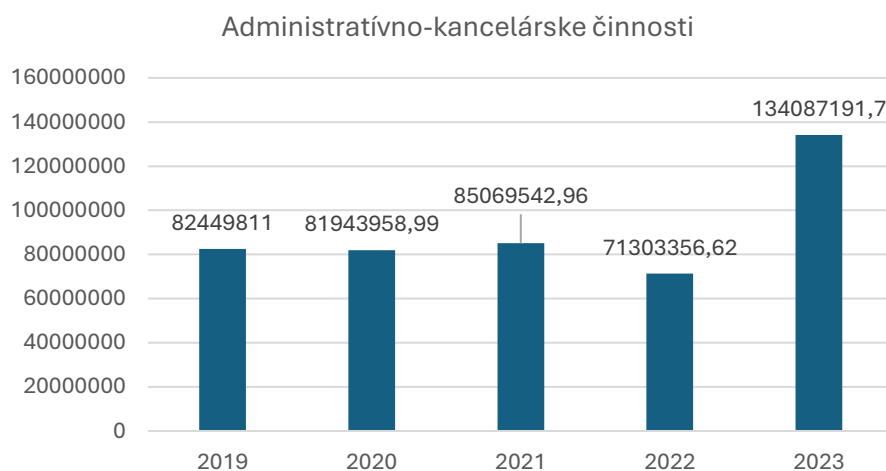
Na základe predchádzajúceho je možné konštatovať, že:

- v sledovanom období nebol dosiahnutý stabilný klesajúci trend emisií,
- vývoj je charakteristický vysokou medziročnou variabilitou,
- rok 2023 predstavuje zásadnú štrukturálnu zmenu v objeme produkovaných emisií.

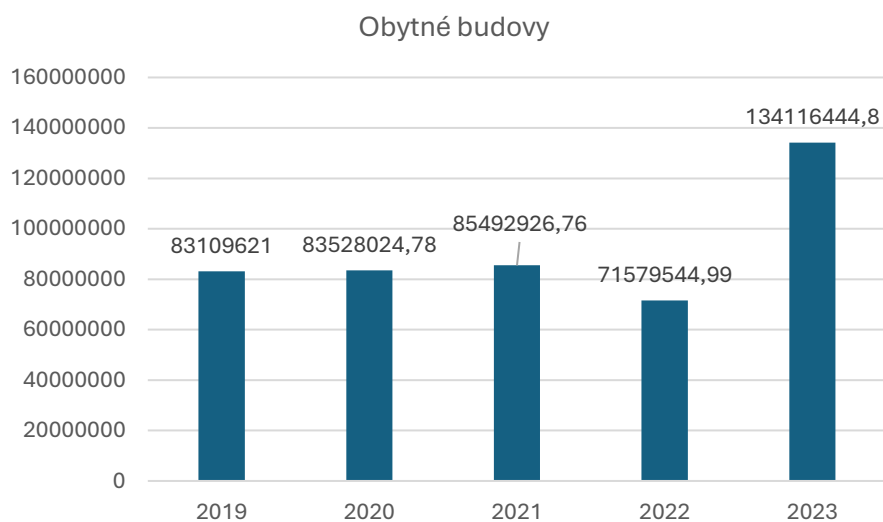
Pre objektívne hodnotenie je nevyhnutné:

- preveriť metodiku výpočtu emisií v roku 2023,
- analyzovať sektory s najvyšším podielom na náraste,
- identifikovať hlavné zdroje emisného rastu,
- posúdiť vplyv zmeny vstupných faktorov (spotreba energie, emisné faktory, rozsah sledovaných subjektov).

Grafy 26-50 znázorňujú celkové emisie CO_{2e} pre rôzne odvetvia v sledovanom období.



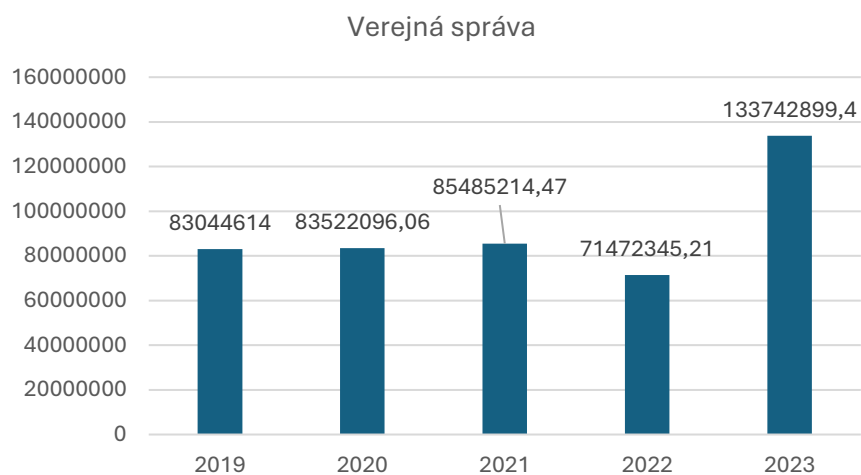
Obr. 26 Emisie CO_{2e} pre administratívno-kancelárske činnosti



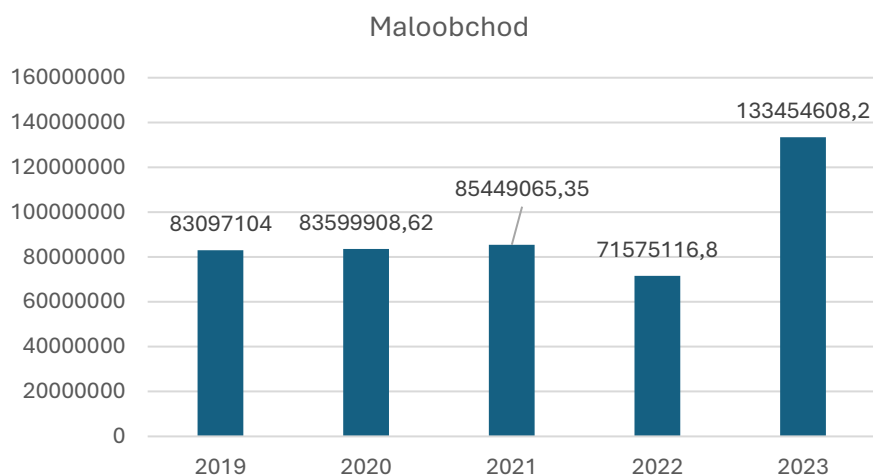
Obr. 27 Emisie CO_{2e} pre obytné budovy



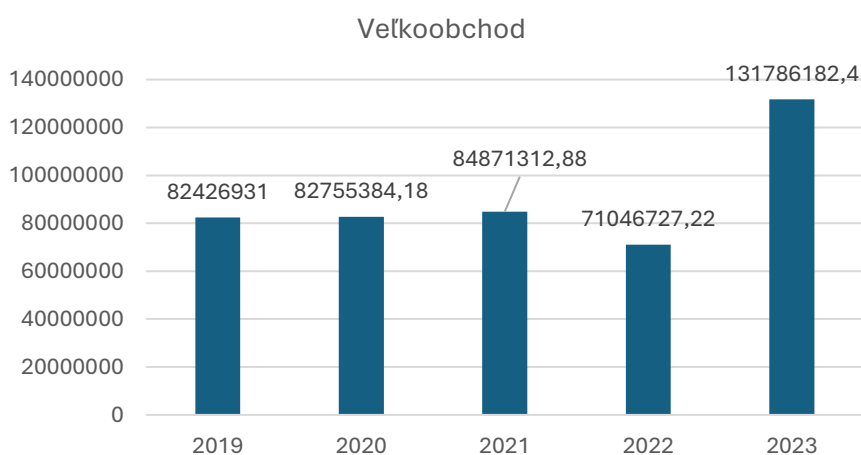
Obr. 28 Emisie CO_{2e} pre školstvo



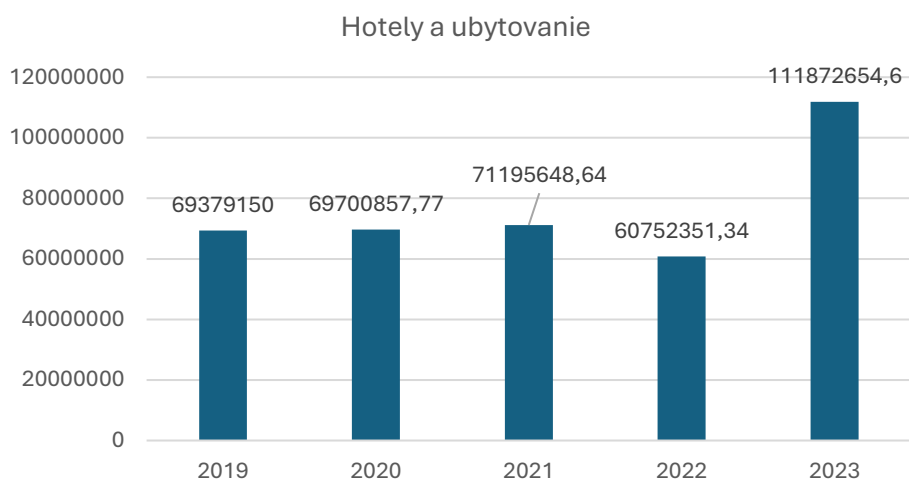
Obr. 29 Emisie CO₂e pre verejnú správu



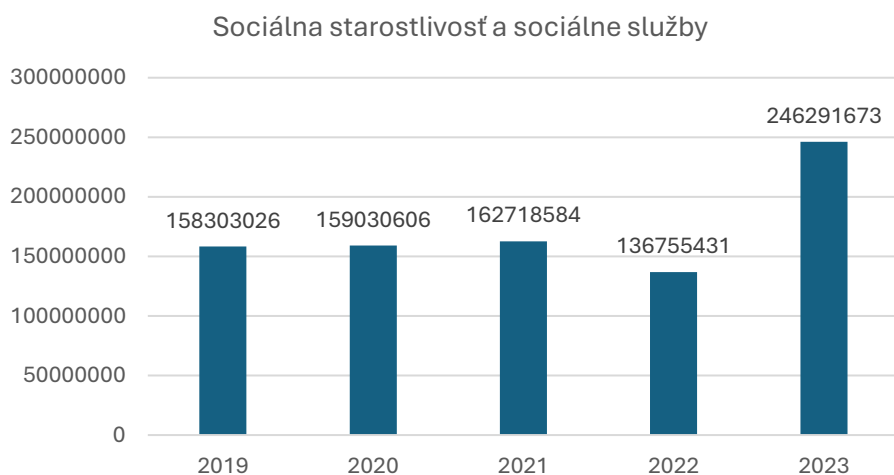
Obr. 30 Emisie CO₂e pre maloobchod



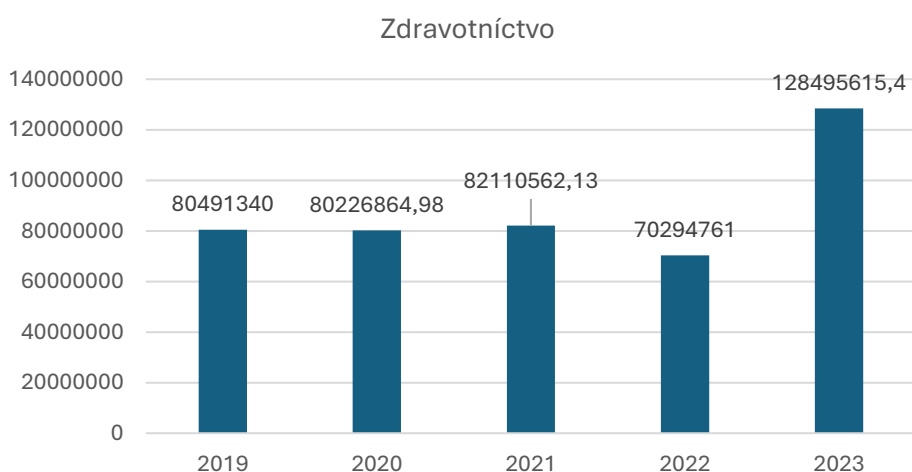
Obr. 31 Emisie CO₂e pre veľkoobchod



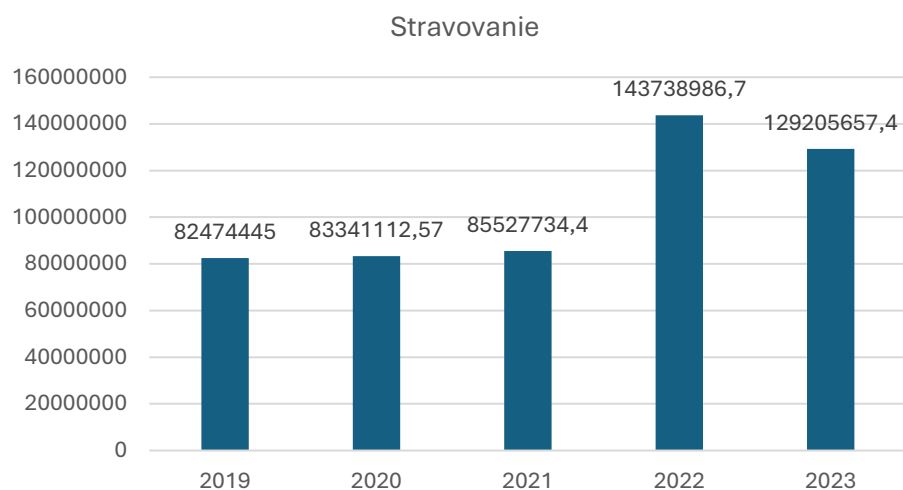
Obr. 32 Emisie CO₂e pre hotely a ubytovanie



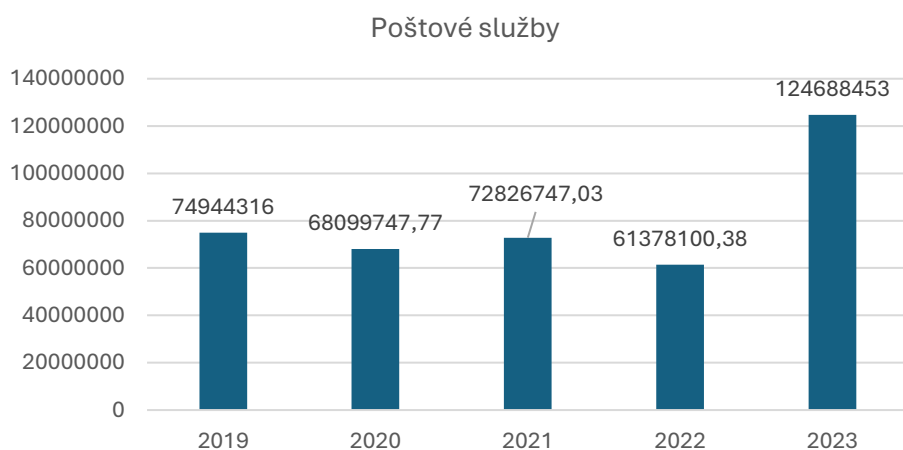
Obr. 33 Emisie CO₂e pre sociálnu starostlivosť a sociálne služby



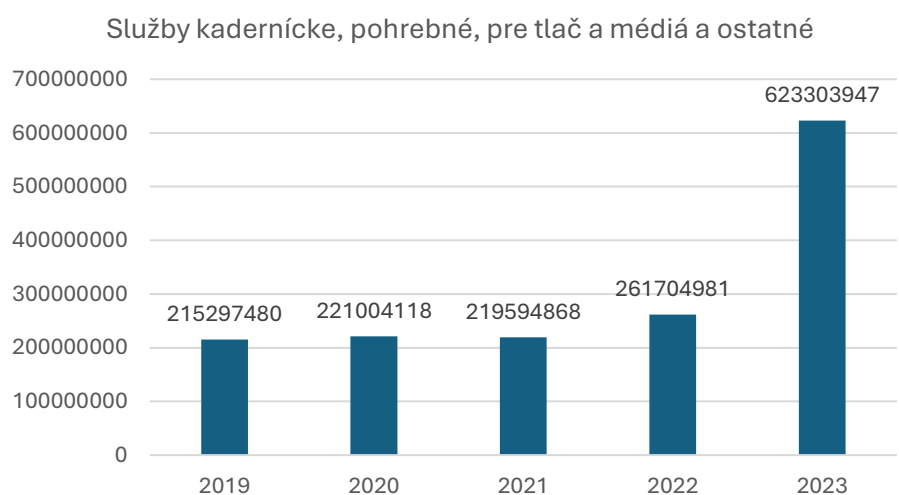
Obr. 34 Emisie CO₂e pre zdravotníctvo



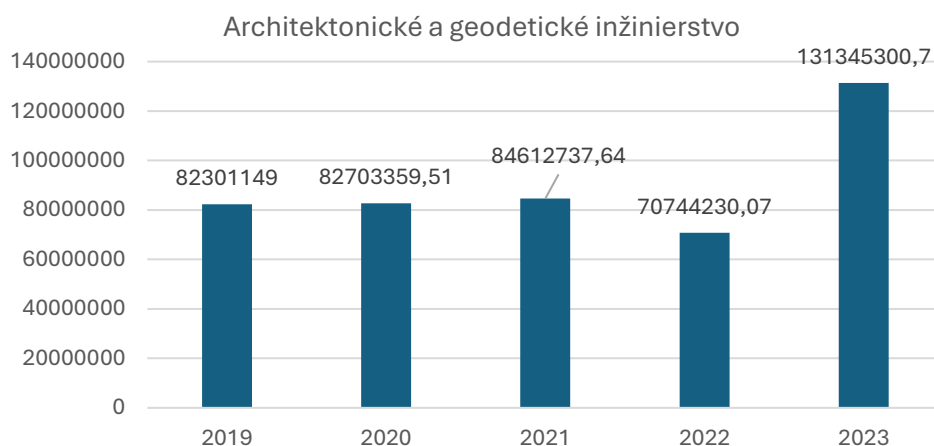
Obr. 35 Emisie CO₂e pre stravovanie



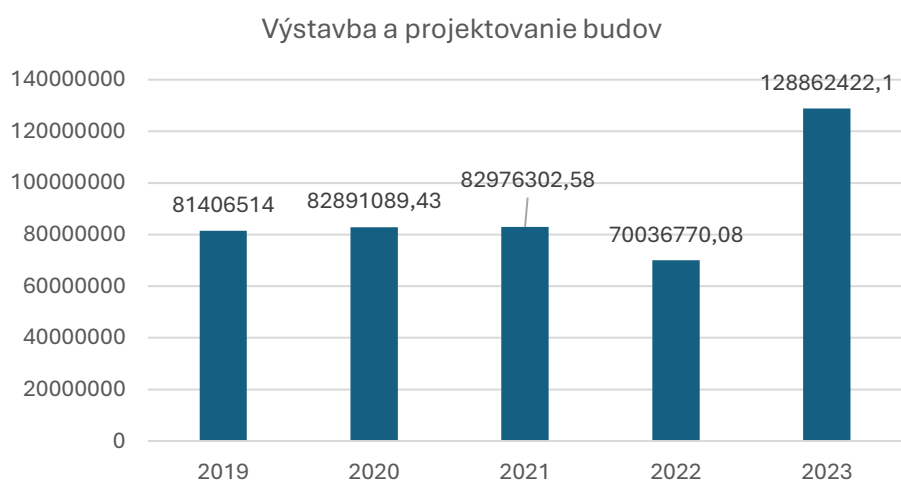
Obr. 36 Emisie CO₂e pre poštové služby



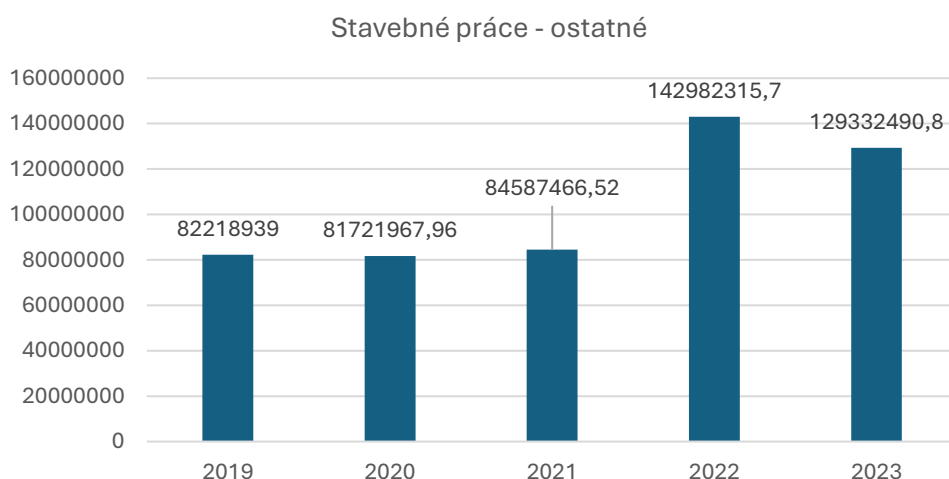
Obr. 37 Emisie CO₂e pre služby kadernícke, pohrebné, tlač, médiá a iné



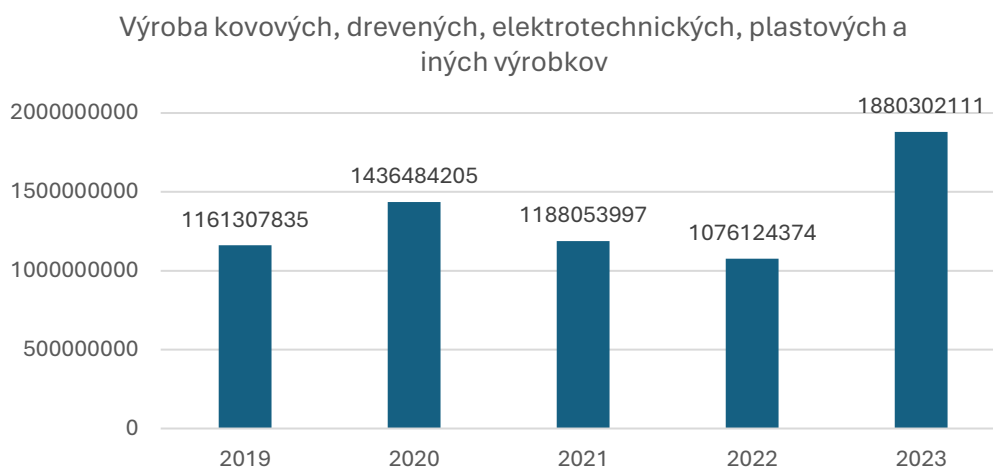
Obr. 38 Emisie CO₂e pre architektonické a geodetické inžinierstvo



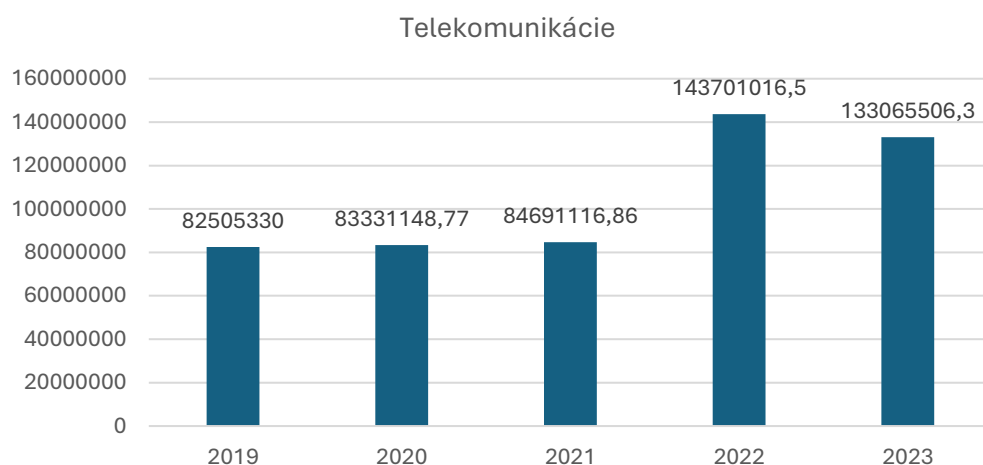
Obr. 39 Emisie CO₂e pre výstavbu a projektovanie budov



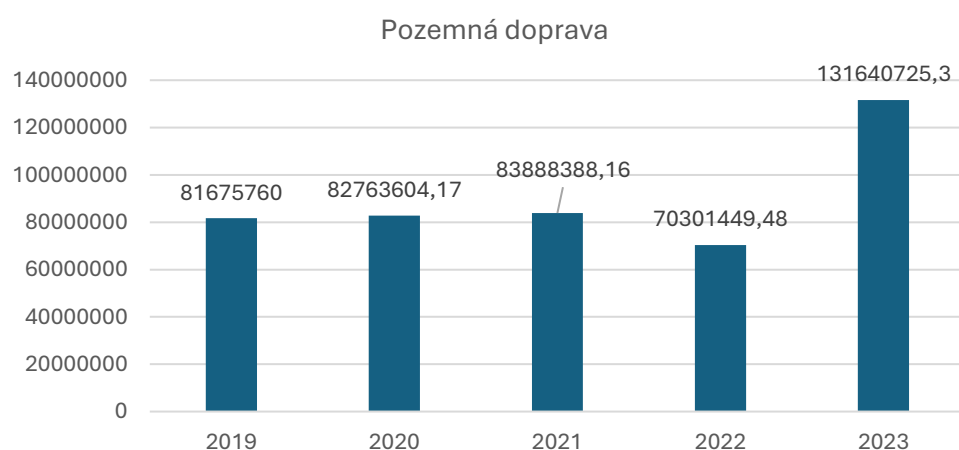
Obr. 40 Emisie CO₂e pre stavebné práce – ostatné



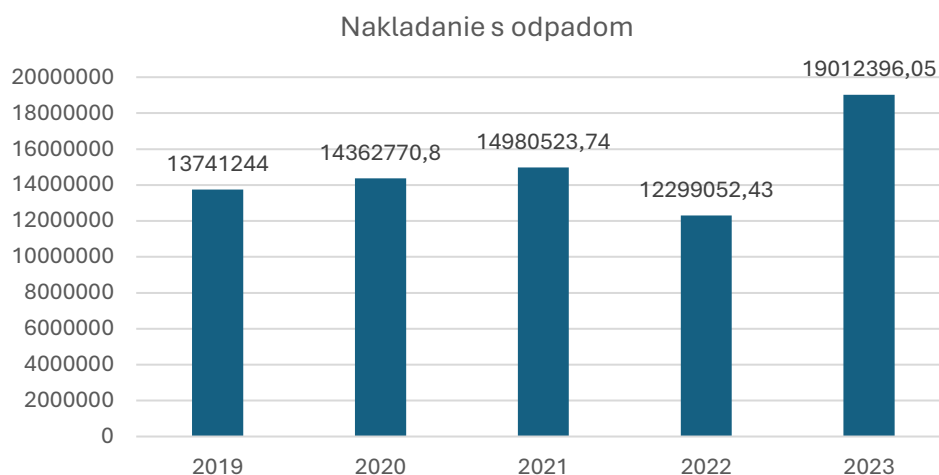
Obr. 41 Emisie CO₂e pre výrobu kovových, drevených a iných výrobkov



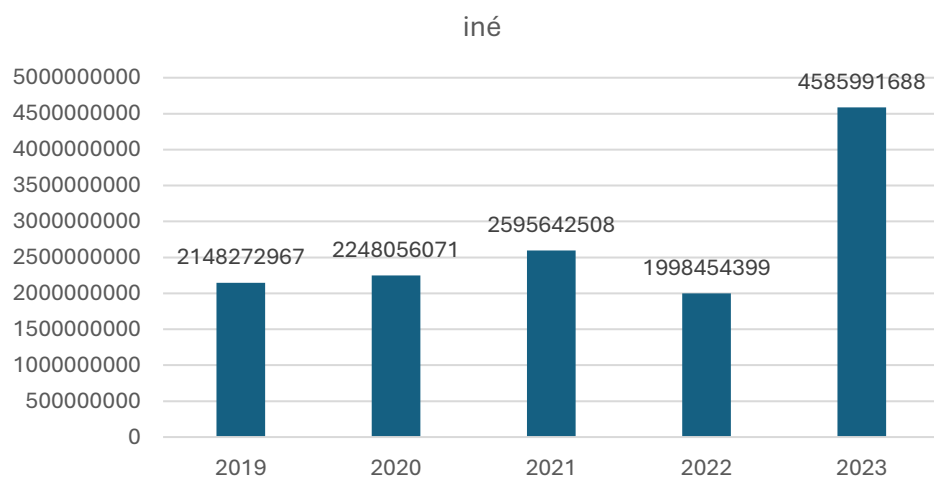
Obr. 42 Emisie CO₂e pre telekomunikácie



Obr. 43 Emisie CO₂e pre pozemnú dopravu

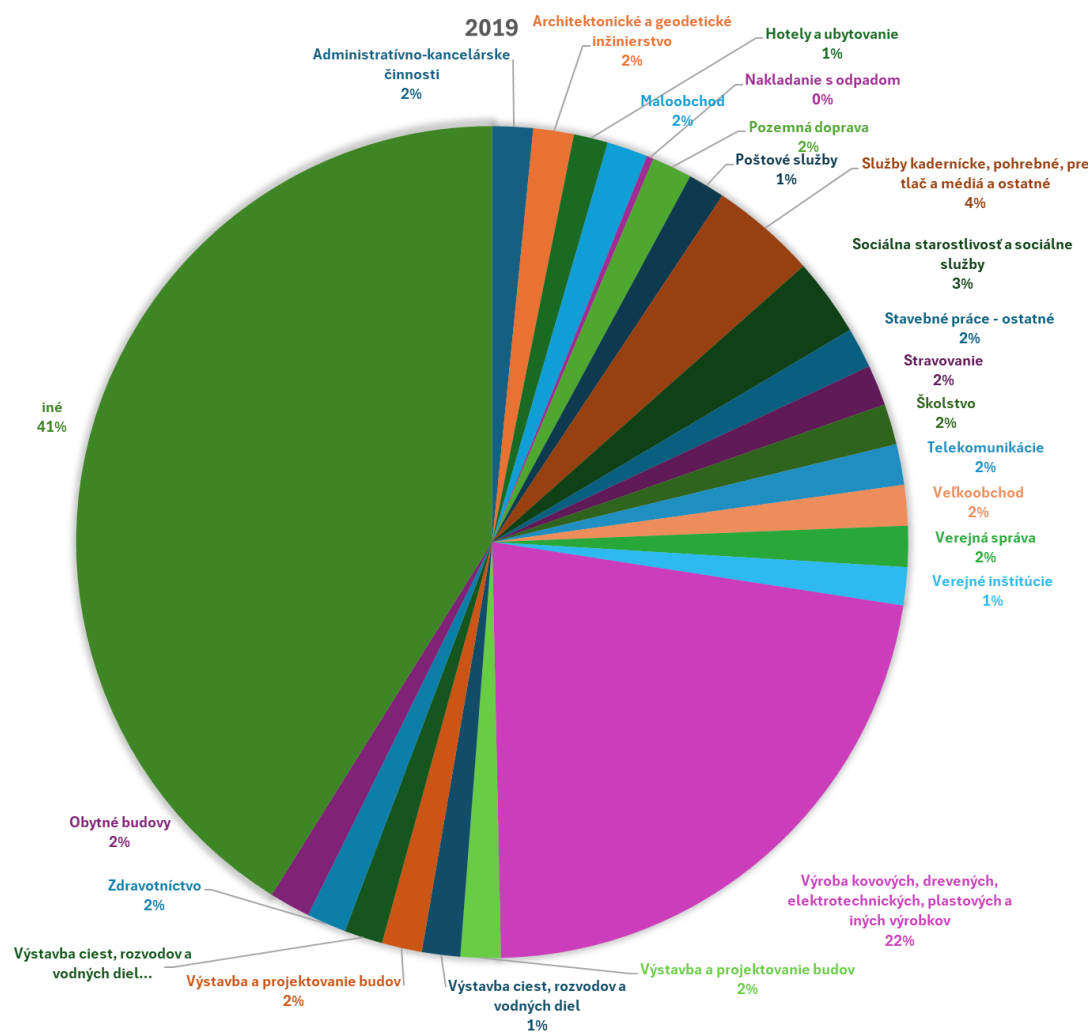


Obr. 44 Emisie CO₂e pre nakladanie s odpadom

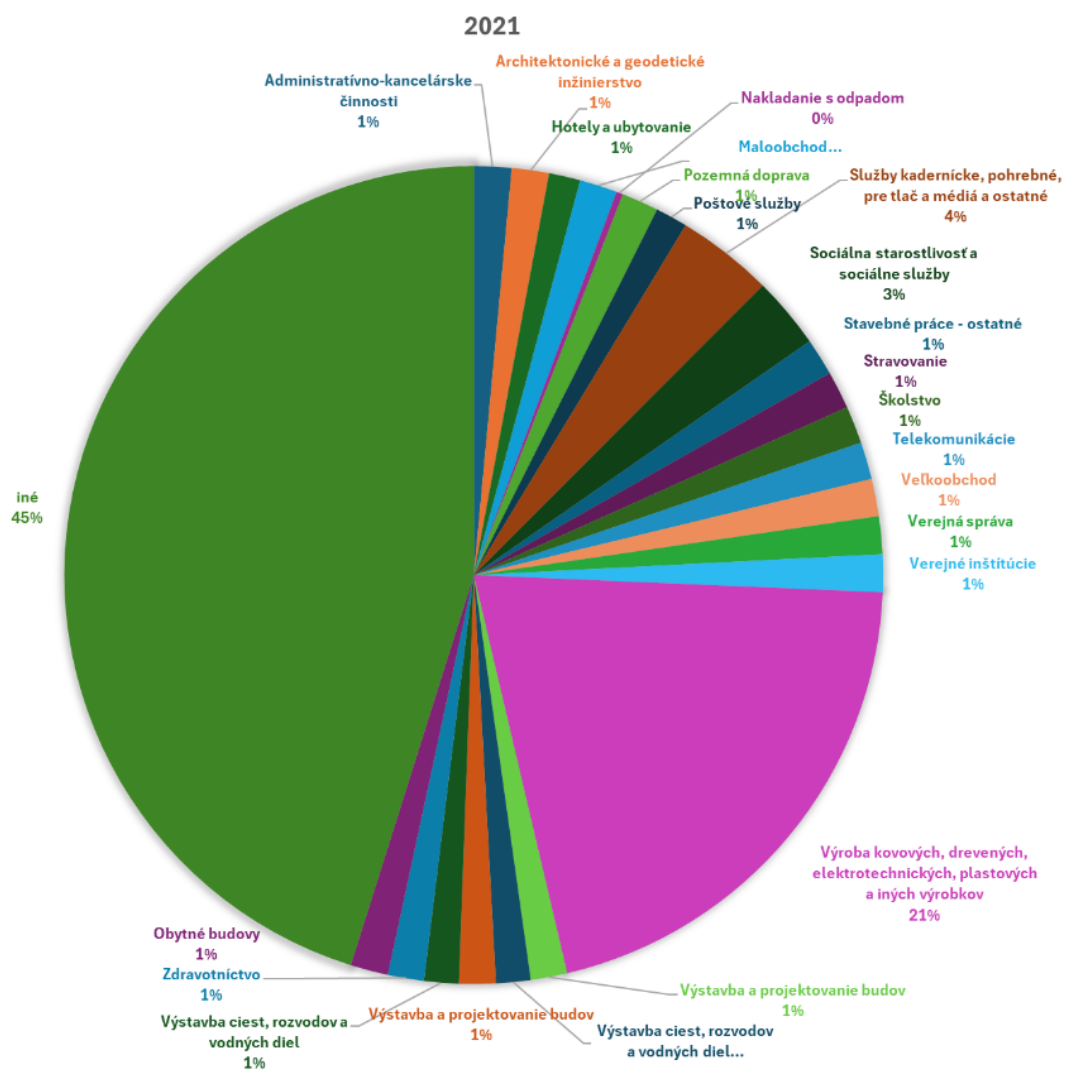


Obr. 45 Emisie CO₂e pre iné odvetvia

Nasledujúce koláčové grafy znázorňujú percentuálny podiel jednotlivých sektorov na celkových emisiách CO₂e v danom roku. Analýza sa zameriava na najvýznamnejšie sektory a vývoj ich podielu v čase.

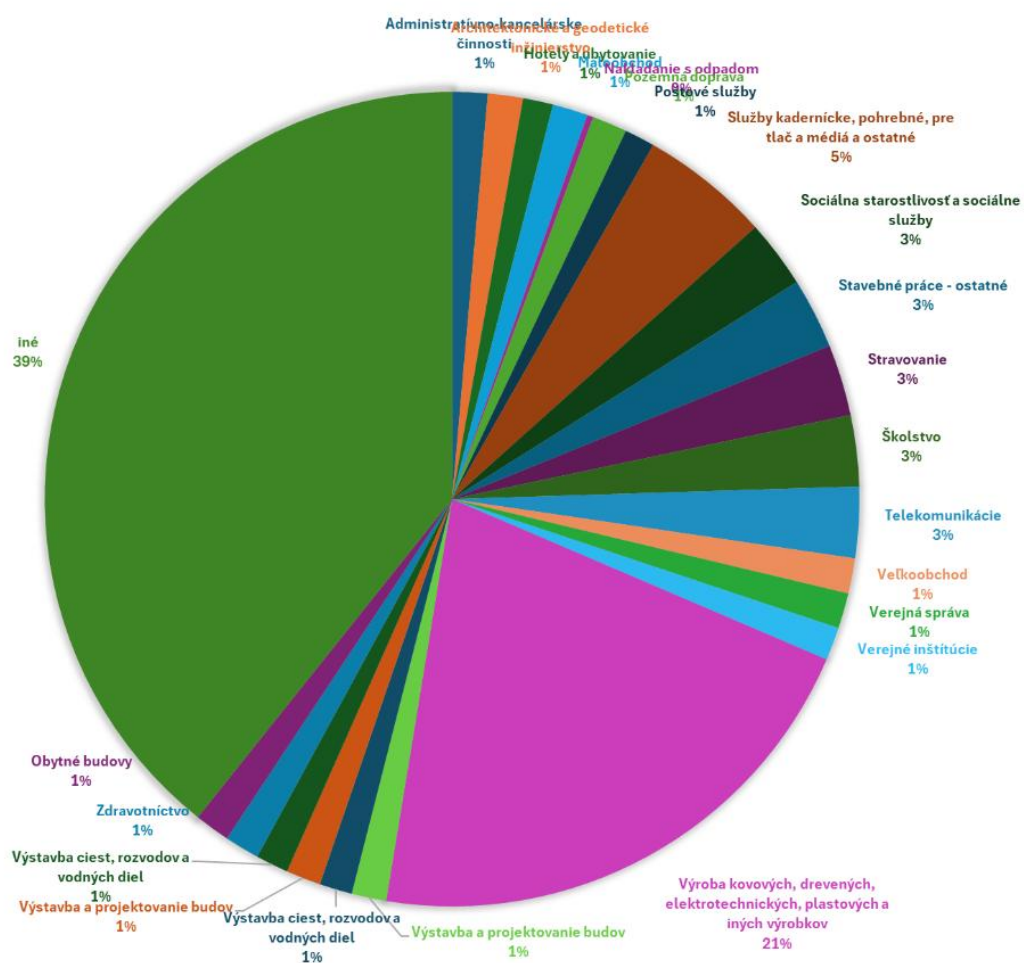


Obr. 46 Podiel emisií CO₂e v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2019

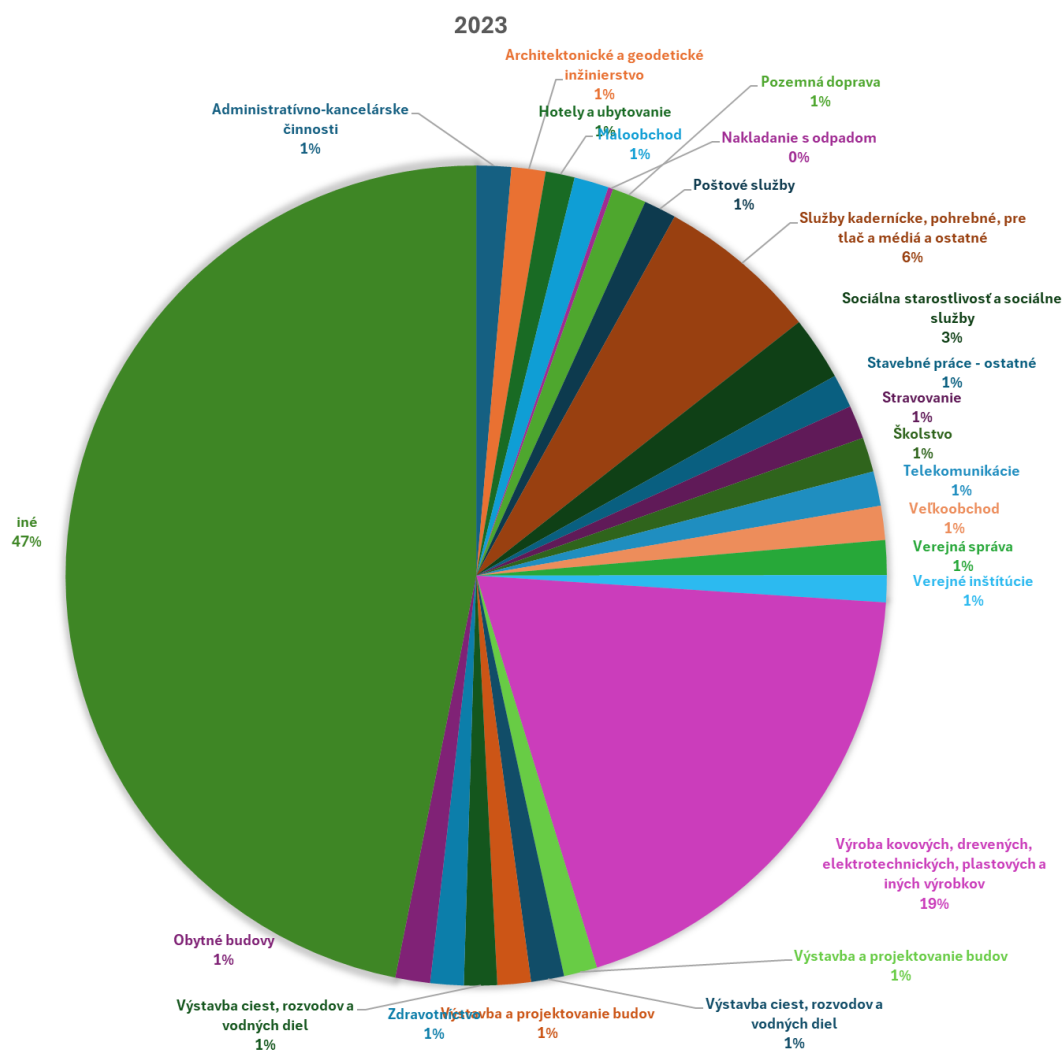


Obr. 48 Podiel emisií CO₂e v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2021

2022



Obr. 49 Podiel emisií CO₂e v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2022



Obr. 50 Podiel emisií CO_{2e} v jednotlivých odvetviach hospodárstva v roku 2023

Dominantný sektor počas celého sledovaného obdobia je Výroba kovových, drevených, elektrotechnických, plastových a iných výrobkov. Jeho podiel na celkových emisiách CO_{2e} je uvedená v tabuľke 8.

Tab. 8 Podiel odvetvia „Výroba kovových, drevených, elektrotechnických, plastových a iných výrobkov“ na celkových dopadoch

Rok	Podiel na emisiách CO _{2e}
2019	38,57 %
2020	47,45 %
2021	35,04 %

2022	36,36 %
2023	30,81 %

Z výsledkov vyplýva, že sa jedná o jednoznačne najväčší zdroj emisií v meste Košice. V roku 2020 sektor výrazne zosilnel (takmer polovica všetkých emisií). Od roku 2021 jeho relatívny podiel postupne klesal. V roku 2023 síce absolútne emisie rástli, ale podiel klesol, čo znamená, že rástli aj ostatné sektory. Je možné konštatovať, že tento sektor je kľúčový pre emisnú politiku mesta.

Z grafov vyplýva, že ďalšie významné podiely na emisiách CO_{2e} tvoria:

- Obytné budovy
- Administratívno-kancelárske činnosti
- Zdravotníctvo
- Výstavba a projektovanie budov
- Doprava a infraštruktúra

Tieto sektory však jednotlivé samostatne zvyčajne nedosahujú podiel dominantného výrobného sektora. V roku 2020 tento výrobný sektor dosahoval 47,45 % podiel. To znamená, že napriek pandémie COVID-19 výroba výrazne dominovala. Nie je zrejmé preskupenie sektorovej štruktúry. V roku 2021 podiel na emisiách klesol na 35 %. Pravdepodobne sa zvýšil podiel iných sektorov (rezidenčný, služby). Avšak je možné konštatovať, že pandémia nespôsobila zásadnú zmenu štruktúry, t.j. dominantný sektor zostal rovnaký.

Aj keď v roku 2022 došlo k poklesu celkových emisií CO_{2e} o 23 %, štruktúra zostala podobná:

- výroba stále tvorila viac než tretinu všetkých emisií (36,36 %),
- pokles bol plošný, nie štruktúrny.

V roku 2023 došlo k prudkému nárastu emisií CO_{2e}, avšak podiel výroby klesol na 30,81 %. To znamená, že rast emisií CO_{2e} nebol spôsobený výlučne týmto sektorom. Zvýšil sa podiel aj ostatných sektorov, teda emisie sa rozložili medzi viac odvetví.

Z hľadiska riadenia uhlíkovej stopy mesta je možné konštatovať, že:

- najväčší potenciál redukcie je v priemyselnom sektore,
- druhý významný priestor je v budovách (obytné + administratívne),
- štruktúra emisií je koncentrovaná – nie je rovnomerne rozdelená.

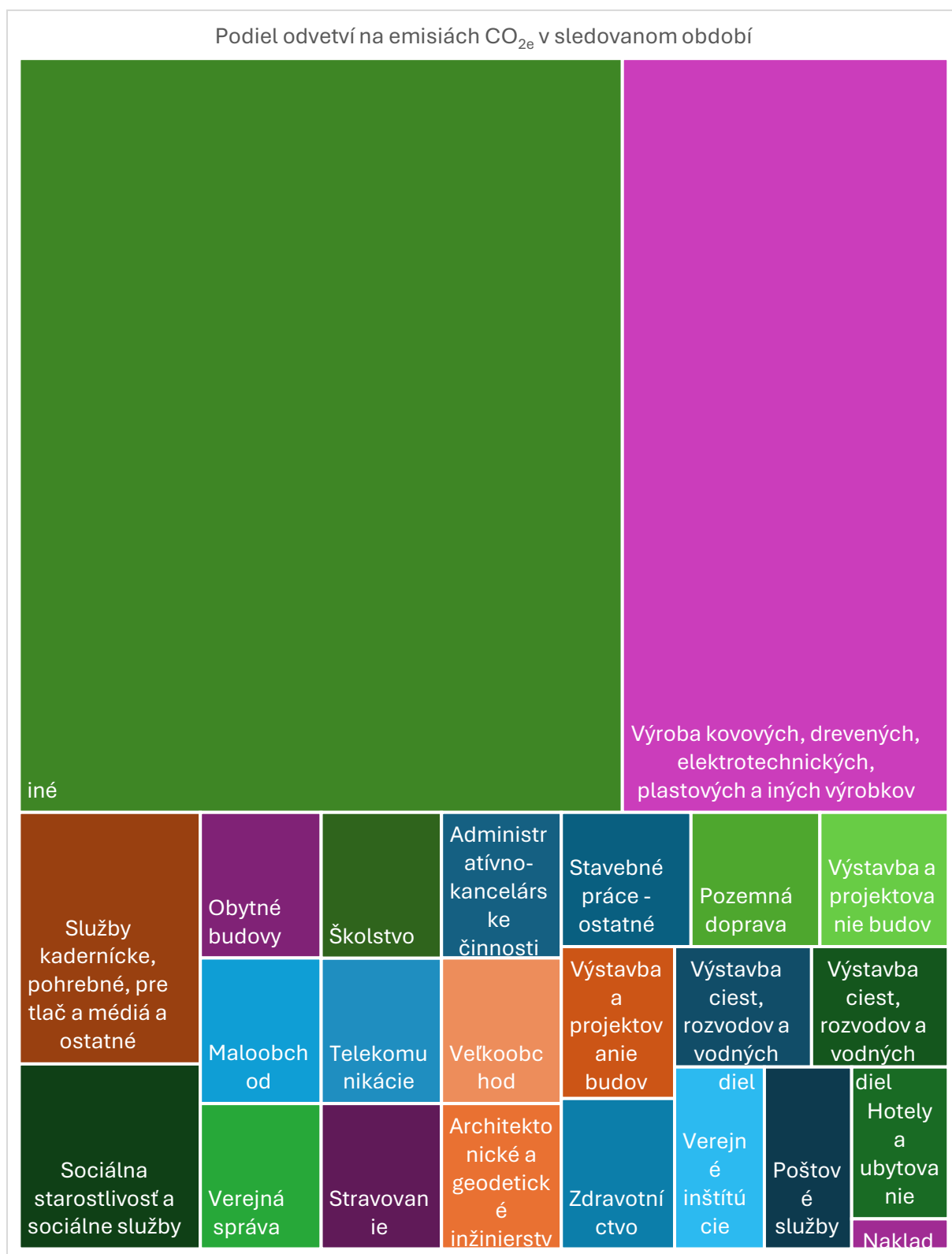
Najvyššie emisie CO_{2e} v roku 2023 dosiahli nasledovné sektory:

- Výroba kovových, drevených, elektrotechnických výrobkov a strojárstvo (19,20%)
- Služby kadernícke, pohrebné, pre tlač a médiá a ostatné služby (6,37%)
- Sociálna starostlivosť a sociálne služby (2,52%)
- ostatné odvetvia zahrnuté spolu (39,03%).

Analýza odvetvovej štruktúry emisií CO_{2e} potvrdzuje, že dominantným zdrojom emisií v meste Košice je výrobný sektor, ktorý v roku 2023 generoval približne 1,88 mld. kg CO_{2e}. Tento sektor dlhodobo predstavuje najvýznamnejší príspevok k celkovej uhlíkovej stope mesta.

Druhý najvýznamnejší sektor – ostatné služby – dosahuje približne tretinovú hodnotu oproti výrobnému sektoru, čo naznačuje výraznú nerovnomernosť rozdelenia emisnej záťaže. Výpočet Herfindahl-Hirschmanovho indexu (HHI) ukazuje, že napriek existencii dominantného sektora nie je emisná štruktúra extrémne koncentrovaná. Hodnoty HHI v intervale 0,014 – 0,019 indikujú relatívne diverzifikovanú štruktúru emisií. Hodnota pod 0,15 (pri použití klasickej ekonomickej škály) znamená nízku koncentráciu. Emisie teda nie sú extrémne monopolizované jedným sektorom, hoci existuje dominantný sektor.

Z hľadiska environmentálnej politiky mesta predstavuje výrobný sektor kľúčovú oblasť pre implementáciu dekarbonizačných opatrení, pričom významný potenciál znižovania emisií existuje aj v sektore služieb a nehnuteľností.



Obr. 51 Podiel odvetví na emisiách CO_{2e} v sledovanom období

Analýza vývoja emisií CO_{2e} v meste Košice za obdobie rokov 2019 – 2023 poukazuje na výraznú medziročnú variabilitu bez stabilného klesajúceho trendu. Celkové emisie sa pohybovali v

intervale 20,65 – 22,79 mld. kg CO₂e v rokoch 2019 – 2022, pričom v roku 2023 došlo k výraznému nárastu na úroveň 37,44 mld. kg CO₂e.

Koncentračná analýza ukázala, že podiel troch najväčších sektorov sa pohyboval medzi 15,07 % a 18,91 %, zatiaľ čo podiel piatich najväčších sektorov dosahoval 21,75 % až 26,78 %. Najvyššia koncentrácia bola zaznamenaná v roku 2020, čo môže súvisieť s relatívnym posilnením dominantných sektorov počas pandemického obdobia.

Postupný pokles koncentrácie po roku 2020 naznačuje miernu diverzifikáciu emisnej štruktúry. Emisie teda nie sú extrémne koncentrované v úzkej skupine sektorov, ale sú relatívne rozptýlené medzi širšie spektrum ekonomických činností.

Regresná analýza potvrdila celkový rastový trend s priemerným ročným nárastom približne 3,08 mld. kg CO₂e. Koeficient determinácie $R^2 = 0,47$ však poukazuje na výraznú nestabilitu vývoja, pričom rok 2023 predstavuje významnú štatistickú odchýlku.

Z environmentálno-strategického hľadiska je nevyhnutné zamerať sa na najväčšie emisné sektory, pričom významný potenciál redukcie existuje aj v širšom spektre ekonomických činností vzhľadom na relatívne rovnomernejšie rozloženie emisnej záťaže.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



MINISTERSTVO
ŠKOLSTVA, VEDY,
VÝSKUMU A ŠPORTU
SLOVENSKEJ REPUBLIKY